Eloge du mycologue de terrain et de la biodiversité fongique

Bulletin de la société mycologique du Haut-Rhin n°38 (2026)
Jean-Jacques Sanglier
jjsanglier.esperanza@gmail.com

Depuis des temps immémoriaux, l'Homme est fasciné par les champignons. Ni plantes ni animaux, ni totalement visibles ni totalement imperceptibles, les mycètes brouillent les catégories : ils sont souvent difficiles à trouver, saisonniers, discrets et il faut apprendre à lire le milieu pour les repérer. Ils offrent une extraordinaire variété morphologique, chapeaux en entonnoir, en cloche, en corail, en oreille, en étoile, des couleurs qui défient l'imagination, parfois une bioluminescence. Leur rareté relative induit plaisir et patience. Leur mystère ne vient pas seulement de leur biologie mais aussi du fait qu'ils résistent souvent à une lecture simple, carpophores variables, génome complexe et labile ; leur diversité reste sous-estimée. Ils peuvent être d'excellents comestibles ou de terribles poisons, des symbiontes indispensables ou des pathogènes redoutables. La taxonomie fongique est en perpétuel remaniement ; la résistance à l'identification nourrit fascination et frustration. Sur le plan gustatif, ils occupent une place à part dans la gastronomie mondiale. Ils donnent à certaines populations un supplément bienvenu d'alimentation. Dans certaines cultures, ils permettent de se relier aux dieux. Leurs applications sont de plus en plus nombreuses et diverses. On ne soupçonne pas le réseau gigantesque qui les interconnecte et les relie aux plantes. Pourquoi, alors qu'il est question de la manière qu'a le réel de nous surprendre, de nous résister ou de nous être parfois scandaleusement extérieur, est-il question de champignons, et non pas de n'importe quelle autre réalité biologique ? Une balade en forêt, un article sur les mycorhizes ou une sortie avec des mycologues chevronnés : on est tombé dans la mycologie, et on ne pourra plus y échapper. Peu à peu se construit un mycologue de terrain.

Le mycologue de terrain joue un rôle central dans la connaissance et la préservation de la biodiversité fongique. Par l'observation macroscopique – formes, couleurs, textures, odeurs, habitats, périodes de fructification – il décrit les champignons dans leur milieu, en tenant compte de leur variabilité et de leur écologie. Il sait qu'un même lieu visité à une semaine d'intervalle peut révéler une fonge différente, et que certaines espèces « fidèles » ne se montrent que quelques jours par an. L'étude microscopique des spores, hyphes et structures fertiles, complétée par l'usage de réactifs, permet de préciser l'identification et de distinguer des espèces proches. Notamment par ses observations, ses inventaires, ses rapports, sa connaissance de biocœnoses, il essaye de décrire et de défendre les écosystèmes en danger et, à une époque de réchauffement climatique, ses investigations sont capitales.

Si les carpophores des macromycètes attirent notre attention, ils ne sont cependant que la partie émergée de champignons dont le cycle de vie se déroule essentiellement dans le sol. À côté d'eux, des groupes purement souterrains comme les Glomeromycotina, mycorhiziens des racines de nombreuses plantes, structurant les sols, restent hors du champ du mycologue de terrain mais jouent un rôle clé dans le fonctionnement des écosystèmes. Nous ne pouvons ignorer toute cette diversité.

Arbre phylogénétique des Fungi

Le mycologue de terrain s'intéresse essentiellement au sous-embranchement des Dikarya, caractérisés par une phase dicaryotique (cellules à deux noyaux haploïdes associés sans caryogamie immédiate) durant une partie de leur cycle de vie, Ascomycètes (morilles, truffes,

levures) et Basidiomycètes (amanites, bolets, rouilles, …). La figure 1 montre la multiplicité du monde fongique. Ce document sera centré sur les Dikarya mais nous aborderons aussi les Glomeromycotina, souterrains, dont l'importance écologique est considérable.

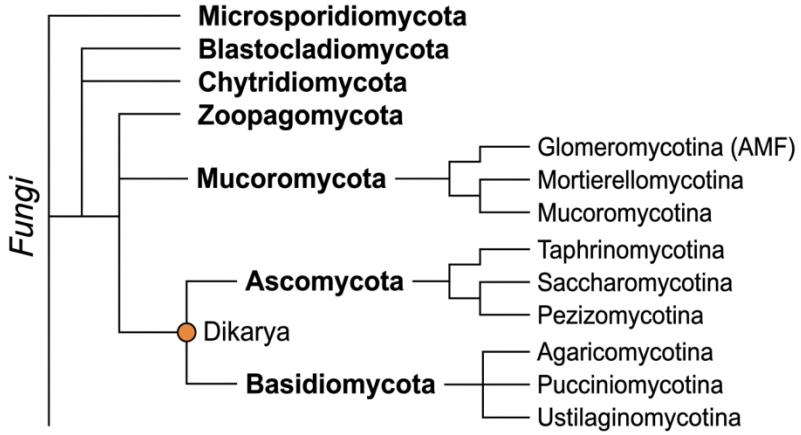

Figure 1 : les différents phylums de champignons.

L'espèce

Définir une espèce et reconnaître une espèce relèvent de deux niveaux différents : définir consiste à formuler ce qu'est une espèce en général, tandis que reconnaître revient à attribuer un individu concret à une espèce déjà délimitée. Le concept moderne (General Lineage Concept, GLC) voit l'espèce comme une métapopulation évoluant de manière indépendante — un « nuage » de génotypes qui se chevauchent suffisamment pour maintenir la cohésion. Chaque individu occupe une position unique dans l'espace génotypique. Les frontières de ce nuage sont floues et dynamiques, ni nettes, ni figées. Une espèce est donc un instantané temporaire dans un flux évolutif continu. Elle regroupe des individus suffisamment semblables pour former une unité cohérente, mais chacun est unique — et cette variation individuelle, intraspécifique, fournit le « carburant » de l'évolution et de la spéciation future. Pour les champignons, cette conception de l'espèce comme lignée évolutive se décline opérationnellement dans la Genealogical Concordance Phylogenetic Species Recognition (GCPSR) : une espèce fongique est reconnue comme un ensemble de lignées dont la monophylie est concordante sur plusieurs loci indépendants. Lorsque plusieurs marqueurs non liés délimitent le même groupe, on considère que ce groupe suit une histoire évolutive cohérente et mérite le statut d'espèce. Avant l'essor de la biologie moléculaire, la taxonomie fongique s'est principalement construite sur des caractères morphologiques et écologiques : formes des sporophores, structure des tissus, types de spores, mais aussi cortège d'hôtes, substrat, phénologie et milieu, autant de traits observables in situ qui ont longtemps guidé la délimitation des espèces et l'organisation des genres. Cette taxonomie fondée sur la morphologie et l'écologie demeure capitale : elle reste le socle de la détermination de terrain, de la description des taxons et de la compréhension fine de leurs niches dans les écosystèmes.

Pour les macromycètes, on combine aujourd'hui plusieurs niveaux de critères pour décider qu'un ensemble d'individus constitue une même espèce (définition) et pour y rattacher un spécimen donné (reconnaissance) : 1. Morphologie macroscopique du carpophore, 2. Traits écologiques et biologiques, 3. Caractères microscopiques, 4. Données moléculaires (en pratique, un seul locus , ITS le plus souvent, est généralement utilisé comme critère de reconnaissance,

mais la délimitation d'espèces nouvelles s'appuie de plus en plus sur plusieurs marqueurs et sur des analyses phylogénétiques).

Les champignons présentent une forte instabilité génétique et les mécanismes de plasticité (chromosomes accessoires, hypermutation, polymorphismes nucléotidiques simples, transfert génétique horizontal, modifications du nombre de chromosomes, sans oublier les bactéries et les virus endofongiques, …) d'une part favorisent des adaptations rapides et d'autre part induisent des variations phénotypiques, par exemple la taille ou la couleur du carpophore, le nombre de lames ou de pores. Cela donne des phénotypes variables et peut conduire à une spéciation à long terme. De plus, chez les champignons supérieurs, la formation et la maturation des carpophores sont contrôlées par des mécanismes épigénétiques qui modulent l'expression de gènes de développement. Ces « switches » épigénétiques peuvent faire varier le moment de fructification et la vitesse de développement, ce qui contribue à la diversité des caractères phénologiques observés entre souches à génotype proche. Que de difficultés programmées ! Cette variabilité est un problème majeur pour le mycologue, mais aussi son challenge.

L'apprentissage

L'apprentissage du savoir en mycologie demande du temps : apprendre à lire un biotope, à reconnaître des caractères fiables, à faire des préparations pour la microscopie, à utiliser les clés et la littérature, à douter et à revenir sur ses déterminations. Beaucoup se souviennent de leurs débuts, où les bolets se ressemblaient tous et où chaque Russule était une énigme ; puis, peu à peu, les couleurs se nuancent, les textures parlent, les odeurs deviennent des indices, le goût permet certaines distinctions et le regard change. On apprend à utiliser ses cinq sens, ce qui n'est pas toujours évident. On note le type d'écosystème, les végétaux proches de la récolte. Il faut apprendre à observer les carpophores dans leur globalité, puis dans chaque élément : reste-t-il des restes d'une volve ? y a-t-il des traces de cortine sur le pied, les lames sont-elles adnées ou récurrentes ? la cuticule du chapeau est-elle gluante ?, etc. On perçoit les couleurs, mais ce n'est pas toujours facile à qualifier ni à distinguer : est-ce encore un brun roux ou un brun orangé ? La distinction entre deux espèces sur la base de la couleur est parfois très subtile et ne se manifeste que par une légère différence de nuance, cas de *Rheubarbariboletus armeniacus* et de *R. persicolor*. La couleur de l'hyménium est capitale mais doit être effectuée sur des exemplaires mûrs.

On est étonné, la première fois, par l'odeur de noix de coco de *Lactarius glyciosmus*, puis, avec l'expérience, on parvient à qualifier une odeur de pélargonium (*Volvaria murinella*) ou de concombre (*Tricholoma aurantium*). Le goût des champignons est un sujet controversé, davantage sollicité par les mycophages que dans le cadre de la taxonomie sur le terrain. On peut distinguer différents groupes de *Russula* selon que leur chair est douce (*R. cyanoxantha*, *R. decolorans*) ou fortement âcre (*R. ochroleuca*, *R. sanguinea*).

Nos mains nous permettent de ressentir la texture du champignon. C'est un moyen d'évaluer la « fragilité » du spécimen. Le passage de nos doigts peut laisser des traces, comme chez *Ganoderma applanatum*, où cela laisse une tache brunâtre bien visible. Il y a quelques cas où le son peut aider, le « bruit sec » au bris du pied chez des espèces à stipe raide comme *Mycena vitilis*. Il faut apprendre à développer nos cinq sens.Des tests chimiques simples (Guaiac, KOH, $FeSO_4$, NH_4OH) aident à délimiter des espèces (par ex. *Russula ionochlora*) et la lecture de certains résultats demande de l'expérience. Enfin, l'âge du sporophore et les conditions du milieu (humidité, lumière, sécheresse, gel) modifient fortement l'aspect des Basidiomycètes et sont une source de confusions.

Au microscope, il faut distinguer des spores ovoïdes et ellipsoïdales, des ornementations verruqueuses ou échinulées, la présence d'un pore germinatif, s'assurer de l'absence de cystides ou de la présence de boucles d'anastomose. Peu à peu, on apprend les mots précis de la mycologie (un chapeau papillé n'est pas un chapeau mamelonné). Certains dessinent leurs observations microscopiques et peignent en aquarelle les carpophores, ce qui peut être magnifique et didactique. Je ne résiste pas à inclure dans cet article une aquarelle d'un artiste-mycologue qui veut rester anonyme sous le pseudonyme de Boubou. En figure 2, à titre complétif, une séquence partielle de son ITS. Des photographies peuvent être excellentes et devenir bases de données, comme le démontre la figure 3.
S'il ne les connaît pas, il doit apprendre à nommer les arbres et d'autres plantes pour faciliter une identification ou décrire le lieu de collecte. Par exemple *Suillus tridentinus* est fidèle aux mélèzes, *Leccinum versipelle* aux bouleaux ou encore *Lactarius obscuratus* à l'aulne. Tout cela exige un apprentissage, de la ténacité, de la patience, une certaine discipline et du temps.

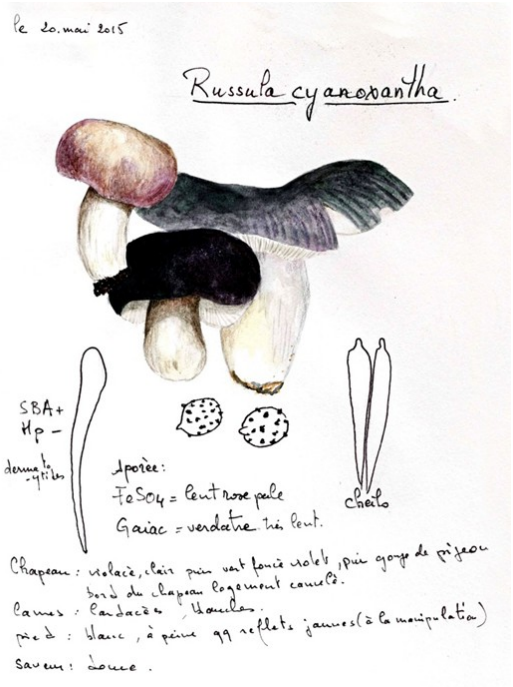

Figure 2: *Russula cyanoxantha* (Doudou, Mycologie 66)

Figure 23: séquence partielle de l'ITS de *Russula cyanoxantha* (Mycokeys)

gtggctgtaatggccccaaggtgggaatgcgaggcgatgttcccctcaacggagtcccgtgctcgtgcgccgcgttcaagactgtccccttcaga /
gtggctgtaatggccccaaggtgggaatgcgaggcgatgttcccctcaacggagtcccgtgctcgtgcgccgcgttcaaga-ctgtccccttcaga/
gtggctgtaatggccccaaggtgggaatgcgaggcgatgttctccc/caacggagtcccgtgcttgcgcgccgagttcaaga-ctgtcccctccaga
/gtggctgtaacggccccaag-gtgggaatgcgaggcgatgttttcct-caacggagtcccgtgctcgtgcgccgagttcaaga-ctgtcccctccaga

La transmission

Cette progression s'appuie aussi sur la transmission, au sein des sociétés mycologiques, des groupes de terrain, des laboratoires et des formations, où les mycologues expérimentés partagent leurs connaissances, expliquent les bons gestes, accompagnent les débuts et corrigent les erreurs des novices. Souvenons-nous des conseils avisés et patients de Paul Hertzog, de Vincent Rastetter, de Jean-Jacques Grunenberger et maintenant de Daniel Doll, de Jean-Luc Muller et d'autres, des cours d'initiation de Fabien Sarraillon. On peut faire appel à des spécialistes d'un groupe, les russules avec Thomas Isarno, les lichens avec Marc Joly ou Antoine Bresciani.

Pensons aux sorties à la découverte d'un écosystème puis voir ensuite un cercle se former autour d'une table, chacun apportant ses récoltes, ses hypothèses, ses questions, et repartant avec un peu plus que des noms. Merci à tous ceux qui préparent ces excursions (Bernard Oberlin), aux autres qui photographient (Philippe Defranoux) ou font des listes d'espèces récoltées (Daniel Fischer) ou encore l'inventaire de la mycoflore du Haut-Rhin, travail clé de longue haleine (Daniel. Doll). Combien avons-nous la chance d'avoir des sociétés de mycologie encadrées par des personnes dévouées, comme notre SMHR. Saluons les présidents et leurs assistants pour tout le travail d'encadrement, Bernard Diss, J.-L. Muller notamment. La S.M.H.R. organise des réunions régulières, une exposition annuelle (Jean-Paul Meyer), en soutient d'autres et va dans les écoles, publie un bulletin édité par J.-L. Muller, met à disposition sa riche bibliothèque. Initiée par Bernard Crozes, une liste des champignons du Haut-Rhin est poursuivie avec ardeur par Daniel Doll, avec le soutien des membres de la S.M.H.R. et occasionnellement par d'autres mycologues. Je ne puis citer chaque personne, mais la participation de chacune est indispensable. La mycologie de terrain, ce sont des copains, certains des amis, avec lesquels on débat, échange des découvertes ou des lieux ; la mycologie de terrain a un rôle social et éducatif. Les sociétés mycologiques de l'Est de la France sont réunies en une fédération, ce qui stimule les échanges et fait croiser des expériences ; saluons ses dirigeants coordinateurs. Remercions des scientifiques éminents, comme le professeur Francis Martin et ses équipes, pour nous apporter des connaissances sur la mycologie génomique et sur l'écologie.



Sortie commune du 04.04.2026 SMHR / SMTB Wegscheid



Stage INRAE Champenoux – JP. Maurice, J. Cabalion, M. Buée, F. Sarraillon, F. Le Tacon, S. Duplessis

La chasse aux champignons

La chasse aux champignons force à être pleinement présent : lire les différents paramètres de l'écosystème (végétation, sol, substrat, humidité) et détecter les mycètes. Cette concentration sur la Nature nous calme et nous éloigne des problèmes de la vie courante. La dimension de chasse au trésor décuple le plaisir. Quelle joie de trouver un beau cèpe sous des feuilles de châtaignier ! Quel plaisir de retrouver une espèce rare après des années, comme *Rhodocybe palmatus*, ou de valider, par une seconde cueillette indépendante, une espèce nouvelle pour la science, comme *Clitopilus chrischonensis*, découvert par Enzo Musumeci dans une forêt de zone calcaire en Suisse en 2008 et redécouverte en 2022 au Bollenberg par Daniel Doll, séquençage ADN à l'appui. Quelle réussite quand on trouve une espèce nouvelle pour la région ! Depuis 2007, Daniel Doll, au départ avec le soutien de Paul Hertzog, ensuite avec celui de Lionel Juif et

d'autres naturalistes dont Philippe Defranoux pour les photographies, fait des relevés mycologiques plusieurs fois par an sur les 100 hectares du site de l'écomusée et ses différentes zones (village, étangs, colline sèche, forêts variées, terril). Au total : 1201 taxons au 21 mars 2026. C'est un travail de longue haleine, remarquable, qui requiert énergie et sens de l'observation, avec la mise en évidence de nombreux taxons remarquables dont certains uniques pour l'Alsace à ce jour. Et n'oublions pas la joie de récolter et de cuisiner de délicieux comestibles, la morille en mars, le tricholome de la Saint-Georges en avril…

Trouver l'espèce

Il faut un nom. Le mycologue travaille aussi avec des images mentales : en quelques secondes, l'œil et le cerveau réduisent un champignon réel, avec toutes ses nuances, à une forme familière et à un nom probable, au risque de voir d'abord ce que l'on attend plutôt que ce qui est réellement présent. Cette capacité est précieuse pour reconnaître rapidement des espèces courantes, mais elle peut aussi piéger, en conduisant à ignorer des détails qui contredisent la première impression, ou à forcer un spécimen ambigu dans une espèce déjà connue plutôt que d'accepter un « indéterminé ». Le mycologue de terrain doit apprendre à accepter l'incertitude, les demi-réponses, les espèces « probables » qu'il faut laisser en suspens plutôt que de trancher trop vite. Ce rapport au doute, loin d'être une faiblesse, devient une discipline intérieure : savoir dire « je ne sais pas », supporter de revenir sur une détermination ancienne, reconnaître qu'une nouvelle information – un caractère oublié, une étude génétique – oblige à changer d'avis. Parfois, il faut accepter de ne pas pouvoir mettre un nom, comme Paul Herzog même le fit : « il faut donner sa chance au champignon ! ». L'instabilité génétique des champignons leur en donne l'occasion. On demeure indécis face à des *Inocybe* ou des *Russula*. Le terrain devient un exercice d'hygiène mentale autant que de technique : il faut apprendre à ralentir, à vérifier systématiquement ce que l'on croit voir, à confronter ses souvenirs à ce que montrent vraiment le carpophore, la microscopie, les réactions chimiques, les descriptions.

La saison hivernale permet de relire ses carnets, mettre en ordre les récoltes, terminer les planches d'herbier, comparer les photos, rédiger des cahiers personnels consacrés à un genre ou à un groupe, où se croisent dessins, descriptions et retours d'expérience. Paul Hertzog, à nouveau, est un exemple : il travaillait consciencieusement chaque hiver et a produit un carnet personnel par genre ou famille. Cela permet à certains, comme Daniel Doll, de préparer des articles sur les événements mycologiques de l'année écoulée. Certains, comme Fabien Sarraillon, Jean-Luc Muller, organisent des cours. Cela permet de lire. La mycologie apprend la patience, l'attention soutenue, la capacité de concentration sur des détails minuscules, mais apporte aussi une forme d'apaisement. Peu à peu, une passion s'installe et ne vous quitte plus.

Structure et discipline

La mycologie de terrain exige régularité, effort et pratique active ; elle ne s'apprend pas passivement. C'est avant tout une discipline d'observation : comparer, décrire et relier les espèces à leur milieu.

Préparation en amont

- Se familiariser avec la taxonomie, les grands groupes et les vocabulaires morphologique et écologique.
- S'entraîner à rédiger des descriptions complètes (chapeau, hyménium, pied, chair, base, habitat).

Travail de terrain

- Noter précisément le contexte écologique : GPS, type de milieu, végétation associée.
- Identifier les grands types écologiques (mycorhiziens, saprophytes, parasites).
- Photographier in situ, récolter soigneusement (avec la base), et prendre plusieurs stades de développement.

- Documenter chaque récolte : substrat, odeur, caractéristiques, numéro de collecte.
- Limiter le nombre d'espèces récoltées pour privilégier une étude approfondie.

Méthode d'observation

- Tenir un carnet d'observation pour structurer l'attention et intégrer plusieurs caractères à la fois.
- Éviter les identifications basées d'abord sur la couleur ; utiliser des guides et clés fiables.
- Dessiner, décrire minutieusement et réaliser une sporée.

Analyse et détermination

- Compléter par des observations microscopiques (spores, cystides, etc.).
- Utiliser les clés comme un raisonnement : formuler et tester des hypothèses, revenir en arrière.
- Accepter l'incertitude (identifier à un groupe, reconnaître ses limites).
- Soumettre ses déterminations à des mycologues expérimentés.

Mise en garde

- Les identifications par simple photo (applications) sont peu fiables.
- Elles court-circuitent l'apprentissage essentiel : observer, décrire et raisonner.

Génomique

La génomique a transformé la mycologie en permettant l'analyse des génomes pour mieux comprendre l'évolution, la biodiversité et les modes de vie des champignons. Le séquençage ADN a révolutionné des domaines comme la taxonomie, l'écologie et la biotechnologie, révélant des espèces cryptiques et redéfinissant les classifications. Cependant, la taxonomie génétique présente des limites. La classification génomique moderne des champignons, fondée sur les analyses moléculaires et phylogénomiques, rencontre des limitations importantes liées au barcoding unique et évolue vers des approches multi-locus intégratives. Le barcoding chez les fungi consiste à séquencer un court fragment d'ADN standardisé, en pratique le plus souvent la région ITS du génome ribosomal, presque identique au sein d'une espèce mais différencié entre espèces, puis à comparer cette séquence à une base de données de références bien documentées pour en déduire l'identification spécifique, générer des hypothèses d'espèces et explorer la diversité fongique à grande échelle, que ce soit à partir de carpophores, de cultures ou d'ADN environnemental, après une simple extraction d'ADN et une PCR (= multiplication enzymatique) ciblant ce locus ou des barcodes secondaires complémentaires.

Le marqueur ITS (Internal Transcribed Spacer), bien qu'établi comme barcode primaire consensuel pour les champignons, présente trois problèmes majeurs : l'absence d'écart génétique (« barcode gap ») entre certaines espèces sœurs rendant leur délimitation impossible, l'hétérogénéité intra-souche des copies d'ITS produisant des chromatogrammes illisibles en séquençage Sanger, et l'échec d'amplification PCR chez environ 10 % des spécimens fongiques testés malgré l'utilisation d'amorces dites « universelles ». Les tendances techniques actuelles privilégient une stratégie multi-marqueurs combinant le barcoding primaire (ITS) avec des barcodes secondaires comme TEF1 (facteur d'élongation de traduction 1-alpha), qui montre une performance supérieure pour la discrimination d'espèces proches, et des marqueurs tertiaires spécifiques à certains groupes taxonomiques comme TOP1, PGK ou LNS2. Le séquençage de nouvelle génération (NGS) s'impose progressivement pour surmonter le problème d'hétérogénéité des copies multiples en permettant le séquençage direct de copies individuelles sans étape de clonage, particulièrement dans les études de métabarcoding environnemental.

La classification génomique des champignons a révolutionné la taxonomie fongique en remplaçant l'ancienne approche morphologique. Le règne Fungi se subdivise actuellement en 9 sous-règnes, 18 divisions (ou embranchements, phyla) et 74 classes selon les travaux récents, avec une structuration majeure distinguant les champignons basaux primitifs (Cryptomycota, Chytridiomycota, Blastocladiomycota, Zoopagomycota, Mucoromycota incluant les

Glomeromycotina) et le sous-règne Dikarya qui regroupe les deux grands embranchements évolutifs avancés : Ascomycota (subdivisés en Taphrinomycotina, Saccharomycotina et Pezizomycotina) et Basidiomycota (subdivisés en Pucciniomycotina, Ustilaginomycotina et Agaricomycotina). Cette classification phylogénétique, basée sur des analyses comparatives de séquences génétiques multi-locus et génomiques complètes, a permis de démontrer la monophylie ou polyphylie de nombreux groupes, conduisant à d'importantes révisions nomenclaturales, la reconnaissance de nombreuses espèces cryptiques génétiquement distinctes, et le transfert d'espèces vers des genres phylogénétiquement cohérents.
Au niveau des ordres et des genres, particulièrement chez les Dikarya, la classification génomique a provoqué des révisions taxonomiques majeures en s'appuyant sur des analyses multi-locus et phylogénomiques qui transcendent les limites du barcoding ITS unique. Les Dikarya, regroupant les deux divisions les plus évoluées (Ascomycota avec ~65 000 espèces réparties en 6 100 genres, et Basidiomycota avec ~30 000 espèces), ont vu leurs classifications internes profondément remaniées par les approches moléculaires comparatives. Chez les Ascomycota, la phylogénie multi-gènes a conduit à reconnaître trois sous-divisions (Taphrinomycotina, Saccharomycotina et Pezizomycotina), remplaçant l'ancienne classification morphologique qui distinguait principalement Hémiascomycètes, Plectomycètes, Pyrenomycètes et Discomycètes. Les Basidiomycota ont connu des révisions similaires avec la subdivision en trois sous-divisions (Pucciniomycotina, Ustilaginomycotina et Agaricomycotina), cette dernière incluant notamment les ordres majeurs des macromycètes comme Agaricales, Boletales et Russulales, dont la délimitation des familles et genres a été réévaluée par phylogénomique.
La tendance actuelle privilégie une approche polyphasique intégrative combinant morphologie, écologie, données de culture et analyses phylogénétiques multilocus (ITS + LSU rDNA + TEF1 + RPB2, voire génomes complets) pour délimiter les genres et valider la monophylie des ordres, permettant notamment de détecter les genres polyphylétiques nécessitant un éclatement taxonomique. Les grandes révisions génomiques jouent le rôle de « macro-cadre » : elles fixent un référentiel robuste à grande échelle, mais la micro-taxonomie (sections, complexes d'espèces, limites génériques fines) reste en mouvement et doit être régulièrement actualisée à la lumière de nouvelles données. Un exemple frappant est le genre *Cortinarius*, avec en 2022 une proposition de systématique inédite des cortinaires en 10 genres, départ d'autres révisions. D'autres auteurs proposent de conserver un *Cortinarius* large englobant plusieurs de ces clades. Un système à dix genres peut être plus informatif phylogénétiquement, mais plus difficile à manipuler pour les mycologues de terrain, les écologues ou les amateurs, surtout quand les clés sont encore peu diffusées.

Divers aspects de la taxonomie génomique restent subjectifs :

- choix des marqueurs et des jeux de données : ITS seul, multilocus, génomes entiers, SNPs, loci « maison », etc., n'ont pas la même résolution ni les mêmes biais, et ce choix relève toujours d'arbitrages humains.
- définition des seuils : distance génétique pour parler d'« espèce », profondeur minimale d'un clade, bootstrap ou valeurs de support exigés, tous ces seuils sont conventionnels et varient selon les écoles et les groupes étudiés.
- interprétation des discordances : incongruences entre arbres (gènes vs concaténation, ML vs BI, ITS vs LSU vs gènes protéiques) sont résolues par des décisions d'auteurs, parfois en s'appuyant sur l'écologie, parfois en privilégiant un jeu de données, parfois en laissant coexister plusieurs solutions.

Ainsi, deux clades bien supportés mais écologiquement très proches peuvent être décrits comme deux espèces distinctes par une équipe, alors qu'une autre préférera une seule espèce à large variabilité génétique.

Les champignons ont des génomes compacts (souvent quelques dizaines de Mb), avec une grande plasticité en taille et en contenu en gènes, y compris au sein d'une même espèce. Ils présentent une forte instabilité génétique et les mécanismes de plasticité (chromosomes accessoires, hypermutation, polymorphismes nucléotidiques simples, transfert génétique horizontal, modifications du nombre de chromosomes, sans oublier les bactéries et les virus endofongiques…) (voir plus loin) d'une part favorisent des adaptations rapides et d'autre part induisent des variations phénotypiques, par exemple la taille ou la couleur du carpophore, le nombre de lames ou de pores. Cela donne des phénotypes variables et peut conduire à une spéciation à long terme. Des phénomènes génétiques proprement fongiques brouillent les frontières entre individus et entre taxons : l'hétérocaryose (coexistence de noyaux génétiquement différents dans le même mycélium), la parasexualité (recombinaison génétique sans méiose formelle), et une plasticité de la ploïdie remarquable — variations entre haploïdie, diploïdie et aneuploïdie dans le même cycle de vie. Ces phénomènes permettent à des «individus» de fusionner et d'échanger des gènes sans reproduction sexuée classique, ce qui rend floue la notion d'isolement génétique qui fonde le concept biologique d'espèce. L'hybridation est un phénomène courant et important chez les champignons. De plus, chez les Dikaryas, la formation et la maturation des carpophores sont contrôlées par des mécanismes épigénétiques qui modulent l'expression de gènes de développement. Ces « switches » épigénétiques peuvent faire varier le moment de fructification et la vitesse de développement, ce qui contribue à la diversité des caractères phénologiques observés entre souches à génotype proche. En résumé, la complexité et la fluidité des génomes fongiques résultent d'un ensemble de mécanismes génétiques, épigénétiques et écologiques, leur conférant une capacité d'adaptation exceptionnelle.

Pour les Glomeromycotina, la situation est plus compliquée : leur biologie — hétérocaryose, copies multiples divergentes (spores multinucléées, hyphes coenocytiques), absence de mécanisme d'homogénéisation efficace — fait que le signal moléculaire ITS obtenu ne correspond à aucune entité biologique clairement définie. Un ensemble de marqueurs plus stables et adaptés — en particulier l'18S, 28S, mtLSU et des gènes codants comme la β-tubuline — constitue une approche plus fiable.

L'ADN environnemental a profondément transformé la mycologie en permettant de détecter des champignons sans récolte de sporophores, à partir d'échantillons de sol, d'eau ou d'air. Il ouvre l'accès à des communautés jusque-là invisibles, notamment les taxons rares, souterrains, saisonniers ou peu fructifères, et enrichit fortement les inventaires de biodiversité. Son impact est aussi taxonomique et écologique : l'ADNe accélère la découverte de lignées cryptiques, affine la cartographie des communautés et améliore le suivi des écosystèmes. En revanche, il pose des défis d'interprétation, car la détection d'ADN ne prouve pas toujours la présence d'un organisme vivant actif, ni son rôle écologique exact (voir plus loin « le sol »).

La classification moléculaire des champignons repose sur des données génétiques générées, sélectionnées et traitées par l'homme (extraction, PCR, séquençage, analyses phylogénétiques), et reflète donc des cadres interprétatifs humains plutôt qu'un ordre « naturel » préexistant. La morphologie et l'écologie demeurent des piliers fondamentaux de la taxinomie mycologique, même à l'ère des méthodes moléculaires.

La taxonomie intégrative

La taxonomie intégrative est une approche moderne en mycologie qui combine des données morphologiques, écologiques, génomiques et chimiques pour délimiter les espèces de manière cohérente. Elle relie les observations de terrain, la microscopie, la génomique, l'écologie et les enjeux de conservation. Cette méthode, bien que complexe et inégalement appliquée, permet une meilleure compréhension des espèces fongiques, comme illustré par des études sur les genres *Russula*, *Cortinarius*, *Tricholomopsis*, *Ganoderma*, *Lactifluus* et *Clitopilus*. Elle vise à éviter une taxonomie fragmentaire en intégrant des outils moléculaires et des données de terrain,

contribuant ainsi à une vision globale du règne fongique, essentielle pour la recherche, la gestion des écosystèmes et la conservation.
Sans le travail patient des mycologues de terrain, sans collections ancrées dans le réel, la génomique risque de produire un catalogue de signatures abstraites ; mais sans les outils moléculaires et les approches génomiques de grande échelle, la taxonomie fongique resterait fragmentaire. La mycologie globale vise à obtenir une vision d'ensemble du règne fongique, utile à la recherche fondamentale, à la gestion des écosystèmes et à la conservation de la fonge.

La biodiversité

La biodiversité est définie comme un réseau complexe d'interactions entre les gènes, espèces et écosystèmes, incluant coopération, compétition, prédation et symbioses. Les champignons, bien qu'essentiels, sont souvent négligés dans les préoccupations sur la biodiversité. Leur phénologie, sensible au changement climatique, permet de suivre les effets des variations climatiques sur les écosystèmes. En Alsace, des efforts notables incluent la création de listes rouges des champignons, mais aucune protection légale spécifique n'existe pour ces espèces en France ou en Europe.
Les recherches sur les interactions fongiques se concentrent principalement sur les symbioses mycorhiziennes, notamment dans les forêts, vignobles et sols urbains. Des outils modernes comme la métagénomique et la métatranscriptomique permettent d'analyser les communautés fongiques et leurs fonctions, bien que ces techniques soient coûteuses et complexes. Des projets internationaux explorent les réseaux mycorhiziens et leurs rôles dans la réallocation du carbone.
La fragmentation des habitats, en plus des engrais minéraux, pesticides, artificialisation…, constitue une menace majeure pour la biodiversité, nécessitant des mesures pour préserver les écosystèmes. L'Observatoire national de la biodiversité (ONB) ne dispose pas d'indicateurs spécifiques sur les champignons, malgré leur importance. Les autres menaces importantes sont les engrais minéraux, les pesticides, la disparition des sols.
Les relevés effectués par les scientifiques citoyens se révèlent indispensables pour suivre l'évolution de la biodiversité. La liste détaillée des champignons récoltés dans le Haut-Rhin poursuivie par Daniel Doll et la S.M.H.R. constitue un exemple.

Le sol, les champignons telluriques et la métagénomique

Le sol constitue un écosystème complexe et autonome, abritant une biodiversité exceptionnelle encore largement méconnue, principalement dans les 20 premiers centimètres. Il s'agit du plus grand réservoir mondial de gènes et d'espèces, essentiel au fonctionnement des écosystèmes et à la durabilité des agro-systèmes. Cette vie souterraine se structure en plusieurs niveaux :

- Micro-organismes (bactéries, champignons, archées, protistes) assurant la décomposition et les cycles biogéochimiques.
- Micro- et mésofaune (nématodes, collemboles, acariens) fragmentant la litière et régulant les populations microbiennes.
- Macro-faune (vers de terre, insectes, myriapodes, mollusques, petits vertébrés) modelant la structure physique du sol.
- Racines et symbioses, notamment mycorhiziennes, organisant une rhizosphère active de flux de nutriments et de signaux.

Les organismes du sol comptent parmi les plus abondants et diversifiés de la planète : un gramme de sol forestier peut contenir plus d'un milliard de bactéries et près d'un million de champignons et protozoaires. Leur activité soutient quatre fonctions écosystémiques majeures : régulation du carbone et du climat, purification et cycle de l'eau, recyclage des nutriments et contrôle biologique des maladies.
La perturbation ou simplification du vivant souterrain (érosion, compaction, pollution, pratiques agricoles intensives) dégrade la structure, accélère les pertes de carbone et diminue la résilience écologique face aux stress climatiques. La conservation passe par la restauration de la

couverture végétale, le maintien de la matière organique et la promotion de pratiques agroécologiques favorisant la complexité du microbiome.
En milieu forestier, la préservation du sol garantit la stabilité des cycles de décomposition, le stockage du carbone et la régulation hydrique. Or, la protection des sols reste peu intégrée dans les cadres juridiques actuels : elle dépend surtout d'objectifs non contraignants, laissant la biodiversité souterraine — notamment la mycoflore — sans véritable reconnaissance ni protection légale.

La mycoflore tellurique peut être étudiée par :

- Metabarcoding : le metabarcoding implique l'amplification d'une région génique spécifique à partir de multiples organismes dans un échantillon d'ADNe, utilisant des amorces d'amplification plus ou moins génériques via PCR, puis le séquençage de ces fragments ciblés, courts
- Métagénomique : la métagénomique consiste à fragmenter tous les ADN présents dans un échantillon en courts fragments et à en séquencer la totalité grâce à un séquenceur haut débit (« shotgun sequencing »), sans amplification PCR préalable. Les séquences sont ensuite ré-assemblées en génomes complets ou partiels via des pipelines bio-informatiques. Cette méthode coûteuse et requérant des outils bio-informatiques lourds offre des avantages : vision simultanée de la composition taxonomique et du potentiel fonctionnel (réservoir de gènes, familles enzymatiques, etc.), possibilité de détecter des lignées fongiques sans marqueurs spécifiques.

Ces études mettent en évidence de potentielles nouvelles espèces fongiques cryptiques. Se pose la question : doit-on considérer ces unités taxonomiques comme de vraies espèces ? Les identifications fongiques par métabarcoding/métagénomique peuvent être acceptées pour des études de biodiversité générale et de composition de communautés, mais ne peuvent être considérées comme des espèces à part entière. L'utilisation des unités taxonomiques opérationnelles moléculaires reste suffisante pour des analyses et comparaisons écologiques. Cela fait l'objet de débats.

Les champignons du sol jouent un rôle essentiel dans la biodiversité terrestre, notamment en assurant des fonctions clés comme le recyclage des nutriments, la structuration des sols et les symbioses mycorhiziennes. Leur diversité, généralement invisible à l'œil nu, est cruciale pour la fertilité des sols, la biodiversité végétale et la résilience face aux perturbations climatiques. En prenant une densité apparente de sol de 1,3 g/cm³, une profondeur d'exploration de 20 cm et une longueur moyenne autour de 100–200 m d'hyphes/g, on obtient des réseaux de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres par m², soit des centaines de millions de kilomètres par hectare.
Les hyphes sont des filaments microscopiques, de quelques micromètres de diamètre seulement. Leur finesse leur permet d'explorer des pores très petits, bien au-delà de ce que les racines ou même les poils absorbants peuvent atteindre. C'est ce réseau diffus qui assure la majeure partie de l'absorption locale de nutriments et d'eau. Chez de nombreux champignons, une partie de ces hyphes peut s'agréger en faisceaux parallèles, ce qui donne des cordons mycéliens, parfois de couleur foncée, pouvant atteindre quelques millimètres d'épaisseur. Ces cordons servent souvent au transport de nutriments sur distance, un peu comme des « câbles » reliant différentes zones colonisées. Enfin, certaines espèces (par exemple *Armillaria*, *Serpula lacrymans*, *Megacollybia platyphylla*, *Coprinopsis strossmayeri*, *Marasmius rotula*, *Agrocybe praecox*) produisent des rhizomorphes, véritables structures cordiformes et robustes, très nettement plus épaisses que les hyphes simples. Elles ont une organisation interne différenciée, avec des hyphes centrales conductrices et une sorte d'« écorce » périphérique pigmentée. Certains champignons mycorhiziens ecto- ou ectendo-mycorhiziens peuvent aussi former des rhizomorphes, ce qui renforce leur capacité à connecter différentes racines d'un même arbre ou de plusieurs arbres voisins. Ces rhizomorphes fonctionnent comme de véritables organes de conduction et de propagation à distance, capables de relier entre elles des zones de ressources éloignées. Cet

ensemble est dynamique : des hyphes meurent et se lysent, d'autres se développent par croissance apicale, explorant le sol dans toutes les directions. Un champignon peut produire jusqu'à un kilomètre de nouvelles hyphes par jour.

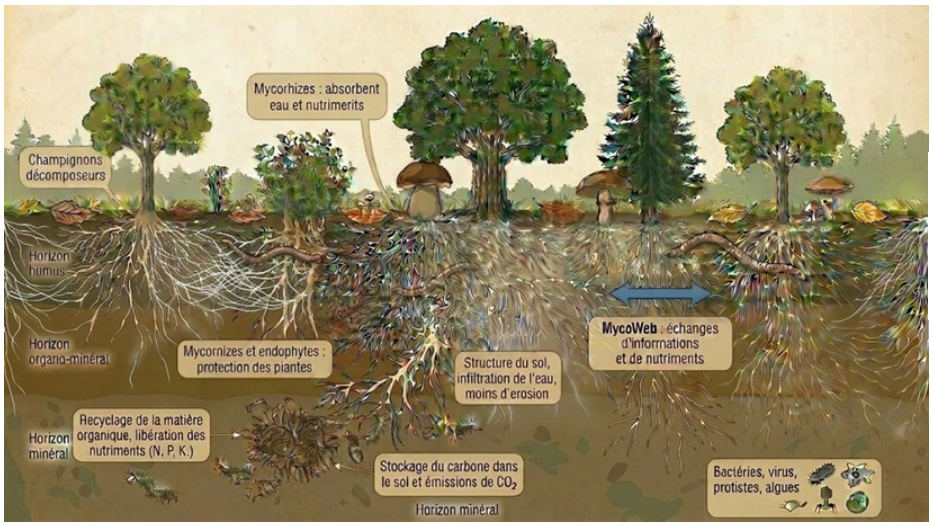

Figure 4 : rôle des champignons dans le sol (Perplexity)

Depuis 2015, le métabarcoding - et de plus en plus la métagénomique fongique des sols - s'est développé en France grâce au réseau RMQS et à l'équipe BIOCOM d'INRAE Dijon, avec pour objectif de surveiller les sols français via le programme RMQS-Biodiversité et AgroEcoSol. En 2024 a été publié l'Atlas français des champignons du sol, première cartographie nationale complète de la diversité fongique souterraine.
Par ailleurs, le programme MétaMyco, lancé par l'ONF et l'école PURPAN, vise à cartographier les champignons des sols forestiers en utilisant l'e-ADN (ADN environmental). Ce projet, limité aux forêts domaniales, cherche à établir un état de référence de la biodiversité fongique dans des zones peu perturbées. En Alsace, bien que des institutions comme le LVBE et GenomEast soient impliquées, aucune étude métagénomique exhaustive sur les champignons des sols (hors vignoble) n'a encore été publiée.

Les stratégies de vie

Tous les champignons utilisent des enzymes extracellulaires pour décomposer la matière organique avant de l'absorber.
Ils sécrètent en grande quantité des enzymes extracellulaires très diverses (cellulases, hémicellulases, laccases, chitinases, protéases, lipases, amylases…), capables de catalyser des réactions complexes avec une grande spécificité et efficacité. Leur mode de vie varie entre saprotrophes, endophytes, parasites, mycorhiziens et lichéniques, avec des transitions possibles entre ces catégories selon les conditions environnementales. La diversité génétique des champignons, au sein même d'une espèce, influence leurs capacités enzymatiques et leurs interactions avec l'environnement

Saprotrophes : Ils décomposent la matière organique morte (bois, feuilles, cadavres) grâce à des enzymes, jouant un rôle clé dans le recyclage des nutriments et la formation de l'humus. Exemples : Agaricus campestris, Trametes versicolor, Pleurotus ostreatus. Certains sont caractéristiques d'un substrat particulier tels les coprophiles (Coprinopsis cinerea, Panaeolus papilionaceus) ou les carbonicoles (Geopyxis carbonaria, Pholiota carbonicola).

Endophytes : Ces champignons vivent à l'intérieur des tissus végétaux sans provoquer de symptômes visibles. Ils peuvent être mutualistes, aidant les plantes à mieux s'adapter à leur

environnement en produisant des molécules bénéfiques. Ils peuvent aussi devenir pathogènes en situation de stress. Exemples : Piriformospora indica, Epichloë spp.

Parasites : Ils vivent aux dépens d'un hôte vivant, provoquant des maladies. Ils peuvent être biotrophes (hôte vivant), nécrotrophes (hôte tué), ou hémibiotrophes (combinaison des deux). Ils utilisent des enzymes et divers effecteurs pour coloniser les tissus de l'hôte et détourner ses nutriments. Exemples : Armillaria mellea, Heterobasidion annosum. La majorité des pathogènes fongiques des plantes ont une gamme d'hôtes restreinte à quelques genres ou familles végétales.

Symbiotique (mycorhizien et lichénique) : Les associations mycorhiziennes relient étroitement champignons et plantes, permettant des échanges mutuels de bénéfices : les champignons fournissent eau et minéraux aux racines en échange de sucres produits par la photosynthèse. Ils assurent la transmission de signaux, protègent les plantes, structurent le sol. Près de 90 % des plantes vivent en symbiose avec des mycorhizes. En osant la métaphore « Terre = corps humain », le réseau mycorhizien agit comme un système nerveux (transmission de signaux biochimiques), circulatoire (distribution de nutriments et d'eau), immunitaire (protection contre les pathogènes et stress environnementaux), et conjonctif (structuration et stabilisation du sol). Il assure une continuité fonctionnelle à grande échelle, reliant les végétaux dans divers écosystèmes.

Les mycorhizes

Biologie

Les mycorhizes jouent un rôle crucial dans la nutrition, la santé, la résilience des plantes, la structuration du sol, et la régulation des écosystèmes forestiers et agricoles. Pour un mètre de racines on peut avoir d'un à dix kilomètres d'hyphes, tant en forêt qu'en prairie naturelle.

La formation de mycorhizes débute par un dialogue chimique entre racines et champignons, impliquant des molécules comme les strigolactones et les signaux Myc (LCO/CO). Ce dialogue favorise la croissance du mycélium vers la racine, puis l'établissement de structures spécifiques - manteau et réseau de Hartig pour les ectomycorhizes (EcM), ou arbuscules intracellulaires pour les endomycorhizes arbusculaires (AM).

Un même champignon peut connecter plusieurs arbres, formant un réseau communautaire fongique facilitant le transfert de ressources et de signaux de défense entre plantes. Divers champignons peuvent être reliés à une espèce d'arbres.

Ectomycorhizes (EcM)

Structure et taxonomie

Les EcM forment un manteau d'hyphes autour des racines et un réseau de Hartig entre les cellules corticales. Le champignon reste entièrement extracellulaire. Elles impliquent des Basidiomycètes et Ascomycètes à carpophore (bolets, amanites, truffes…), associés aux arbres ligneux des zones tempérées et boréales (hêtres, chênes, pins, épicéas, etc.). Les champignons ectomycorhiziens offrent un exemple saisissant de convergence : le passage au mode de vie symbiotique s'est produit de façon indépendante dans de nombreuses lignées de Basidiomycètes et d'Ascomycètes, avec à chaque fois les mêmes remaniements génomiques — perte des gènes de dégradation de la paroi végétale, réorientation de transporteurs membranaires, acquisition de nouveaux gènes de signalisation. Les contraintes écologiques similaires ont ainsi conduit à des solutions évolutives parallèles sur plus de cent millions d'années.

Nutrition et sols pauvres

Les hyphes explorent un volume de sol bien supérieur aux racines fines et mobilisent azote et phosphore depuis la matière organique complexe (litière, humus). Elles permettent à l'arbre d'accéder à des formes d'azote organique inaccessibles aux racines seules — avantage décisif en sols acides et pauvres.

Cycle du carbone et séquestration

En ralentissant la décomposition et en immobilisant l'azote dans la biomasse fongique, les EcM favorisent le stockage de carbone dans les sols forestiers, renforçant ainsi le rôle de puits de carbone des forêts tempérées.

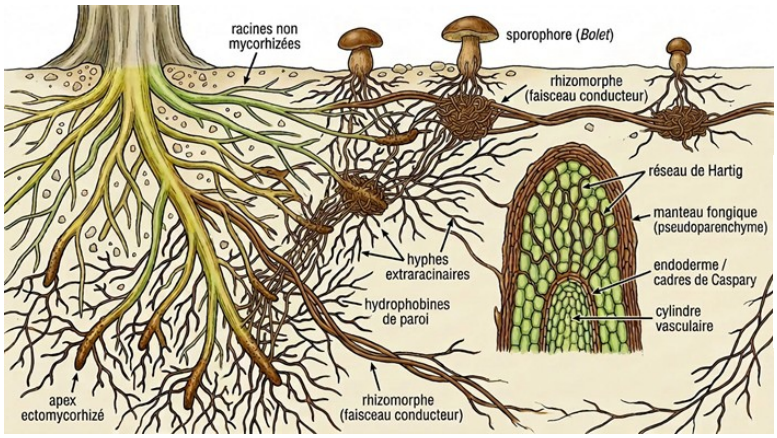

Figure 5 :
schéma d'ectomycorhizes (en beige-brun les champignons et leurs hyphes) (Perplexity)

Résistance hydrique et protection : Le réseau d'hyphes améliore la conductivité hydrique, tamponnant les épisodes de sécheresse, notamment chez les jeunes plants. Le manteau mycorhizien constitue également une barrière contre les pathogènes (Phytophthora, Heterobasidion, nématodes), certaines espèces produisant en plus des métabolites antifongiques.

Réseaux mycorhiziens et résilience : Les EcM relient plusieurs arbres — parfois d'espèces différentes — en réseaux mycéliens communs facilitant les transferts de C, N, P et de signaux de défense. Ces réseaux favorisent l'installation des semis et augmentent la résilience des peuplements face aux stress (sécheresse, insectes).

Structure du sol : Les matrices exopolymériques (polysaccharides, glycoprotéines) excrétées par les hyphes stabilisent les agrégats du sol, retiennent eau et nutriments et protègent la biomasse microbienne, contribuant à la formation de carbone persistant.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (MA)

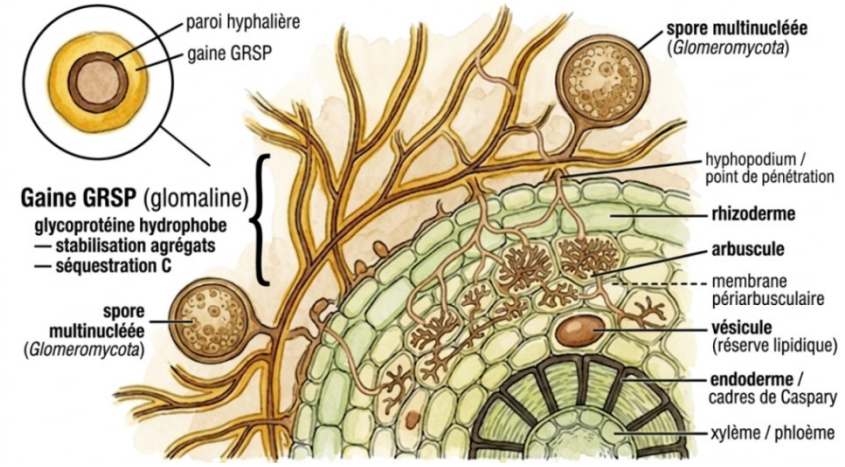

Figure 6 :
schéma d'une endomycorhize arbusculaire (en beige-brun le champignon et ses hyphes) (Perplexity)

Les MA représentent la forme la plus ancienne de symbiose mycorhizienne et ont joué un rôle clé dans la colonisation terrestre par les plantes. Le partenaire fongique appartient aux Glomeromycètes — champignons microscopiques, souterrains, à mycélium coénocytique — et se reproduit par sporulation asexuée via de grandes glomérospores multinucléées (80–500 µm, parfois jusqu'à 1 mm), parfois en amas, associées à des hyphes fertiles extraracinaires dans le sol. Leur caractéristique structurale majeure est la formation d'arbuscules, structures intracellulaires ramifiées à l'intérieur des racines. On a découvert les glomémomycètes au milieu du XIXe siècle grâce aux les frères Tulasne et la mycorhization à la fin de ce même siècle (A.B. Frank). La reconnaissance explicite de leur rôle capital dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres ne se généralise qu'à partir des années 1970-1980, puis avec la vague mycorhizienne des années 1990-2000. Les glomémomycètes sont strictement biotrophes obligatoires : ils colonisent le cortex racinaire de la plupart des plantes terrestres en formant des arbuscules intracellulaires spécialisés dans l'échange de nutriments. Ils forment, sur des hyphes extérieures à la plante, des spores multinucléées de grande taille, à paroi multiple et épaisse, riches en réserves lipidiques et résistantes. Leur génome se caractérise par la perte de gènes clés de biosynthèse de certains acides gras et de la thiamine, ce qui les rend auxotrophes pour ces métabolites et dépendants des sucres et lipides fournis par la plante à l'interface symbiotique. Ils présentent en parallèle un répertoire réduit d'enzymes de dégradation des parois végétales et un enrichissement en transporteurs membranaires ainsi qu'en petites protéines impliquées dans le transfert de nutriments et la modulation des défenses de l'hôte.

Avec 400 espèces validées actuellement, les Glomeromycota colonisent environ 72 % des plantes vasculaires terrestres (plus de 400 000 espèces), toutes familles confondues — des Poaceae aux Fabaceae, des fougères aux plantes à fleurs — dont la plupart des plantes prairiales, plantes cultivées, la plupart des arbres tropicaux et certains arbres de régions tempérées (érables, frênes, ormes, aubépines, rosacées ligneuses). Aucune espèce de Glomeromycota n'est strictement inféodée à une seule espèce végétale.

Rôles agronomiques et écologiques majeurs :

- Absorption améliorée du phosphore, de l'azote et des oligo-éléments grâce à un réseau d'hyphes étendant le volume de sol exploré
- Tolérance accrue à la sécheresse (jusqu'à +49 % de croissance sous stress hydrique)
- En agriculture : réduction potentielle d'1/3 à 1/4 des apports en engrais minéraux
- Résistance renforcée aux pathogènes racinaires, nématodes et polluants
- Influence sur les propriétés qualitatives des plantes (ex. goût des fraises)

Un stabilisateur des sols : la glomaline : "colle du sol" Glycoprotéine exclusive des MA, la glomaline, hydrophobe et très résistante à la chaleur, stabilise les agrégats du sol, améliore sa porosité et contribue à sa fertilité à long terme en se cimentant aux particules minérales et à la matière organique. Les engrais et pesticides réduisent drastiquement le nombre d'espèces de glomémomycètes dans un sol et leur quantité, rendant le sol plus friable. Ce sol poussiéreux peut alors être emporté par le vent.

Répartition géographique

Elles dominent dans les zones équatoriales, tropicales et subtropicales humides, où les arbres ectomycorhiziens représentent souvent moins de 10 % de la canopée.

La nature se montre plus complexe que nos pensées simplificatrices. Ecto- et endomycorhizes ne s'exluent pas nécessairement. La dualité mycorhizienne désigne le fait qu'un même arbre ou

arbuste puisse être colonisé à la fois par des champignons arbusculaires (Glomeromycotina) et par des ectomycorhiziens, ce qui lui permet d'exploiter des formes de nutriments et des horizons de sol complémentaires, d'augmenter sa tolérance aux stress et d'élargir sa niche écologique. C'est le cas, par exemple, de plusieurs espèces de peupliers (certains *Populus trichocarpa* et *P.* tremuloides), d'aulnes (*Alnus glutinosa*) et de frênes (*Fraxinus excelsior*).

Autres types de mycorhizes dont :

- Mycorhizes d'orchidées, indispensables à leur germination, impliquant des Basidiomycètes ou Ascomycètes
- Mycorhizes éricoïdes, associant des plantes comme les bruyères et myrtilles à des Ascomycètes ou Basidiomycètes, formant des pelotons intracellulaires dans des racines très fines.

Les lichens

Un lichen est une association entre un champignon et une algue ou une cyanobactérie. L'algue ou la cyanobactérie produit des sucres grâce à la photosynthèse, tandis que le champignon offre protection et structure. Les lichens jouent un rôle clé en colonisant les roches et les sols nus, contribuant à leur formation. Certains lichens à cyanobactéries fixent l'azote atmosphérique, enrichissant les écosystèmes pauvres. Ils sont essentiels à la biodiversité en tant que source de nourriture (ex. *Cladonia* pour les rennes) et habitat pour des micro-organismes. Ils servent aussi de bioindicateurs de la qualité de l'air, car leur présence diminue en cas de pollution. Ex : *Parmelia sulcata* (algue *Trebouxia*), *Xanthoria parietina* (algue *Trebouxia*) et *Peltigera* (cyanobactéries *Nostoc*, fixant l'azote).

Des mycoflores mal traitées, exemple du Bollenberg

Le Bollenberg, joyau alsacien, est une colline calcaire très sèche d'environ 100 ha dont 40 à 50 pour cent en pelouses naturelles, le reste étant principalement de la vigne. À l'intérieur, la réserve naturelle régionale des collines de Rouffach, qui protège la majeure partie des pelouses sèches autour du Bollenberg, couvre 44 hectares, correspondant aux secteurs les plus riches et les plus sensibles (Xerobrometum en un seul tenant). Ces pelouses sont naturellement très pauvres, sèches, à sol mince, à biodiversité remarquable. Le microclimat y est xérique : effet de foehn, seulement 400–500 mm de pluie par an. Les sols sont calcaires superficiels : couche de terre très mince sur substrat rocheux, faible réserve en eau et en nutriments, donc très peu de capacité de résilience après tassement, érosion ou enrichissement excessif. Environ 200 espèces botaniques rares ou menacées sont recensées sur cette colline. On y trouve aussi des champignons rares. C'est un tout en équilibre qui peut être vite déstabilisé. Si les plantes rares ou menacées, par exemple des orchidées (*Ophrys, Anacamptis, Himantoglossum*, etc.) et leurs aires de croissance sont officiellement protégées, il n'en va pas de même pour les champignons, comme noté dans le paragraphe « biodiversité ». Certes, certains champignons se trouvent sur une liste rouge, mais aucun écosystème, même riche en mycètes exceptionnels, n'est protégé en fonction de sa mycoflore. On a oublié les champignons, alors qu'ils sont essentiels.

On peut hélas l'observer au niveau local, par exemple sur cette colline du Bollenberg. C'est une perle alsacienne, comme le soulignèrent divers naturalistes et mycologues, dont Paul Hertzog et Daniel Doll. Une association de défense de la nature y laisse paître beaucoup d'ovins, pour éviter que la pelouse calcaire sèche ne se referme (broussailles, bois), pour maintenir une structure ouverte et essayer de conserver sa flore spécialisée, dont des orchidées rares. Certes, le nombre d'ovins demeure dans les limites des recommandations, mais ils sont abondants, et leur regroupement nocturne dans l'enclos concentre piétinement et apports azotés. Les effets sont

dramatiques sur la mycoflore : l'eutrophisation réduit la diversité et l'abondance des champignons mycorhiziens, modifie la composition des communautés fongiques, avec le risque inéluctable de voir disparaître des espèces rares (*Floccularia luteovirens, Entoloma pulvereum, E. politoflavipes, E. carneogriseum, E. fridolfingense, Pleurotus eryngii*) au profit d'espèces banales. Toutes les orchidées vivent en symbiose obligatoire avec des champignons, surtout des Basidiomycètes « rhizoctonoïdes ». Les champignons mycorhiziens, y compris ceux associés aux orchidées, sont affectés, car sensibles à l'eutrophisation et au tassement du sol, et peuvent disparaître.



Fig. 7 : *Entoloma fridolfingense* et *Floccularia luteovirens* (photos J.L. Muller)

Et à long terme, une flore spécialisée de pelouse calcaire sèche (surtout les orchidées rares) ne se maintient pas sous un tel pâturage ovin perturbateur. Certes, il faut maintenir une végétation basse pour les espèces rares héliotrophes, encore faut-il prendre en considération les autres exigences de cette flore et de celles de la mycoflore. Le milieu doit rester oligotrope. Il faut se limiter à un pâturage vraiment extensif et contrôlé, plus une fauche tardive avec exportation de la biomasse, pour respecter plantes et champignons. Les fumures enrichissent les sols en azote et en phosphore, reconfigurent en profondeur les communautés fongiques et végétales, et transforment ainsi durablement le fonctionnement de l'écosystème. Des expériences ont prouvé l'effet négatif de supplément d'azote sur les champignons mycorhiziens. La solution ne passe pas par la sanctuarisation de zones dans lesquelles ont été observées des orchidées ou des champignons rares mais exige un respect de l'ensemble de l'écosystème. Un écosystème, ce n'est pas une addition de points où l'on coche "espèce présente / espèce absente", c'est un ensemble de relations qui lient sols, flore, mycoflore, microclimat, pâturage, continuité spatiale, dynamiques de populations, etc. La situation n'a pas changé malgré des interventions répétées et argumentées de membres éminents de la S.M.H.R. Symptomatique : le site alsacien RNR ne mentionne aucun mycète, toutefois deux lichens !

Mycoflore et survie

Protéger la mycoflore, c'est protéger les conditions mêmes de notre propre survie. Sans les mycologues de terrain, sans les associations qui, année après année, explorent, identifient, documentent, éduquent et transmettent, la mycoflore resterait invisibilisée. Sans reconnaissance de ce savoir et de ces acteurs, aucune politique sérieuse de protection des champignons n'est possible.

Les champignons, pilier du vivant ignoré par le droit. Les champignons assurent des fonctions écosystémiques irremplaçables — décomposition, fertilité des sols, symbioses mycorhiziennes, régulation des cycles du carbone et de l'azote. Pourtant, le Code de l'environnement français les exclut intégralement des espèces protégées, comme si le règne fongique n'existait pas. Cette invisibilité juridique bloque toute politique de conservation sérieuse.



Fig. 8: les oubliés

Les réseaux mycorhiziens sont un bien public mondial en péril. Les réseaux mycéliens représentent un tiers à la moitié de la masse vivante des sols et constituent un puits de carbone mondial majeur. Ils assurent la nutrition minérale des plantes, la résistance au stress, les transferts d'énergie et de signaux entre végétaux. Leur destruction — par les coupes rases, les monocultures, les dépôts azotés, les pesticides et le changement climatique — compromet directement la résilience des forêts et des agroécosystèmes. Selon les projections actuelles, plus de 90 % des sols seront dégradés d'ici 2050.

Les changements d'usage forestier (coupes rases, rajeunissement systématique, plantations monospécifiques), les dépôts azotés agricoles, le changement climatique (assèchement, réduction du couvert nival) et l'intensification agricole dégradent la diversité et les fonctions des communautés fongiques. Les champignons mycorhiziens à arbuscules — essentiels à la nutrition des plantes cultivées — sont particulièrement touchés par l'intensification.

Trois exigences, au moins, sont à défendre : reconnaître les champignons comme composante à part entière du patrimoine naturel à protéger, reconnaître les mycologues de terrain et leurs associations comme partenaires institutionnels indispensables, et doter la mycologie de conservation des moyens à la hauteur des enjeux. Aucune technologie ne peut reconstituer des réseaux d'interactions fongiques détruits ; la priorité est donc la protection des milieux existants, la limitation de l'artificialisation et la restauration là où c'est encore possible.

Le scientifique amateur et les plateformes mycologiques

En France, le suivi de la biodiversité fongique repose sur des taxonomistes professionnels, mais les financements publics insuffisants et le manque de spécialistes formés limitent ces efforts. La science citoyenne, impliquant des amateurs, joue un rôle crucial dans la collecte de données, notamment via des plateformes comme MycoDB.fr et FongiFrance.

MycoDB.fr est une base collaborative qui regroupe des fiches détaillées sur les espèces de champignons, leurs caractéristiques, habitats et localisations. **FongiFrance**, soutenue par l'association AdoniF et la Société Mycologique de France, alimente le Système d'Information du Patrimoine Naturel (SINP).

Le projet « **Funif-Col** » (2023-2026) vise à produire des codes-barres génétiques pour environ 3 000 espèces de macromycètes décrites en France, en impliquant des mycologues amateurs pour collecter des échantillons. Ces séquences seront déposées dans des bases de données internationales pour améliorer la fiabilité des identifications.

Enfin, des initiatives dans les réserves naturelles et sites Natura 2000 cherchent à préserver les habitats favorables aux champignons en gérant les écosystèmes de manière durable. Des réseaux comme JoNeF travaillent à intégrer les champignons dans les politiques de conservation européennes. Le rôle des scientifiques amateurs est essentiel, mais leur contribution demande un travail rigoureux et est chronophage.

Projets internationaux de protection

Le réseau **JoNeF** (Joint Network for Wild Fungi), lancé en 2023 avec la participation de 21 pays européens, a publié en 2024 un document de recommandations pour intégrer les macromycètes dans les législations, le monitoring et les décisions européennes. Son objectif principal est de créer un Réseau Européen de Monitoring des Fungi avec des protocoles standardisés pour établir des checklists nationales, des tendances et des listes rouges comparables, en s'appuyant sur la CBD et le Cadre mondial de biodiversité de Kunming-Montréal.

En 2024, lors de la COP16, le Royaume-Uni et le Chili ont lancé le **Fungal Conservation Pledge**, signé par plus de 10 pays, pour reconnaître les champignons comme un règne indépendant et adopter des mesures de conservation. La Global Strategy for Fungal Conservation vise à intégrer ces engagements dans le cadre KMGBF, bien que les champignons soient encore peu représentés dans ses indicateurs. En 2025, le Congrès IUCN à Abu Dhabi a adopté une motion pour inclure les champignons et invertébrés dans les objectifs des aires protégées et élargir les évaluations IUCN à 23 500 espèces de fungi.

Cependant, peu de pays participent activement à ces initiatives.

SPUN

Toby Kiers, mycologue et biologiste de l’évolution, a fondé en 2021 la Société pour la protection des réseaux souterrains (SPUN) afin de cartographier les réseaux mycorhiziens à l’échelle mondiale. Ce projet utilise des données de séquençage d’ADN des sols et des modèles spatiaux pour créer des cartes haute résolution de la biodiversité des champignons mycorhiziens.

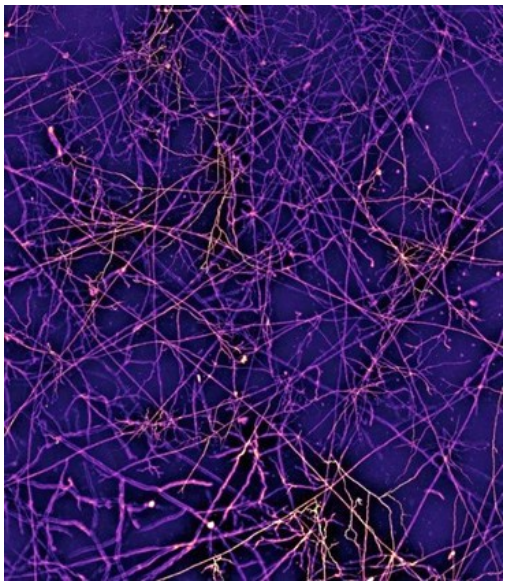

Figure 9 : réseau mycélien (SPUN)

En juillet 2025, SPUN publie le premier atlas mondial des réseaux souterrains, basé sur 2,8 milliards de séquences d’ADN, pour orienter la conservation, la restauration écologique et les pratiques agricoles. Les prairies abritent la plus forte densité d'hyphes AM sur Terre et cette densité est réduite d'environ 50 % dans les terres cultivées.

Les « hotspots » de biodiversité mycorhizienne ne coïncident pas toujours avec ceux des plantes, car ils répondent à des contraintes écologiques différentes. Des écosystèmes souterrains riches en champignons ont été identifiés dans les forêts boréales de Sibérie et du Canada, malgré une faible diversité végétale. Ces zones abritent jusqu’à 100 espèces de champignons sur de petites surfaces. La longueur totale des hyphes de champignons endomycorhiziques, qui ont des relations symbiotiques avec plus de 70 % des plantes, est estimée à 110 quadrillions de km ($1{,}10 \times 10^{17}$ km dans les 15 premiers centimètres des sols terrestres), d'un poids d'environ 300 mégatonnes. Les prairies abritent la plus forte densité

d'hyphes de champignons endomycorhiziques sur Terre et cette densité est réduite d'environ 50 % dans les terres cultivées. Les politiques de conservation doivent intégrer ces écosystèmes souterrains, car les zones prioritaires pour les champignons ne correspondent pas toujours à celles de la flore.

L'Atlas SPUN influence les priorités scientifiques et de conservation, mais aucune réforme des aires protégées basée sur cette carte n'a encore été mise en place.

Projets de mycosylvicultures

La mycosylviculture vise à promouvoir la diversité des essences ligneuses et des communautés fongiques pour renforcer la biodiversité et la résilience des forêts. Le projet Micosylva+ (2012), financé par Interreg SUDOE, a développé une stratégie commune pour valoriser les champignons forestiers comestibles et créer des forêts-pilotes en France, Espagne et Portugal. Malgré des avancées, la méconnaissance du rôle des champignons par les décideurs et l'absence de cadre économique stable limitent son adoption comme critère de gestion forestière. Un guide pratique a été publié en 2022 par le réseau Agroforesterie et des partenaires franco-italiens.

La trufficulture française connaît un essor, notamment en Alsace, où le potentiel truffier est réel pour plusieurs espèces (*Tuber melanosporum, T. aestivum/uncinatum*). Notre camarade de la S.M.H.R. Bernard Vonflie, trufficulteur haut-rhinois, est une figure clé de la relance trufficole régionale. Il préside l'association « Truffes d'Alsace » et promeut des pratiques agroécologiques. Le contrat de filière 2025-2027 met l'accent sur les truffes d'automne et partiellement sur *T. melanosporum*, en raison de sa résistance à la sécheresse.

Actions à mettre en œuvre

La protection des champignons repose principalement sur la préservation de leurs habitats et partenaires écologiques, ainsi que sur la réduction des émissions d'azote. Les milieux oligotrophes, comme les prairies à Hygrocybe et les forêts à ectomycorhizes, sont particulièrement sensibles à l'azote, même en faibles quantités. Des charges aussi faibles que 5–10 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ suffisent à appauvrir les ECM (ectomycorhizes) forestiers, et les prairies à champignons indicateurs réagissent rapidement à toute fertilisation même modérée. Les forêts, en raison de leur structure, interceptent davantage d'azote atmosphérique que les prairies, ce qui rend leur récupération lente après réduction des apports. La plupart des forêts européennes reçoivent aujourd'hui de l'ordre de 10–25 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ en dépôts totaux (sec + humide), avec des sites très préservés à moins de 5 kg et quelques hotspots à plus de 30 kg. On se trouve donc en situation dangereuse.

Les pratiques agricoles doivent évoluer pour réduire les intrants sans compromettre les rendements, mais les changements restent limités. Les politiques de conservation valorisent les prairies riches et extensives, mais la préservation des champignons n'est pas encore une priorité. La pression à la productivité entre souvent en conflit avec la protection des guildes fongiques sensibles.

Actions recommandées

En forêt : laisser du bois mort, conserver des arbres sénescents, pratiquer une sylviculture douce, éviter les fragmentations et délimiter des îlots de sénescence. En prairies : interdire la fertilisation minérale excessive, favoriser une utilisation raisonnée et ciblée des pesticides, éviter le surpâturage, maintenir un pâturage léger ou une coupe annuelle, et proscrire le labourage. En milieu agricole : revenir à des pratiques respectueuses, ici aussi interdire la fertilisation minérale excessive, favoriser une utilisation raisonnée et ciblée des pesticides, restaurer la mycoflore. En

zones humides et tourbières : maintenir le niveau de la nappe, lutter contre l'eutrophisation, et restaurer les tourbières dégradées. Autres écosystèmes (dunes, prairies alpines) : appliquer des mesures conservatoires. Enfin, il est essentiel de former des mycologues, soutenir la recherche, réaliser des inventaires standardisés, et participer à des réseaux de science citoyenne pour améliorer la connaissance et le suivi des champignons et les soutenir.

Effets du réchauffement climatique

Il est difficile de faire actuellement le bilan mais il est sûr que le changement climatique va modifier profondément la répartition des mycoflores, notamment en Europe occidentale. La figure 8 résume les impacts, en fait chaque aspect.



Figure 11

Impacts du changement climatique sur la mycoflore (d'après Mridu et Kuma).

La bascule EcM → AM, changement structurel central. Le réchauffement et les sécheresses appauvrissent d'abord les arbres hôtes ectomycorhiziens mésophiles (hêtre, épicéa, sapin, chênes), qui régressent aux marges chaudes et sèches de leurs aires. Ils cèdent progressivement la place à des feuillus pionniers ou xérophiles endomycorhiziens (érables, robiniers, sorbiers, aubépines). Ce changement d'assemblage forestier entraîne une reconfiguration profonde des communautés fongiques du sol : des réseaux EcM diversifiés, soutenant un fort stockage de carbone organique et une économie de l'azote organique, vers des réseaux AM plus généralistes associés à une décomposition plus rapide et un moindre stockage de C.

Groupe	Modifications sous changement climatique	Effets écosystémiques majeurs
EcM	Perte d'aires communes avec leurs hôtes ; communautés simplifiées ; réseaux moins connectés.	Moindre exploration du sol, résilience hydrique réduite, stockage de C du sol en baisse.
AM	Mutualisme globalement maintenu ou légèrement renforcé; rôle central en agriculture; diversité sensible aux précipitations	Nutrition P/N améliorée, tolérance à la sécheresse accrue, mais sols plus minéralisés et moins riches en C que sous EcM.
Saprotrophes	Décomposition accélérée quand l'eau ne manque pas; activité bloquée sous sécheresses ; guildes fonctionnelles réorganisées	CO_2 ↑) en conditions humides; modification qualitative de l'humus et des flux C/N.
Parasites/pathogènes	Aire et sévérité de nombreuses maladies augmentent; extension vers le nord/altitude ; émergence de nouveaux pathogènes et souches résistantes	Santé des forêts fragilisée, pertes de rendement agricoles accrues, risques sanitaires liés aux mycotoxines et infections humaines en hausse.

Tabeau 1 : modifications majeures de la mycoflore sous changement climatique

Les projections paneuropéennes évaluent à 35–50 % la part des associations arbre–EcM dont l'aire climatique commune diminuera, surtout pour les conifères et des Fagacées aux marges sud.

Des rétroactions climatiques négatives. L'accélération de la décomposition saprotrophe en conditions chaudes et humides libère davantage de CO_2, constituant une rétroaction positive sur le réchauffement. La bascule EcM → AM amplifie ce phénomène : en forêt EcM, la compétition mycorhizienne pour l'azote freinait la décomposition (effet Gadgil) ; avec le remplacement des arbres EcM, cette régulation disparaît et le carbone du sol diminue plus rapidement encore. À l'inverse, les sécheresses estivales prolongées paralysent l'activité saprotrophe et appauvrissent la diversité de ces communautés au profit d'espèces oligotrophes moins efficaces.

La montée des pathogènes, menace croisée. Les arbres affaiblis par le stress hydrique deviennent vulnérables aux champignons opportunistes : *Phytophthora spp., Armillaria spp., Heterobasidion annosum, Diplodia sapinea* qui étend son aire vers le nord. Des pathogènes allochtones *(Hymenoscyphus fraxineus, P. ramorum, P. plurivora*) atteignent des latitudes et altitudes jusqu'ici indemnes, menaçant des hôtes sans défenses co-évoluées. Plusieurs endophytes basculent vers le parasitisme (Botryosphaeriaceae, ascomycètes du bois) lorsque les défenses de l'arbre s'effondrent. Sur le plan sanitaire humain, le réchauffement favorise l'émergence et la thermotolérance de pathogènes comme *Candida auris* ou des souches résistantes *d'Aspergillus fumigatus*, ainsi que l'extension géographique des moisissures toxinogènes (*Fusarium spp., Aspergillus flavus*).

Des capacités d'adaptation limitées et incertaines. Certaines espèces pourraient répondre par plasticité phénotypique ou adaptation évolutive (tolérance thermique accrue), réduisant la nécessité de migrer. Mais le rythme actuel du changement climatique pourrait dépasser ces capacités. Les observations de terrain — phénologie décalée, disparitions locales, colonisations en altitude — font des champignons des indicateurs précoces des perturbations climatiques, et leurs relevés répétés par les mycologues de terrain constituent la base presque exclusive des Listes rouges et des études en réserves en France.

Implication pour la conservation : Il faudra également créer des conditions favorables à la dispersion et à l'adaptation des espèces — continuité des milieux, corridors forestiers, limitation des perturbations du sol — dans un contexte de reconfiguration rapide et profonde des communautés.

Conséquences du réchauffement climatique en Alsace

Les Vosges et le Jura alsacien, écosystèmes officiellement vulnérables. En janvier 2025, l'UICN, l'OFB et le CNRS ont publié la première liste rouge des écosystèmes de forêts de montagne françaises : tous les écosystèmes forestiers étudiés dans le massif vosgien et le Jura alsacien y figurent en catégorie vulnérable, en particulier les hêtraies-sapinières d'altitude. La stabilité de ces forêts dépend directement de la continuité des réseaux EcM associés aux hêtres, sapins et épicéas. Des projets pilotes de forêt-laboratoire sont en cours dans la vallée de Munster (Haut-Rhin) pour tester l'introduction progressive d'essences méridionales (châtaigniers, érables, pins laricios) en complément de la régénération naturelle.

Des effets directs et mesurables sur la mycoflore alsacienne. Les sécheresses provoquent un stress hydrique sévère du mycélium suivi, aux premières pluies automnales, d'une explosion de fructifications — phénomène décrit par D. Doll et interprété comme un signal d'alerte plutôt que de bonne santé. La destruction des pessières et sapinières entraîne la disparition locale des espèces EcM strictement inféodées aux Pinacées : *Suillus luteus, S. variegatus, Lactarius*

deliciosus, L. deterrimus, certains Cortinarius spécifiques aux épicéas. En parallèle, des espèces méridionales progressent vers le nord — l'Amanite des Césars (Amanita caesarea) est désormais récoltée plus fréquemment — constituant des signaux bio-indicateurs précieux pour suivre, espèce par espèce, la reconfiguration en cours de la mycoflore régionale.

Conclusion.

Les champignons forment un règne varié et complexe. Aucune espèce fongique ne peut être délimitée sur la base d'un critère unique : il est nécessaire de prendre en compte un ensemble de caractères morphologiques, génétiques, chimiques et écologiques. Les critères taxonomiques pertinents peuvent varier d'un groupe à l'autre. La taxonomie fongique fondée sur l'ADN ne se contente pas de décrire les champignons : elle impose au vivant un découpage façonné par nos instruments, nos seuils et nos choix, au risque de prendre nos propres manipulations pour l'ordre "naturel". Les caractères morphologiques et écologiques restent « capitaux » au sens où ils demeurent indispensables pour décrire, diagnostiquer, contextualiser et interpréter des entités biologiques. De nombreuses espèces restent à découvrir, en particulier dans les zones tropicales.

Sans la mycoflore du sol, les forêts, les prairies et même les cultures agricoles ne pourraient pas fonctionner. La diversité fongique est le conducteur caché de nombreux services écosystémiques : productivité végétale, recyclage du carbone et des nutriments, filtration de l'eau, régulation des maladies, structuration des sols. Hélas, la mycoflore est peu reconnue et encore moins protégée. C'est dramatique, certes il y a des appels, divers projets, mais pas d'action concrète suffisante au niveau des instances gouvernementales. Ce cri n'est pas celui d'un doux rêveur romantique mais d'un citoyen-mycologue se rendant compte qu'en ne protégeant pas la mycoflore, on va à la catastrophe. Les défis majeurs en mycologie environnementale se cristallisent autour de quelques axes récurrents : sous-connaissance massive de la diversité, changement global (climat, usages, pollution), érosion des symbioses clés pour le fonctionnement des forêts, et grande difficulté à faire entrer les champignons dans les politiques et dispositifs de conservation. Quel que soit l'écosystème, les deux grandes menaces directes restent les mêmes : l'eutrophisation azotée et la destruction ou homogénéisation physique de l'habitat. La règle d'or est de préserver la pauvreté en nutriments du sol et la diversité structurale du milieu. La biodiversité fongique constitue un réservoir de ressources pour l'avenir. Cependant, cette diversité est menacée par la destruction des habitats, ce qui entraîne la disparition d'espèces et une perte de biodiversité en général. Protéger la biodiversité ne peut pas se limiter à ce que l'on voit en surface : il faut aussi veiller à la richesse du « peuple fongique » qui vit sous nos pieds. À ce sujet, le programme SPUN constitue un soutien nécessaire. On se trouve de plus en plus devant les conséquences marquées du changement climatique qui vont s'amplifier. Des observations approfondies sont requises en fonction du réchauffement climatique et des changements qu'il induit. Des actions nationales et internationales ont été récemment lancées. Puissent-elles se réaliser et avoir des effets positifs pour la protection de la mycoflore. Le chemin reste considérable.

À force de marches lentes, de rencontres avec les champignons dans leurs milieux et de relevés minutieux, le mycologue de terrain révèle une part essentielle de la biodiversité, souvent ignorée parce que discrète et éphémère. En nommant, décrivant et essayant de comprendre ces organismes, en mettant en évidence des écosystèmes, il participe à tisser le lien entre la forêt et la science, entre la richesse des sols et notre capacité à la protéger. Rendre hommage au mycologue de terrain, c'est reconnaître que la connaissance patiente du monde fongique est une des clés pour célébrer et défendre la diversité du vivant. C'est rappeler que la connaissance de la nature ne se construit pas seulement dans les laboratoires, mais aussi, et peut-être d'abord, les

pieds dans la boue, à l'écoute des saisons. Il faut aussi saluer le rôle de passeur de savoirs entre les générations. Patience, prudence dans les déterminations, goût du doute, refus de la solution trop rapide. Apprendre à se laisser surprendre, à accepter que la nature ne rentre pas toujours dans les cadres prévus, à trouver dans la complexité des champignons non pas de la frustration, mais une source inépuisable de curiosité. Grâce à lui, la taxonomie moderne reste ancrée dans le concret. La mycologie classique est une connaissance acquise pas à pas. Être mycologue, c'est faire partie d'un groupe d'hommes. Le mycologue de terrain est un homme de la Nature qui la respecte et la protège. L'action du mycologue de terrain se montre indispensable dans ces temps de réchauffement climatique. La biodiversité fongique est à la fois un reflet de la biodiversité globale et un pilier qui la soutient : lorsqu'elle s'appauvrit, c'est tout l'édifice de la biodiversité et des fonctions des écosystèmes qui devient plus fragile. La biodiversité ne peut pas se limiter à ce que l'on voit en surface : il faut aussi veiller à la richesse du « peuple fongique » qui vit sous nos pieds. Préserver la biodiversité, c'est protéger les conditions mêmes de notre vie et de celle de toutes les autres espèces.

Remerciements

Je remercie Daniel Doll et Jean-Luc Muller pour leur lecture critique, Daniel Doll pour les informations sur le Bollenberg et sur l'écomusée, Jean-Luc Muller pour les photographies, Claude Bouvet pour son aquarelle et Bernard Diss pour son soutien. Et saluer une nouvelle fois tous les membres qui font vivre la S.M.H.R. et ceux des autres sociétés mycologiques en France, Allemagne, Suisse. Que tous les chercheurs, professionnels ou amateurs, soient encouragés !

Sources

Les informations soutenant cette publication ont été recherchées avec Academia.edu, Google Scholar, Perplexity, ResearchGate.

Références

Adonif et FongiFrance. (2022, 15 novembre). Fongifrance : tous concernés par la protection des champignons. Champignon Magazine. https://champignonmagazine.fr

Akter, S., Mahmud, U., Shoumik, B. A. A., & Khan, M. Z. (2025). Although invisible, fungi are recognized as the engines of a microbial powerhouse that drives soil ecosystem services. Archives of Microbiology 207: 79.

Bakaitis, B. (2025). Diagnosis at a distance: The challenges involved in mushroom identification. Topics in Cognitive Science.

Baptist, F., Cotillon, S., Hellal, J., Limasset, E., Anglada, C., et Benzekri, S. (2021). Approches moléculaires proposées pour caractériser les fonctions écologiques microbiennes du sol dans le cadre d'une réhabilitation écologique (Thèse de doctorat, RECORD).

Blanchart, E., et Trap, J. (2020). Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. Étude et Gestion des Sols 27 : 121.

Cao B, Haelewaters D, Schoutteten N, et al. (2021). Delimiting species in Basidiomycota: a review. Fungal Diversity 109:181.

Case, N.T., Gurr, S.J., Fisher, M.C. et al. (2025) Fungal impacts on Earth's ecosystems. Nature 638: 49.

Cazabonne, J. (2021). The use of human senses in the identification of mushrooms. Field Mycology, 22 : 117.

Chiron, N., et Michelot, D. (2005). Odeurs des champignons: chimie et rôle dans les interactions biotiques-une revue. Cryptogamie-Mycologie, 26:299.

Cunningham, J. A., Padamsee, M., Wilson, S., and Costello, M. J. (2024). Fungi species description rates confirm high global diversity and suggest half remain unnamed. Frontiers of Biogeography, 16.

Djemiel C., Terrat S., Dequiedt S., Jolivet C., Maron P.-A. et Ranjard L. (2024) Atlas français des champignons du sol. Biotope, Mèze ; Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 304 p. (Hors collection, 49).

Doll, D. (2023) La folle arrière-saison 2022 en Centre-Alsace . Bull. S.M.H.R. 35 : 62.

Doll, D. (2024) Mars 2024 en Centre-Alsace : un concentré inhabituel de fonge printanière. Bull. S.M.H.R. 36: 42.

Ellis, C. J., Asplund, J., Benesperi, R.,et al. (2021). Functional traits in lichen ecology: A review of challenge and opportunity. Microorganisms 9: 766.

Emberger, C., Vinot-Gosselin, M., Dumas, Y., et al. (2023). Synthèse bibliographique: impacts de pratiques de gestion sur la biodiversité des sols.

https://arbrisseau.projet-agroforesterie.net/docs/truffes_arbrisseau_web.pdf

Eyssartier, G., et Roux, P. (2024). Guide des champignons. Belin Éditeur.

Fernandez, C. W., Mielke, L., Stefanski, A., et al. (2023). Climate change–induced stress disrupts ectomycorrhizal interaction networks at the boreal–temperate ecotone. Proceedings of the National Academy of Sciences 120: e2221619120.

Frey, S.D. (2019) Mycorrhizal Fungi as Mediators of Soil Organic Matter Dynamics. Annual Review Ecology, Evolution, and Systematics. 50:237.

Gautier M, Moreau PA, Boury B, Richard F. (2022) Unravelling the French National Fungal Database: Geography, Temporality, Taxonomy and Ecology of the Recorded Diversity. J Fungi (Basel) 8: 926.

Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M. N., van Tuinen, D., Redecker, D., and Wipf, D. (2010). Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. Mycorrhiza 20 : 519.

Giraud, T. (2026) La biodiversité en infographies. Tania Editions.

Hackel, J., Henkel, T.W., Moreau, P.-A., et al. (2022), Biogeographic history of a large clade of ectomycorrhizal fungi, the Russulaceae, in the Neotropics and adjacent regions. New Phytol. 236: 698.

Han, X., Doménech-Pascual, A., Donhauser, J., et al. (2025) A Fungal Diversity and Network Complexity Sustain Soil Multifunctionality Across Europe. Swiss Federal Institute for Forest.

Hertzog, P. (2008) Le Bollenberg. Bull. S.M.H.R.25: 53.

Hong L, Wang Q, Zhang J, et al. (2024) Advances in the beneficial endophytic fungi for the growth and health of woody plants. For Res (Fayettev) 4:e028.

https://www.inrae.fr/actualites/champignons-forets-quels-sont-travaux-dinrae

Kainat, Mujtaba, M., Wang, Y., & Zhou, B. (2025). Effectors of plants pathogenic fungi and fungal like microbes: a comprehensive review on mechanisms, roles, and host interactions. Frontiers in Plant Science 16: 1626960.

Kelliher, J. M., Robinson, A. J., Longley, R., et al. (2023). The endohyphal microbiome: current progress and challenges for scaling down integrative multi-omic microbiome research. Microbiome 11: 192.

Kramer, H. M., Cook, D. E., Seidl, M. F., and Thomma, B. P. (2023). Epigenetic regulation of nuclear processes in fungal plant pathogens. PLoS Pathogens 19: e1011525.

Lange, L. (2014). The importance of fungi and mycology for addressing major global challenges. IMA fungus 5: 463.

Langhammer, P. F., Bull, J. W., Bicknell, J. E., et al.. (2024). The positive impact of conservation action. Science 384: 453.

Lecomte, M. (2013). Plantes et Gloméromycètes: les endomycorhizes. Bull. AMFB 29.

Lecomte, M. (2024) Microscopie et Champignons. Fédération des mycologues francophones de Belgique.

Lilleskov, E. A., Kuyper, T. W., Bidartondo, M. I., and Hobbie, E. A. (2019). Atmospheric nitrogen deposition impacts on the structure and function of forest mycorrhizal communities: a review. Environmental Pollution 246 : 148.

Liu, F., Wang, S. H., Cheewangkoon, R., and Zhao, R. L. (2025). Uneven distribution of prokaryote-derived horizontal gene transfer in fungi: a lifestyle-dependent phenomenon. MBio, 16: e02855-24.

Lofgren, L. A., & Stajich, J. E. (2021). Fungal biodiversity and conservation mycology in light of new technology, big data, and changing attitudes. Current biology 31: R1312–R1325.

Lücking R, Aime MC, Robbertse B et al. (2021) Fungal taxonomy and sequence-based nomenclature. Nat Microbiol. 6:540.

Martin, F. M. (2022). La forêt hyperconnectée. Neuchâtel : Éditions de La Salamandre, 168 p.

Martin, F.M. (2025) Les communautés fongiques des sols forestiers face aux changements climatiques. Comptes Rendus. Biologies 348 :167.

Martin F.M. and van der Heijden M.G.A. (2024). The mycorrhizal symbiosis: research frontiers in genomics, ecology, and agricultural application. New Phytologist 242:1486.

Mattoo, A.J., Nonzom, S.(2021) Endophytic fungi: understanding complex cross-talks. Symbiosis 83:237.

Mehrabi, R., Bahkali, A. H., Abd-Elsalam, K. A., et al. (2011). Horizontal gene and chromosome transfer in plant pathogenic fungi affecting host range. FEMS Microbiology Reviews 35: 542.

Mridu, N. S., and Kumar, J. (2024). Impact of climatic variations on fungi, mycorrhiza and lichens–An appraisal. Current Research in Environmental & Applied Mycology (Journal of Fungal Biology), 14: 89.

Moersberger, H., Valdez, J., Martin, J. G. C., Junker, J. et al. (2024). Biodiversity monitoring in Europe: user and policy needs. Conservation Letters 17 : e13038.

Muséum national d'Histoire naturelle. (2024, 3 avril). La première Liste rouge des champignons en France. Paris, France : MNHN. https://www.mnhn.fr

Nagy LG, Vonk PJ, Künzler M, Földi C,et al. (2023) . Lessons on fruiting body morphogenesis from genomes and transcriptomes of Agaricomycetes. Stud Mycol. 104:1.

Naturnext (2025) Taxonomie des champignons : définition, comment s'y retrouver, classifications générales. Ressource en ligne sur la classification et la « révolution moléculaire » en mycologie.

Pennock, D. (2019). Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management. FAO.

Powell, J.R. and Rillig, M.C. (2018), Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. New Phytol, 220: 1059.

Priest, S. J., Yadav, V., and Heitman, J. (2020). Advances in understanding the evolution of fungal genome architecture. F1000Research 9, F1000-Faculty.

Qi M, Bidartondo MI, Suz LM, Orme CDL, Arraiano-Castilho R, Tovar C. (2025) Predicted Effects of Climate Change on Future Distributions of Ectomycorrhizal Fungi. Ecol Evol. 15:e72743.

Raimbault, A. (2023) Conséquences de la fragmentation et de la qualité de l'habitat sur la diversité fongique du sol et les implications fonctionnelles en forêt ancienne. Sciences agricoles. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT. https://www.riav.fr/microbiodiversite-sol-role-champignons-invisibles/

Rog, I., Lerner, D., Bender, S.F. and van der Heijden, M.G.A. (2025), The Increased Environmental Niche of Dual-Mycorrhizal Woody Species. Ecology Letters, 28: e70132.

Rondet, J., Segers, N., Rigo, L., Arlandes, G., et Martinez-Pena, F. (2011). Mycosylviculture. Projet Micosylva.

Sauters, T. J., and Rokas, A. (2025). Patterns and mechanisms of fungal genome plasticity. Current Biology 35: R527.

Sellier Y., Dupont V., Sugny D., Gruhn G., Corriol G., Hannoire C., Hériveau P., Deconchat C.,Her vé R., Lefort F., Léauté J., Coué B., Huart D., Garrigue J., Hairaud M., Gardiennet A., La-
gardère V. et Debaive N. 2021. Prise en compte de la fonge dans les espaces naturels. Cahier Techn ique des Réserves Naturelles de France, Dijon.

Sélosse, M.-A. (2014). Le rôle vital des mycorhizes [Vidéo]. PIM, Marciac, France. https://www.youtube.com/watch?v=39TsKgacWX8

Selosse, M.A. (2021) L'origine du monde : Une histoire naturelle du sol à l'intention de ceux qui le piétinent, Arles, Actes Sud.

Sheldrake, M. (2022) Le Monde caché - Comment les champignons façonnent notre monde et influencent nos vies. Agora Sciences Pocket.

Silar, P. (2019). Phenotypic instability in fungi. Advances in Applied Microbiology 107: 141.

SPUN: la page « Peer-reviewed papers » de SPUN regroupe des références avec les détails (titre, revue, année, DOI) sur la biogéographie, les flux de carbone mycorhiziens et les bases de données globales.

Stengel A, Stanke KM, Quattrone AC and Herr JR (2022) Improving Taxonomic Delimitation of Fungal Species in the Age of Genomics and Phenomics. Front. Microbiol. 13:847067.

Stewart, J.D., Biso, C., Cargillet R.I.M. et al. (2026)Global density and biomass of arbuscular mycorrhizal fungal networks.Science392:1171.

Su Y, Guo X, Gao Y, Feng J, Wu L, Lei J, et al. (2025) Warming stimulates cellulose decomposition by recruiting phylogenetically diverse but functionally similar microorganisms. ISME Commun. 5:ycae152.

Sugny, D., et Sanglier, J. J. (2022). De l'importance vitale des mycorhizes dans la lutte contre le réchauffement climatique. Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard.

Tedersoo, L., Bahram, M., and Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. Science 367: eaba1223.

Tedersoo, L., Bahram, M., Zinger, L., Nilsson, R. H., Kennedy, P. G., Yang, T., Anslan, S., and Mikryukov, V. (2022). Best practices in metabarcoding of fungi: From experimental design to results. Molecular Ecology 31: 2769.

Valade, F., Mettoni, L., et Buyck, B. (2025) Dresser une liste des macromycètes décrits de la France métropolitaine. La lettre de la SMF 30.

Vande Zande, P., Zhou, X., and Selmecki, A. (2023). The dynamic fungal genome: polyploidy, aneuploidy and copy number variation in response to stress. Annual review of microbiology 77: 341.

Varenius, K. (2017). Interactions between fungi, forest management, and ecosystem services (Thèse de doctorat, université d'Uppsala).

Varga, T., Földi, C., Bense, V., and Nagy, L. G. (2021). Developmental innovations promote species diversification in mushroom-forming fungi. BioRxiv, 2021-03.

Vincent, Q., Auclerc, A., et Leyval, C. (2022). La biodiversité des sols. Encycl. Environ. URL.

https://wetruf.com/ou-comment-developper-trufficulture-france/

Wilson A.W., Eberhardt U., Nguyen N., et al. (2023). Does One Size Fit All? Variations in the DNA Barcode Gaps of Macrofungal Genera. J. Fungi 9:788.

Xu, Z., Guo, X., Allen, W. J., Hu, Y., et al. (2025). Soil fungi influence the relationship between plant diversity and ecosystem multifunctionality. Nature Communications, 16: 5521.

Yu, H., Wang, T., Skidmore, A., Heurich, M., and Bässler, C. (2023). How future climate and tree distribution changes shape the biodiversity of macrofungi across Europe. Diversity and Distributions 29: 666.