

## LES CHAMPIGNONS DU SOL : UN RÉSEAU VIVANT QUI PROTÈGE LES ARBRES ET LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

**Olivia Azevedo <sup>1\*</sup> and Frank Ashwood <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Biological and Environmental Sciences, University of Stirling, Stirling, United Kingdom

<sup>2</sup> Forest Research, Northern Research Station, Roslin, United Kingdom

### JEUNES RELECTEURS:



**ANNA**

ÂGE: 16 ans



**CATHERINE**

ÂGE: 15 ans

Les champignons ectomycorhiziens sont une catégorie de champignons qui développent une relation mutuellement bénéfique avec les racines des plantes. Ces champignons forment depuis longtemps des associations extrêmement fructueuses avec les arbres des forêts du monde entier. Les arbres et les champignons qui leur sont associés ont développé des relations d'échanges : les champignons aident les plantes à atteindre des nutriments peu accessibles, et en retour, les champignons bénéficient d'un accès constant et ininterrompu aux sucres de la plante. Cette interaction en grande partie invisible agit sur le stockage et le cycle du carbone dans le sol, et a des effets bénéfiques sur la santé et la nutrition des plantes. Les champignons ectomycorhiziens sont également importants pour la décomposition des plantes et des animaux morts. Ces champignons contribuent à la biodiversité du sol et peuvent nous aider à

protéger nos forêts soumises aux stress environnementaux, tels que le changement climatique et la surexploitation des terres.

## DÉCOMPOSEURS

Ce sont des bactéries, des champignons ou des invertébrés qui décomposent les plantes et les animaux morts, libérant ainsi des nutriments dans le sol. Sans eux, les organismes morts et les déchets s'accumuleraient et les plantes ne pourraient pas obtenir les nutriments essentiels.

## MATIÈRE ORGANIQUE

Toute matière produite à l'origine par des organismes vivants tels que les plantes, les animaux et les micro-organismes, qui retourne au sol et peut être dégradée (décomposition). La matière organique est riche en carbone.

## SYMBIOSE

Tout type d'interaction biologique étroite et à long terme entre deux organismes différents.

## MUTUALISME

Une relation entre deux ou plusieurs espèces, procurant un bénéfice à chacune des espèces.

## CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS

Champignons qui établissent une relation mutualiste avec les racines des plantes. Les champignons améliorent les défenses des plantes et leur fournissent des nutriments, et les plantes fournissent des sucres aux champignons.

## LE RÔLE DES CHAMPIGNONS DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

On entend souvent dire que la variété donne du piment à la vie. Cette expression peut facilement s'appliquer aux nombreuses interactions existant dans la nature, comme celles qui ont lieu dans les écosystèmes forestiers. Pour vivre longtemps et en bonne santé, presque toutes les plantes dans la nature dépendent d'un réseau complexe et varié d'organismes du sol qui se nourrissent les uns des autres. Ce réseau souterrain, le plus souvent invisible, est constitué de minuscules bactéries, d'archées, de champignons et de nombreux autres organismes microscopiques.

Dans les sols forestiers, les champignons constituent un élément essentiel du réseau écologique global. Les champignons ont de nombreuses fonctions écologiques, deux sont particulièrement remarquables. Tout d'abord, ils jouent un rôle important de **décomposeurs**. Les champignons décomposent très efficacement la matière végétale morte (appelée **matière organique**), car ils sont capables, mieux que les autres organismes, de dégrader complètement les matériaux particulièrement résistants que l'on trouve dans les cellules des plantes ligneuses [1]. Dotés d'une large gamme d'enzymes, qui sont des protéines spéciales permettant de produire et d'accélérer les réactions chimiques, les champignons peuvent dégrader la matière organique et libérer des nutriments difficilement accessibles, les mettant ainsi à la disposition des plantes et des autres occupants du sol. Cependant, au cours de la décomposition, les champignons émettent un déchet gazeux, le CO<sub>2</sub>, ce qui entraîne un transfert du carbone du sol vers l'atmosphère. Les champignons sont des décomposeurs tellement efficaces que la décomposition fongique constitue l'une des plus grandes sources mondiales d'émissions de carbone, libérant chaque année 85 gigatonnes (une gigatonne équivaut à un milliard de tonnes) de carbone dans l'atmosphère. À titre de comparaison, en 2018, la combustion de produits d'origine fossile en avait produit environ 10 gigatonnes [2].

Dans cet article, nous allons nous concentrer sur un autre rôle important joué par les champignons : leur relation **symbiotique** avec les arbres et d'autres plantes. On appelle **mutualisme** une relation symbiotique dans laquelle le bénéfice est réciproque pour les deux espèces impliquées. Les champignons qui établissent des relations mutualistes avec les plantes sont appelés **champignons mycorhiziens**, d'après « myco », qui signifie « champignon » et « rhize », qui veut dire « racine ». L'association à bénéfices mutuels que forment les champignons mycorhiziens avec les racines d'environ 80 % des espèces végétales terrestres [1], est ancienne. Même l'Antarctique, en apparence aride, possède des vestiges fossiles de communautés mycorhiziennes. Des études montrent que ce travail d'équipe se poursuit depuis 400 millions d'années, à savoir depuis le début de la colonisation de la terre par les plantes [3]. Comme tous les champignons, les mycorhizes ne

peuvent pas fabriquer leur propre nourriture, elles reçoivent donc des sucres de leurs plantes hôtes et, en échange, leur fournissent de l'eau et des nutriments, comme l'azote et le phosphore, en provenance du sol.

Contrairement aux champignons décomposeurs qui ont tendance à occuper principalement la partie supérieure du sol et à avoir des activités fortement émettrices de carbone, les champignons mycorhiziens symbiotiques s'enfoncent plus profondément dans le sol. Ainsi, le réseau fongique devient un important puits de carbone dans le sol, ce qui signifie que ces champignons séquestrent le carbone à l'écart de l'atmosphère, et le stockent sous forme de matière organique difficile à décomposer dans le sol. On estime que les plantes associées à des mycorhizes peuvent transférer dans le sol jusqu'à 35 % de carbone supplémentaire, en comparaison à des plantes non mycorhiziennes. Ainsi, une quantité considérable de carbone peut rester dans le sol pendant de nombreuses années [4], contenue dans les tissus mycorhiziens. Ce point est important car le carbone doit être stocké dans le sol sur de longues périodes, afin de diminuer la quantité de carbone atmosphérique qui est à l'origine de la hausse des températures mondiales.

Malgré le rôle essentiel que jouent les champignons dans les écosystèmes forestiers, leur diversité est souvent négligée lors des décisions de gestion forestière. Les interventions des hommes, telles que l'exploitation forestière ou encore une utilisation sans discernement d'engrais, peuvent altérer le réseau fongique souterrain et perturber l'équilibre de l'ensemble de l'écosystème. Comme tout autre réseau, si un seul des segments de connexion manque ou est fragilisé, c'est alors toute la structure qui peut en souffrir.

## LE MONDE DES CHAMPIGNONS

Il existe deux principaux types de champignons mycorhiziens. Les premiers, appelés endomycorhizes, se développent à l'intérieur des cellules végétales. Ils ne font pas l'objet de cet article, mais ils sont intéressants car ce sont d'incroyables experts en matière d'adaptation à de nombreux environnements différents. Les champignons endomycorhiziens comprennent les mycorhizes à arbuscules, les mycorhizes éricoïdes et les mycorhizes orchidoïdes. Cependant, notre article porte principalement sur les **ectomycorhizes**, qui vivent à l'extérieur des parois cellulaires des plantes. Bien que plusieurs types de mycorhizes puissent coexister dans un écosystème, les ectomycorhizes sont dominantes dans les forêts tempérées et boréales, avec environ 6 000 espèces de champignons qui établissent des associations symbiotiques avec de nombreux arbres et plantes ligneuses.

Les ectomycorhizes se composent de deux types de structures importantes : les **fructifications** et les **hyphes**. Les fructifications sont des structures qui renferment des spores utilisées par les ectomycorhizes pour se reproduire. Environ 4 500 espèces d'ectomycorhizes ont des fructifications aériennes (ce sont les « champignons » du langage courant, que l'on peut ramasser en forêt, souvent avec un pied et un chapeau), alors que près d'un quart ont des fructifications souterraines (par exemple, les truffes). Les ectomycorhizes possèdent également des hyphes (du grec « tissu »), qui sont de longs filaments

### ECTOMYCORHIZE

Association entre un champignon et les racines de certaines plantes.

### FRUCTIFICATION

Structures fabriquées par les champignons pour pouvoir se reproduire. Les champignons (dans le langage courant) que l'on ramasse en forêt sont des exemples communs de fructifications.

### HYPHES

Structures longues et ramifiées d'un champignon qui s'étendent dans le sol pour absorber et transporter les nutriments.

ou structures tubulaires utilisés par les champignons pour absorber et transporter les nutriments. Les hyphes forment un manchon de tissu fongique autour des racines des plantes, enveloppant les racines tout comme un plâtre enserrme un os cassé (**Figure 1**). Les hyphes des champignons se développent également vers l'extérieur un peu comme des nervures, pénétrant entre les particules du sol, les racines et les cailloux pour capturer les nutriments qui sont normalement hors de portée des racines des plantes. L'association ectomycorhizienne produit également des antibiotiques, des hormones et des vitamines bénéfiques pour les plantes, et protège leurs racines des conditions défavorables du sol, comme le manque de nutriments, la présence d'organismes pathogènes et de substances toxiques. En retour, les champignons ont un accès constant et direct aux sucres produits par leurs hôtes végétaux au cours de la photosynthèse.

### Figure 1

Le champignon ectomycorhizien *Lactarius camphoratus*, formant un manchon blanc autour des racines d'un chêne. (Crédit photo : Laura Martinez-Suz)



Figure 1

## LES ECTOMYCORHIZES ET LES FORÊTS : UN FORMIDABLE TRAVAIL D'ÉQUIPE

Les ectomycorhizes préfèrent comme partenaires les espèces végétales ligneuses, notamment les arbres et les arbustes. Elles peuvent parfois établir des relations exclusives, dans lesquelles une seule espèce de champignon s'associe à une espèce d'arbre particulière. Cependant, les ectomycorhizes s'associent généralement à un grand nombre d'espèces d'arbres. Il est courant de trouver plusieurs champignons mycorhiziens différents sur le système racinaire d'un seul arbre, ou encore une seule espèce de champignon associée à plusieurs espèces d'arbres différentes. Par exemple, l'épicéa commun peut former des associations symbiotiques avec plus de 100 espèces de

champignons différentes. Le champignon vénéneux bien connu, l'amanite tue-mouches, peut coloniser les racines de plusieurs types d'arbres, dont le pin, le bouleau, l'écicéa et l'eucalyptus (**Figure 2**).

La gamme d'espèces végétales colonisées par les ectomycorhizes est relativement restreinte : seulement environ 2 % des plantes de la planète. Cependant, les plantes avec lesquelles les ectomycorhizes s'associent couvrent de grandes surfaces et ont une grande valeur économique, par exemple comme source de bois de construction. Dans les régions tempérées du nord, les pins, les peupliers, les écicéas, les sapins, les saules, les hêtres, les bouleaux et les chênes forment tous des associations ectomycorhiziennes, alors que dans l'hémisphère sud, ce sont les eucalyptus et les nothofagus qui sont le plus souvent associés à des ectomycorhizes.

### Figure 2

L'amanite tue-mouches (*Amanita muscaria*), champignon vénéneux bien connu, peut former une association mycorhizienne avec plusieurs types d'arbres, y compris les pins, comme ici. (Crédit photo : Angela Mele)

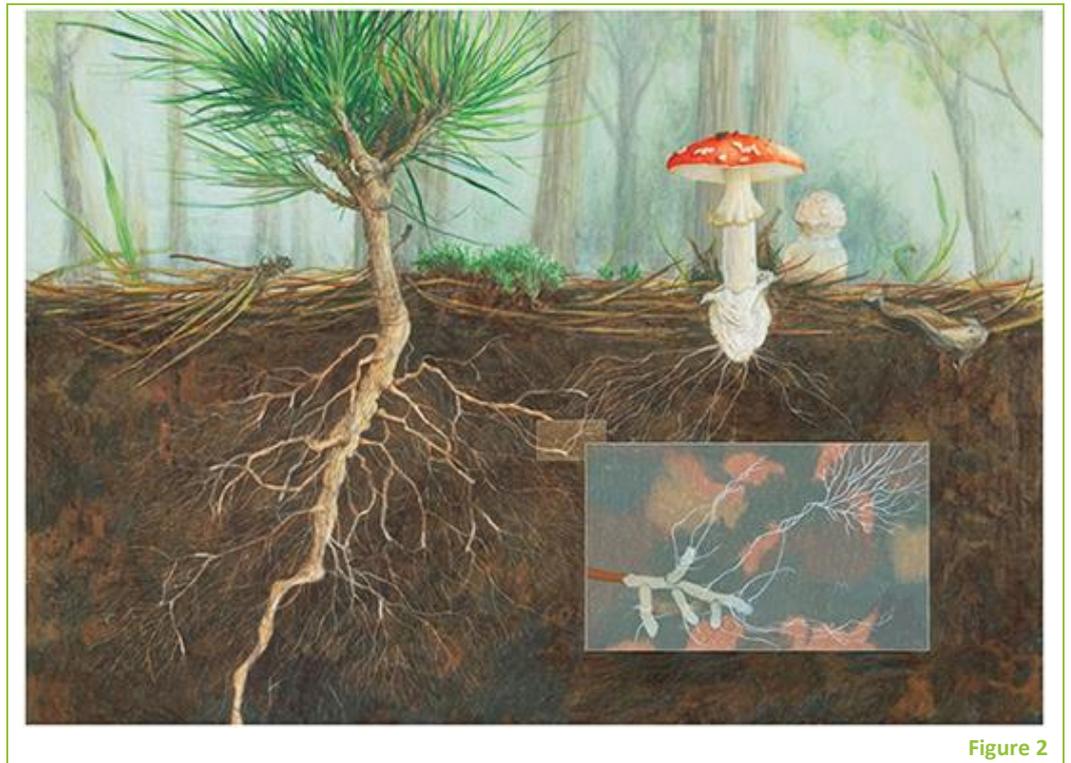


Figure 2

Les ectomycorhizes permettent aux arbres et aux forêts de s'adapter aux changements de saison et de paysage, par exemple en leur procurant des quantités d'eau adaptées tout au long de l'année et en les aidant à s'établir sur de nouveaux sols. Les champignons protègent également les plantes de la dégradation des sols, de la pollution et des modifications des conditions climatiques. Les scientifiques ont observé une relation directe entre le déclin des champignons ectomycorhiziens et la détérioration de la santé des arbres. Comme chaque type de champignon ectomycorhizien possède son propre éventail de caractéristiques uniques, chaque espèce est nécessaire et irremplaçable. Par exemple, certaines espèces préfèrent des conditions froides ou humides ; d'autres fonctionnent mieux pendant les saisons chaudes ou sèches ; quelques espèces sont des spécialistes de l'acquisition du phosphore et de l'azote du sol ; enfin d'autres encore sont plus efficaces pour obtenir ces nutriments à partir de la matière organique en décomposition [5].

Les champignons ectomycorhiziens établissent également un lien extrêmement important entre les plantes et la chaîne alimentaire du sol, composée de la communauté complexe d'organismes présents dans le sol. Ces champignons fournissent des nutriments importants aux organismes qui vivent dans le sol autour des racines des plantes, comme d'autres champignons minuscules, des bactéries, des protozoaires et des invertébrés. Les champignons produisent également des fructifications, source de nourriture essentielle pour la faune des écosystèmes forestiers. Par exemple, de nombreux rongeurs, tels que l'écureuil volant et le campagnol à dos roux de Californie, se nourrissent principalement de truffes. De nombreux autres mammifères mangent des champignons, notamment les ours, les cerfs et les souris. Les êtres humains sont émerveillés par la complexité, et aussi souvent par la beauté, des structures des champignons. Apprendre à les identifier, étudier leur écologie, mais aussi les déguster en tant que spécialités gastronomiques, nous procure de grandes satisfactions. Les champignons sauvages sont également utilisés pour la fabrication de médicaments, et l'industrie pharmaceutique étudie fréquemment les propriétés antibactériennes des champignons ectomycorhiziens.

## PROTÉGEONS NOS FORÊTS ET NOS CHAMPIGNONS

Malgré l'importance de la symbiose mycorhizienne dans les forêts du monde entier, les décisions de gestion forestière prennent rarement en compte la préservation des champignons ectomycorhiziens, de même que leur suivi, qui permet d'évaluer la santé des forêts. Les fonctions et services fournis par les forêts dépendent de la biodiversité du sol. Les champignons sont une composante majeure de cette biodiversité, et sont donc des partenaires importants pour relever les défis mondiaux auxquels nous sommes actuellement confrontés. Les champignons pourraient contribuer à la fixation à long terme du carbone de l'atmosphère, nous aidant ainsi à lutter contre les effets du changement climatique. En assurant le cycle des nutriments essentiels, les champignons pourraient également contribuer à empêcher la dégradation des sols, ce qui permettrait à la terre de continuer d'assurer la production de nourriture et le maintien de la vie. Les scientifiques et les gestionnaires de terres doivent continuer à étudier et à protéger les champignons ectomycorhiziens, afin que ces organismes importants puissent conserver leur rôle essentiel dans le tissu vivant de notre planète.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'Université de Stirling, les organismes *Forest Research*, et *Natural England*, l'association caritative *Woodland Trust*, le département gouvernemental *Forestry Commission Scotland* et la société *Tarmac* pour leur soutien financier et/ou logistique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., and Sanders, I. R. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytol.* 205:1406–23. doi: 10.1111/nph.13288
2. Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., et al. 2019. Global carbon budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data.* 11:1783–838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019
3. Brundrett, M. C. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytol.* 154:275–304. doi: 10.1046/j.1469-8137.2002.00397.x
4. Frey, S. D. 2019. Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 50:237–59. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331
5. Amaranthus, M. P. 1998. The Importance and Conservation of Ectomycorrhizal Fungal Diversity in Forest Ecosystems : Lessons From Europe and the Pacific Northwest. Portland, OR. doi: 10.2737/PNW-GTR-431

**ÉDITEUR** : Rémy Beugnon, German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv), Germany

**CONSEILLER SCIENTIFIQUE** : Ryan Thomas Weir

**RÔLE DES AUTEURS** : F.A. et O.A. ont conçu l'article, O.A. a rédigé le manuscrit et F.A. a édité le manuscrit.

**CITATION** : Azevedo O and Ashwood F (2022) The Soil Fungi: A Web of Life That Protects Trees and Fight Climate Change. *Front. Young Minds* 10:652660. doi: 10.3389/frym.2022.652660

**CONFLIT D'INTÉRÊTS** : Les auteurs déclarent que ces recherches ont été menées en l'absence de toute relation commerciale ou financière qui pourrait être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

**COPYRIGHT** © 2022 Azevedo and Ashwood. Cet article est en accès libre selon les termes de la licence Creative Commons Attribution (CC-BY). Son utilisation, sa distribution ou sa reproduction par tous moyens et sous tous formats est autorisée, à condition que le(s) auteur(s) original(aux) et le(s) titulaire(s) du droit d'auteur soient crédités, et que la publication originale dans ce journal soit citée, conformément aux pratiques académiques acceptées. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

## JEUNES RELECTEURS



### ANNA, 16 ANS

J'ai voulu participer à « Frontiers for Young Minds » parce que je me suis dit que ce serait une excellente occasion d'en apprendre davantage sur le monde qui m'entoure ! J'adore les sciences, en particulier la biologie et la physique. Après l'école, j'aimerais beaucoup faire quelque chose dans ces domaines.



### CATHERINE, 15 ANS

J'aime la musique et le chant, je joue du violon et de la guitare et j'aime aussi écrire ! Je fais partie d'une troupe de danse folklorique écossaise et je suis bénévole auprès d'enfants dans des clubs et associations de scoutisme locaux. J'aime bien participer aux manifestations organisées pour les jeunes à mon école et faire du fitness. Je comptais bien apprendre des choses nouvelles et intéressantes en relisant ces articles !

## AUTEURS



### OLIVIA AZEVEDO

Je suis une ancienne journaliste devenue pédologue. J'ai quitté le Portugal pour m'installer en Écosse où je suis actuellement étudiante en doctorat à l'université de Stirling. Mes recherches consistent pour beaucoup à creuser dans les sols forestiers pour tenter de trouver des réponses à une question importante : qu'arrive-t-il aux sols et aux organismes qui les peuplent lorsqu'on plante des arbres ? Mes recherches incluent, entre autres, les domaines d'intérêt suivants : la biodiversité des sols ; le cycle des nutriments ; les relations mutualistes entre les composantes aériennes et souterraines des écosystèmes terrestres ; la dégradation et la gestion des sols ; les paysages pédologiques anciens. \*olivia.azevedo@stir.ac.uk



### FRANK ASHWOOD

C'est parce que j'avais une passion pour la nature que j'ai étudié la biologie à l'université, où j'ai participé bénévolement à des projets de recherche en Écosse et au Mexique concernant l'écologie des invertébrés. Après avoir travaillé comme consultant en environnement pendant quelques années, je suis retourné à l'université et j'ai obtenu un doctorat, en étudiant les vers de terre sur des sites de décharge réhabilités. J'ai maintenant un très bon emploi en tant qu'écologue des sols pour l'organisme de recherche *Forest Research*, où j'étudie la biodiversité des sols dans les régions boisées du Royaume-Uni. Pendant mon temps libre, je donne des cours de biologie du sol et je fais de la macrophotographie (je prends des photos des petits animaux qui vivent dans le sol).

## TRADUCTRICE

### ANNE GALLET-BUDYNEK

Je suis traductrice, ingénieure et docteure en agronomie ; j'ai eu la chance d'effectuer des recherches pendant plusieurs années sur le cycle des éléments minéraux dans les écosystèmes terrestres, en France et à l'étranger. <https://www.linkedin.com/in/anne-gallet-budynek-9a089450/>