

Compte-rendu de la quatrième

Matinée Pro Silva

Conférence de Jean-Yves Bousserau

« *Le monde végétal et l'eau : concurrences, associations, symbioses...* »

Matinée organisée par Jacques Hazera le samedi 17 novembre 2012

au Centre Équestre Le Volcelest (en salle), puis à Haudoua (en forêt)

1)- Il était une fois

En introduction à sa conférence Jean-Yves Bousserau a fait une description des origines de la vie sur terre, expliquant comment des associations se sont faites il y a deux et trois milliards d'années au niveau des bactéries anaérobies, alors qu'on pense communément, à la suite de Darwin, que les moteurs de l'évolution seraient surtout la compétition et la prédation. Ces dernières se sont certes produites souvent, et se produisent encore, mais les bactéries, ainsi que les plantes, connaissent surtout des phénomènes privilégiant des associations, des échanges et de la complémentarité. Leur intérêt était bien sûr de manger ensemble plutôt que de se manger entre elles.

Cet exposé passionné, d'un niveau quasi-scientifique, décrivait les interactions entre la vie souterraine et les plantes, et notamment l'influence insoupçonnée – mais très positive – de la vie grouillante et discrète du sol sur l'ensemble de la végétation, y compris sur nos arbres. « *Les plantes et les champignons, dont nous connaissons surtout les parties aériennes, sont considérés comme des organismes indépendants. Pourtant, leurs parties souterraines établissent des relations étroites indispensables à la biodiversité et à la productivité des écosystèmes.* » (extrait de la documentation fournie).

Jean-Yves Bousserau a commencé son exposé par un retour en arrière de deux milliards d'années, au moment de l'établissement de la vie dans les océans, à une époque où dominaient les bactéries anaérobies (bactéries sans noyau, capables de vivre dans un milieu dépourvu d'oxygène). Il nous a expliqué comment ces premiers organismes, qui étaient à l'origine antagonistes et en situation de concurrence entre eux, en sont arrivés à établir les premières associations : d'abord par un simple phagocytage des uns par les autres puis, grâce à la pérennisation de ce procédé, par le jeu de l'évolution génétique. L'organisme phagocyté permettait à son prédateur de se procurer certains éléments, dont un des plus importants était l'énergie lumineuse (premiers organismes capables d'opérer la photosynthèse pour fabriquer des sucres). L'algue *Cyanophora paradoxa* illustre ainsi les prémices de tout le génome végétal.

La compétitivité s'est donc finalement transformée en complémentarité, puis en symbiose. Les cellules se sont regroupées et ont formé des conglomerats ; ces derniers sont devenus des organismes de plus en plus complexes, de plus en plus perfectionnés ; ils ont progressivement développé des cellules spécifiques adaptées aux fonctions vitales qui, elles-mêmes se sont diversifiées et multipliées peu à peu : répartition des tâches, développement de la nutrition (cellules externes), apparition de la sexualité (cellules internes), etc..

Par la suite, du fait de la présence massive dans les océans de ces organismes (absorbant du CO₂ et rejetant de l'O₂), l'oxygène s'est trouvé en excès dans l'atmosphère, ce qui a formé la couche d'ozone (O₃), puis a provoqué la colonisation des terres émergées par des êtres sortis de l'eau. Alors sont apparues les bactéries aérobies (bactéries ayant besoin de l'oxygène) et la fabrication des premiers embryons de sols (par la dégradation du matériau parental, ou *roche-mère*) enrichis par les apports de plus en plus importants de matières organiques (restes de la dégradation des organismes vivants).

Notre sol (jusqu'à 20 ou 30 cm de profondeur, voire plus) est habité par des bactéries aérobies, alors que le sous-sol est habité par des bactéries anaérobies. Le travail du sol, pour peu qu'il soit trop profond, a malheureusement pour effet de renverser cet ordre : il enterre les aérobies dans un sous-sol qui leur est hostile, et place les anaérobies au contact de l'air. Cette inversion détruit la communication entre les différentes composantes du sol, perturbe l'ensemble de l'écosystème, et peut entraîner des conséquences extrêmement fâcheuses : cette inversion peut ainsi mener, dans les productions agricoles, à

des effets très graves sur la santé humaine tels que le déclenchement de maladies dégénératives (dégradation des neurones). Citons Gérard Ducerf (in *Encyclopédie des plantes bio-indicatrices*) : « Chaque fois que l'on bouleverse le fonctionnement de ces bactéries, notamment par les labours trop profonds, et qu'on ramène le sous-sol en surface, on repart à zéro au niveau de la fertilité comme il y a 400 millions d'années. » Enfin, lorsque nos sols sont en mauvaise santé, les marchands ont beau jeu de nous conseiller l'apport artificiel des substances que ne peuvent plus produire les bactéries !



Vue de la salle lors de l'exposé de Jean-Yves Bousserieu – Photo Éric Castex

Cette longue introduction sur l'origine de la vie végétale nous laisse donc entrevoir l'idée que le fondement des écosystèmes serait majoritairement constitué d'entraide plutôt que de compétition, et ce sera le thème de toute cette Matinée Pro Silva.

Note : quelques textes extraits de diverses sources et présentés en annexe semblent confirmer ce point.

2)- Importance des mycorhizes

De nos jours, la mycorhization est un exemple de ce que la vie a développé de plus performant en matière d'entraide. Une mycorhize est une association étroite entre deux organismes : un champignon et une plante. Les lichens, de leur côté, sont un autre exemple de symbiose : ce sont des organismes composés d'une algue et d'un champignon, chacun fournissant à l'autre ce qu'il est incapable de se procurer par lui-même : la nourriture pour l'un, l'énergie pour l'autre.

Ce que nous appelons couramment « champignon » n'est en réalité que l'organe de reproduction du champignon : c'est son appareil sexuel ! Le cèpe de Bordeaux, par exemple, n'est pas simplement composé d'un pied et d'un chapeau, mais d'un réseau de filaments souterrains d'une ampleur extraordinaire : les champignons peuvent s'étendre sur un diamètre d'un kilomètre ! Ces filaments – les *hyphes* – sont extrêmement fins et constituent un véritable réseau, possédant de multiples interconnexions (on parle même d'*Internet mycélien* !). Du fait de leur extrême finesse, ils ont la capacité à se faufiler dans les moindres interstices du sol, jusqu'à des recoins où aucune plante ne pourrait envoyer ses racines, même les plus fines. Le volume de prospection de cet organisme est donc gigantesque, ce qui lui permet de capter d'importants volumes d'eau et d'éléments minéraux. Or ce champignon, aussi performant soit-il, est incapable d'opérer la photosynthèse ce qui le rend donc dépourvu d'énergie. C'est là qu'intervient pour lui l'intérêt de la symbiose : les connexions mycorhiziennes qu'il entretient avec telles et telles plantes, auxquelles il procure en échange une partie de son butin, lui permettent de récupérer les sucres issus de la photosynthèse opérée par ses associées. Génial !

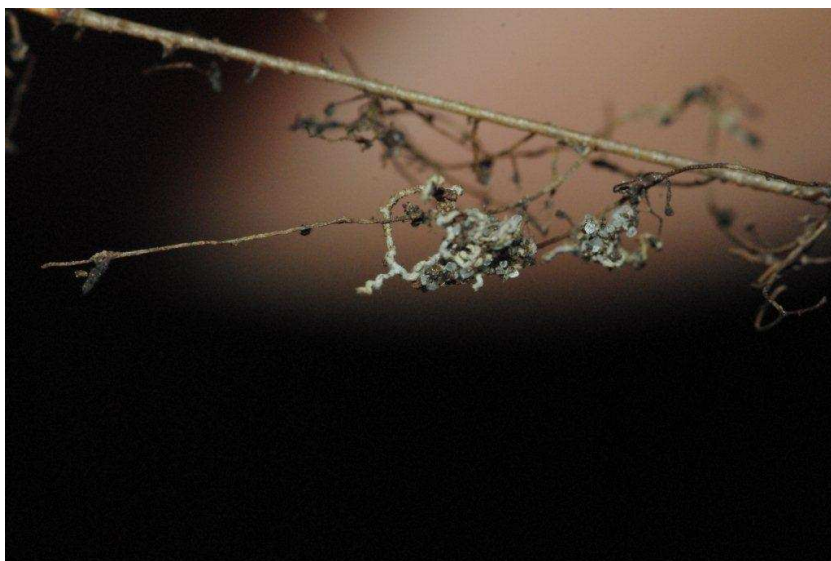
Ces connexions se font dans le sol, entre les filaments mycéliens et les racines fines des plantes, et il en existe deux types : celles qui sont établies à l'intérieur même des cellules de la racine (*endo-mycorhizes*, ou *mycorhizes arbusculaires*) et celles qui sont établies à l'extérieur des cellules de la racine, formant un manchon autour de la racine (appelées *ecto-mycorhizes*), chaque type ayant des caractéristiques propres et un fonctionnement particulier. Quel qu'en soit le type, la mycorhize est un lieu d'intenses échanges. Les ecto-mycorhizes, quoique minuscules, peuvent néanmoins être observées à la loupe (voir photos page suivante). Selon leur espèce, les champignons peuvent être plus ou moins généralistes vis-à-vis de leurs symbiotes, certains étant cependant inféodés à une seule espèce de plante, d'autres pouvant s'associer à une multitude d'espèces différentes.



Aspect de quelques manchons mycorrhiziens sur des racines de châtaignier (*Castanea sativa*). Photos : J.Y. Bousserau



Manchons mycorrhiziens sur des racines fines de chêne pédonculé (*Quercus robur*)



Manchons ectomycorhiziens sur des racines fines de chêne pédonculé (*Q. robur*)

Il est important de noter que ces échanges n'ont pas lieu seulement entre les deux organismes en question (le champignon et la plante), mais qu'il s'agit en réalité d'un véritable réseau mettant en connexion un nombre considérable d'associés : plusieurs champignons et plusieurs végétaux. Par exemple, un jeune chêne peut parfaitement être en relations avec un chêne adulte et, en cas de sécheresse, être secouru grâce à l'entraide établie par l'association mycorhizienne. En outre, ces associés peuvent même être d'espèces diverses.

Ces mycorhizes remplissent notamment six rôles majeurs :

- eau : elles ont la capacité, primordiale en cas de sécheresse ou d'inondation, de réguler les volumes d'eau ;
- minéraux : grâce à leur énorme potentiel de prospection, elles peuvent les capter à une très grande distance ;
- hormones : elles fabriquent des auxines favorisant la croissance des plantes ;
- antibiotiques : elles fabriquent des substances antibiotiques bénéfiques aux deux associés ;
- éléments-traces métalliques : dans les sols acides, les E.T.M. (parfois appelés *métaux lourds*) sont très pénalisants, notamment du fait de leur toxicité, or les champignons ont la capacité de les neutraliser en les stockant dans des cellules spécialisées (les *sidérophores*) ce qui, là encore, protège les plantes et favorise leur croissance ;
- évapotranspiration : les mycorhizes participent à la régulation de l'activité biologique des plantes, notamment de leur évapotranspiration.

3)- Autres mécanismes

D'autres mécanismes d'association existent dans le monde végétal, et peuvent se combiner avec la mycorhization. Les fabacées sont connues pour leur capacité à stocker de l'azote atmosphérique grâce aux bactéries (des *Rhizobium*) piégées dans des nodules qui se développent sur leurs racines, cet azote pouvant ensuite bénéficier à tout le milieu. Les aulnes, quant à eux, ont un système un peu semblable grâce à des actinomycètes : les *Frankia*. Seules quatre familles de plantes sont dépourvues de mycorhizes (les Chénopodiacées, les Brassicacées, les Urticacées et les Caryophyllacées), mais elles ont développé des solutions de remplacement.

Par ailleurs, le régime hydrique d'une région est très étroitement dépendant de son couvert végétal : la présence d'un couvert important permet une évapotranspiration importante, ce qui alimente le flux des précipitations. Notons toutefois que, du fait du déplacement vers l'Est des masses d'air dans l'atmosphère, ces précipitations ne bénéficient généralement pas directement aux régions qui sont à l'origine de l'émission des flux, mais à des régions voisines situées sous leur vent, c'est-à-dire l'Est. La présence d'une végétation en sous-bois protège aussi le sol des fortes variations de températures, et permet de garder en surface une partie de l'humidité, particulièrement s'il y a des mousses.

Enfin, un paramètre tout simple mais trop souvent oublié permet lui aussi d'améliorer significativement l'exploration du sol au bénéfice de l'ensemble du milieu, et de renforcer la bonne santé des végétaux et la stabilité des arbres : c'est le mélange d'essences. Les différentes espèces de plantes n'ont pas exactement les mêmes exigences, ni la même architecture racinaire ; n'explorant pas exactement les mêmes zones du sol, elles peuvent donc se compléter... Ainsi, le mélange d'espèces permet donc d'optimiser les ressources du milieu.

4)- Conclusions pour le forestier

De tout cela, le forestier peut immédiatement tirer quelques enseignements pratiques :

- essayer de conserver les systèmes racinaires dans leur état optimal ;
- éviter de contrarier les processus naturels (éviter par exemple de mettre le sol à nu) ;
- éviter le labourage systématique et surtout le labourage profond ;
- ne jamais rien enfouir (en cas de nécessité, préférer l'épandage en surface des fertilisants, du fumier...) ;
- lorsqu'il est inévitable d'effectuer un travail du sol, il est impératif qu'il soit léger et peu profond ;
- en cas d'utilisation d'un rouleau landais, choisir un rouleau à lames étroites ;
- donner si possible la préférence au girobroyeur.

En conclusion : pratiquons le retour à la biodiversité et évitons de travailler le sol inutilement. Nous y gagnerons en productivité, en état sanitaire de nos bois, et en stabilité.

Merci à tous ceux qui, par la mise à disposition de leurs notes ou de leurs photos, ou par leur relecture, ont contribué à la rédaction de ce compte-rendu : Dominique Lanusse, Philippe Mora, Bernard Lafargue, Éric Castex, et Jean-Yves Bousserreau.

5)- Annexes

• Trois extraits :

« *Les relations de coopération entre espèces : Darwin chez les samourais !* »

L'écologie, des années 1950 aux années 1970, a été largement dominée par l'idée que la compétition était le principal facteur d'interaction entre les espèces. Depuis, de nombreuses observations sont venues démontrer que les interactions de type mutualiste étaient beaucoup plus nombreuses qu'on ne le pensait. L'idée du mutualisme avait déjà été avancée par un Russe, P. Kropotkine, dans un ouvrage paru en 1906 et intitulé *l'Entraide*. Il regrettait que Darwin ait trop insisté sur la "lutte pour la vie" sous l'influence des idées de Malthus, sans voir que les êtres vivants coopèrent pour assurer au mieux leur survie collective. Un scientifique japonais, Kinji Imanishi, a proposé lui aussi une théorie de l'évolution qui s'oppose aux idées de Darwin (Thuillier, 1988). Il considère que c'est le groupe et non pas l'individu qui constitue la réalité première et que l'harmonie est plus fréquente dans le monde végétal et le monde animal que la compétition et la lutte pour la vie (Ito, 1991). Dans la nature, les êtres coopèrent et s'approprient collectivement les territoires en pratiquant le mutualisme plutôt que la compétition (Thuillier, 1988). Sans entrer dans le détail signalons par exemple (Faurie et al., 1998) :

- les associations entre végétaux et microorganismes, telles que les mycorhizes sur les racines qui facilitent le transfert des éléments minéraux dans les plantes supérieures (voir chapitre 12) ;
- le rôle des insectes dans la pollinisation et la dispersion des semences ;
- le rôle des mammifères et oiseaux dans la dissémination des fruits et des graines dans les forêts tropicales ;
- les lichens formés par l'association d'une algue et d'un champignon ;
- les protozoaires capables d'hydrolyser la cellulose vivant en symbiose avec des insectes coloniaux ou dans la panse des ruminants ;
- l'association entre les coraux et les algues unicellulaires du groupe des zooxanthelles.

Ces relations mutualistes sont d'une importance au moins égale aux relations de compétition pour expliquer la structure et le fonctionnement des écosystèmes. La disparition de pollinisateurs peut entraîner la disparition de plantes, de même que l'absence de certains vertébrés dans les forêts tropicales rend impossible la dissémination et la germination de graines d'espèces arborées. Les végétaux dépourvus de mycorhizes ont une croissance moins bonne que ceux qui en sont pourvus. On peut donc penser que les relations symbiotiques, produits d'une coévolution, ont pour résultat :

- de renforcer la cohésion des systèmes biologiques et d'améliorer l'utilisation des ressources au profit des partenaires
- de renforcer les rapports entre espèces contribuant ainsi à accroître la résilience des écosystèmes par rapport aux perturbations. »

In : Écologie – De l'écosystème à la biosphère – Christian LÉVÊQUE – Dunod 2001 – Pages 229 et 230

« Mycorhize

Les colonies mycorhiziennes parcourent des successions au niveau des racines. Il existe des champignons spécialisés des stades précoces et d'autres des stades tardifs. Seuls les champignons des stades précoces peuvent coloniser les semis des arbres, même lorsqu'ils sont exposés à des substances inhibitrices et à d'autres facteurs de stress. Les champignons des stades précoces peuvent disparaître complètement des arbres adultes, laissant la place à d'autres espèces. L'ectomycorhize du stade tardif peut transférer du carbone des arbres aux semis par des "ponts mycorhiziens", permettant par ex. la croissance de semis même en conditions d'éclairage suboptimales (à l'ombre du peuplement).

Les champignons des stades précoces sont souvent peu spécialisés, et disposent d'une large gamme d'hôtes. C'est ainsi que le cèpe (*Boletus edulis*), l'amanite tue-mouche (*Amanita muscaria*) et le paxille à bords enroulés (*Paxillus involutus*) établissent des symbioses avec le chêne, le hêtre, le bouleau, le pin, l'épicéa et le mélèze, et, à l'exception du paxille, avec le sapin. Le bolet élégant (*Suillus grevillei*) par contre est un symbiote lié au mélèze et au pin.

La formation de mycorhizes est fréquente surtout en milieu faiblement à modérément acide. L'excès d'azote inhibe la symbiose (Meyer 1985, Marx 1991).

Les échanges de substances assimilables et d'énergie (arbre) contre des sels nutritifs et de l'eau (champignon) présentent de grands avantages pour les arbres :

1. L'alimentation des arbres en eau et en nutriments est améliorée, ce qui s'explique par l'énorme accroissement de la surface réceptrice des racines sous la forme du réseau mycélien fongique, largement étendu dans le sol forestier. Pour l'alimentation en phosphates par exemple, le taux d'accroissement est d'environ 300 % chez le douglas, de 230 à 890 % chez le bouleau (Flick et Lelley 1985). La disponibilité d'éléments-traces tels le zinc et le cuivre est également améliorée par la mycorhize.
2. Les arbres mycorhizés ont une bonne résistance à la sécheresse : les filaments mycéliens transportent l'eau sur une certaine distance, les racines sont protégées par leur manchon de mycélium. Les champignons mycorhiziens quant à eux présentent différents degrés de tolérance à la sécheresse.
3. Les champignons mycorhiziens véhiculent des flux de substances assimilables d'un arbre à l'autre (cf. ci-dessus).
4. Le réseau fongique exerce une fonction de stockage pour les nutriments du sol et les liaisons carbonées. Dans le mycélium les nutriments sont à l'abri du lessivage et à la disposition de la plante en cas de besoin. Lors des phases d'abondance de nutriments, il y a en particulier stockage de phosphates, d'azote sous forme d'acide glutamique et de glutamine, ainsi que de potassium et de calcium. De cette manière, la symbiose assure une constance d'alimentation.
5. Les manchons mycéliens exercent des effets de protection : de façon mécanique, en recouvrant entièrement les racines ; en élaborant des substances inhibitrices antibiotiques volatiles, diffusant facilement et solubles dans l'eau ; ainsi qu'en élaborant des substances contenant du phénol. Il s'ensuit des modifications de la microflore dans la rhizosphère. Les excréments ont des effets allélopatiques sur les organismes pathogènes.
6. Enfin, les manchons mycorhiziens peuvent atténuer dans une certaine mesure les caractères défavorables des sols, pour les arbres, tels qu'un pH trop acide. Mais cet effet a ses limites. Même si la plupart des champignons mycorhiziens sont acidiphiles, voire acidiphiles, une acidification trop prononcée entraîne des substitutions d'espèces et finalement le dépérissement de la mycorhize. Des ions-Al toxiques participent à ce processus. C'est pourquoi la disparition des mycorhizes est mentionnée comme un facteur important dans le dépérissement forestier dû aux polluants atmosphériques (acidifiants) (Blaschke 1986, Courtois 1989, Flick et Lelley 1985, Meyer 1985).

Symbiose plante supérieure/bactéries

La plupart des plantes supérieures ne peuvent normalement absorber l'azote que sous forme d'ion nitrate ou ammonium. La plus grande réserve mondiale d'azote, à savoir les 78 % d'azote que contient l'atmosphère, n'est pas immédiatement accessible aux plantes, car sous sa forme élémentaire N_2 l'azote est inutilisable pour presque tous les êtres vivants. La minéralisation par les bactéries du sol (*Nitrobacter* et *Nitrosomas*) est donc indispensable.

Diverses plantes supérieures de la famille des fabacées (légumineuses) ont déjoué cet état de choses défavorable en entrant en symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*. Grâce à cette coopération mutualiste, l'azote est directement prélevé dans l'atmosphère, puis transformé en protéines. Une matière première que la plante supérieure ne peut atteindre directement devient ainsi disponible (Kunze 1988).

L'association entre racines végétales et bactéries nitrifiantes constitue un cas "d'association de combat" instable, où chacun des partenaires poursuit son propre avantage, l'avantage pour l'autre ne survenant que comme un effet secondaire.

C'est pourquoi cette forme de symbiose peut se comprendre comme "double parasitisme" (Kunze op. cit.), chacun des partenaires exploitant l'autre. On le voit clairement en examinant de plus près les différentes étapes de cette association.

- **1^{ère} phase :** la bactérie déclenche une attaque parasitaire en infectant les racines de la plante. Les bactéries aérobies saprophytes des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* pénètrent par les pilosités racinaires dans les tissus corticaux de la racine, au travers d'un "tube d'infection" encapsulé de cellulose du côté de la plante-hôte. Cela entraîne une multiplication et un accroissement anormal des cellules-hôtes, et la sécrétion accrue d'une phytohormone, l'auxine. Il se forme des nodosités racinaires reconnaissables à l'œil nu (cf. fig. 4.03), dont les cellules internes sont entièrement remplies de bactéries, lesquelles ont quitté entre-temps les tubes d'infection. Cette phase revêt un caractère purement parasitaire, les bactéries se nourrissant aux dépens de leur hôte, de ses nutriments et substances actives.
- **2^e phase :** l'infection déclenche une réaction de défense de la plante, qui fait obstacle à l'expansion des bactéries au-delà des nodosités. Sous l'effet de cette réaction, les parasites intrus changent de forme, devenant des bactéroïdes dont le volume est dix à douze fois supérieur à celui des rhizobiums libres. Une fois rempli tout l'espace disponible, les bactéroïdes ne peuvent plus se diviser. Il s'agit de cellules immobilisées, qui sont devenues du point de vue fonctionnel des organelles cellulaires fixatrices d'azote.
- **3^e phase :** le développement de la symbiose aboutit à un statu quo équilibré. Le processus biochimique est optimisé : la plante fournit les sources de carbone et d'énergie, ainsi que les enzymes pour l'assimilation de l'ammonium ; en échange, elle peut utiliser l'ammoniac synthétisé par les bactéroïdes à partir de l'azote atmosphérique grâce à un système enzymatique spécifique, le complexe nitrogénase. La plante et les bactéries synthétisent en commun un pigment, la leghémoglobine, qui est indispensable pour l'équilibre du bilan de l'oxygène des bactéroïdes. En effet, seules les nodosités contenant ce pigment sont aptes à fixer l'azote atmosphérique. Dans cette phase, attaque et défense s'équilibrent pour ainsi dire. Les deux partenaires tirent bénéfice de cet équilibre du point de vue métabolique.
- **4^e phase :** cet équilibre antagonique ne dure pas éternellement. Chacun des partenaires tend à rompre le statu quo et à mener l'offensive jusqu'à son terme. C'est finalement la plante qui a le dessus : les bactéries sont dissoutes en même temps que le protoplasme des cellules de la nodosité, et la plante résorbe les produits résiduels. Cette dernière phase, tout comme la première, consiste en une prédation (Kunze 1988).

Il existe une autre forme de symbiose très importante en forêt, s'établissant entre des arbres et des actinomycètes, ces derniers combinant des caractéristiques fongiques et bactériennes. Le cas le plus connu est celui de la symbiose entre l'actinomycète *Frankia* et les aulnes. On retrouve là encore une colonisation de la pilosité racinaire et la formation de nodosités. La fixation d'azote est parfois plus importante que chez les *Rhizobium* des légumineuses. »

In : **Écologie forestière** – Hans-Jürgen OTTO – I.D.F. 1998 – Page 258

« Importance écologique de la mycorhization

Les mycorhizes sont à l'origine des écosystèmes les plus complexes, et en particulier dans les forêts et notamment les forêts tropicales qui vivent et évoluent souvent sur des sols ingrats. Leurs mycéliums forment des réseaux interconnectés qui influencent le fonctionnement des écosystèmes (cycles biogéochimiques, composition des communautés végétales, alimentation carbonée des plantules pendant leur développement, modification de la compétition...) en permettant ou augmentant des flux importants de carbone organique et de minéraux (azote, phosphore, eau...) via le sol (en moyenne 30 à 40 % des minéraux captés par les marges du réseau mycélien sont rétrocédés à la racine, cette dernière apportant 30 % des glucides photosynthétisés au champignon). Ils constituent un des éléments les plus dynamiques de la symbiose mycorhizienne. Ces transferts sont si efficaces, qu'ils remettent en cause le concept de spéciation par compétition pour les nutriments entre les plantes d'un écosystème, en particulier pour la capture des phosphates par les racines (ils permettent de se passer des fertilisants phosphatés) ou pour la résistance à la sécheresse. Ils sont pourtant encore peu exploités en horticulture, agriculture et foresterie, ou pour la dépollution de certains sols pollués.

Certains groupes de champignons sont probablement des espèces-clés voire des "espèces ingénieur" qui influent sur les principaux processus écologiques du sol. Ils sont considérés par les pédologues comme des éléments essentiels de la diversité des communautés, laquelle est un facteur de stabilité et d'équilibre écologique. Beaucoup de groupes-clés trouvés dans les sols (bactériens et de champignons mycorhiziens notamment) peuvent se connecter aux plantes (au moins 90 % des familles de plantes terrestres sont concernées) via des associations mycorhiziennes à arbuscules et jouer des synergies essentielles pour la survie et la productivité des plantes, contribuant à former un réseau écologique essentiellement souterrain, que certains biologistes ont nommé le "wood-wide web" (en référence au "World wide web").

La plupart des champignons mycorhiziens sont soupçonnés d'avoir plusieurs hôtes voire une large gamme d'hôtes, ce qui semble se confirmer dans les milieux naturels, mais les études faites sur les sols arables cultivés montrent cependant que la diversité en champignons mycorhiziens y est « extrêmement faible par rapport aux sols forestiers ».

La colonisation des systèmes racinaires, le potentiel "mycorhizogène" du sol et la "dépendance mycorhizienne" des plantes sont inversement corrélés avec la teneur de la solution du sol en ions phosphates ; de plus, ce résultat n'est pas lié à une forme d'engrais phosphaté, qu'il soit organique ou minéral, puisque les plantes n'absorbent que des ions en solution. L'enrichissement de cette solution devient directement responsable du fait que la plante bien nourrie ne favorise plus le développement des mycorhizes. Dans certaines situations, les niveaux de phosphore atteints deviennent incompatibles avec l'installation des mycorhizes.

Les mycorhizes interagissent aussi avec diverses bactéries du sol (dont *Pseudomonas*) qui peuvent être pathogènes, mais qui sont aussi appelées "bactéries auxiliaires à la mycorhization" (en anglais MHB: Mycorrhizal Helper Bacteria) tant elles jouent un rôle important.

Les mycorhizes interagissent aussi avec les autres mycorhizes et les autres champignons et avec certains prédateurs et parasites aériens des plantes :

- L'attaque des plantes par des herbivores provoque une modification rapide des communautés mycorhiziennes (les espèces demandant le moins de carbone sont favorisées) mais la nature de la population mycorhizienne modifie également (positivement ou négativement) les capacités de défense des plantes.
- Les communautés mycorhiziennes répondent (par modification des abondances spécifiques relatives) aux modifications de l'environnement suivant qu'elles soient plus ou moins favorable à l'hôte ou au symbiote et les communautés bactériennes sont modifiées par la variation des exsudats entre racines mycorhizées et non-mycorhizées.
- La diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules du sol contrôle la composition des communautés végétales par un effet direct du champignon sur la valeur sélective des individus qu'ils colonisent (effet bénéfique, neutre, négatif ou même suppressif). Ce phénomène est lié à la préférence d'hôte existant pour chaque champignon. Cette préférence résiderait dans l'adéquation entre fonctions écologiques exercées par le champignon et besoins de la plante hôte.

Prise en compte dans la gestion des forêts et des cultures

Un cortège mycorhizien optimal agirait comme un "engrais" sans ses inconvénients, et gratuitement, en se passant de pesticides, fongicides et amendements. Après de premiers essais en Australie dès les années 1920, des entreprises ont développé des souches d'inoculation adaptées à plusieurs espèces commerciales, mais il faudrait qu'elles soient aussi adaptées au contexte du lieu d'implantation. Plusieurs chercheurs estiment que les souches de champignons symbiotes génétiquement les mieux adaptées au terrain, sont celles qui sont indigènes.

L'activité sylvicole et agricole peut perturber ou modifier (négativement ou positivement) la microflore fongique et sa capacité à mycorhizer ;

- Le retournement du sol (labour), le tassement par les engins endommagent la communauté ectomycorhizienne

- La fertilisation azotée (qui se fait de plus en plus en sylviculture aussi) diminue le nombre de carpophores et altère la composition en espèces (mesuré sur *Picea abies* par Peter et al., en réduisant le nombre de mycorhizes, et en changeant les types mycorhiziens (Brandbrud, 1995 ; Karen, 1997)
- Les coupes rases endommagent la communauté mycorhizienne. Jones estime que le changement de composition des communautés ectomycorhiziennes est plus en cause qu'une diminution du taux de colonisation des racines. Le tassement du sol pourrait être en jeu aussi, de même à long terme que l'exportation de presque toute la biomasse ligneuse.
- Les coupes forestières d'éclaircie, ainsi que l'irrigation augmentent le nombre de carpophores produits avec des effets encore mal compris sur la composition et biodiversité de la communauté fongique.
- Bien entendu l'utilisation de fongicide affecte cette communauté. La présence de fongicides dans les eaux météoritiques (pluies, brumes, rosées, neige, etc.) est avérée, mais ses impacts sur les champignons restent mal compris.

Les changements bio-chimiques et biologiques, ainsi que microclimatiques induits par les grandes coupes rases, (ou même par les moissons dans le cas de l'agriculture) pourraient avoir des impacts sous-estimés, liés aux impacts directs sur le sol, sur l'eau, mais aussi à la perte d'inoculum fongique (même si les racines restent dans le sol, les "gros bois" et gros "bois-morts" deviennent rares ou absents, et les rémanents sont souvent rassemblés). »

In : Mycorhize – Wikipédia – Pages 2 et 3

• Quelques citations :

- « *Un labour, pour la vie du sol, peut être comparé au cumul d'un tremblement de terre, d'une inondation, d'un feu et d'un ouragan.* » D. Reicosky (U.S.D.A.)
- « *La minéralisation par le travail du sol est un moyen efficace de fertiliser les cultures mais, si elle est trop importante, elle consomme le stock d'humus. C'est comme un feu : plus on souffle dessus, plus ça brûle fort, et moins ça brûle longtemps ! Après un labour, la végétation est détruite, la vie du sol perturbée et la culture n'a pas encore de besoins importants : les nitrates sont lessivés.* » Frédéric Thomas (L'agriculture du carbone)
- « *Le travail du sol accélère la minéralisation de la matière organique : d'avantage d'éléments minéraux à court terme (souvent perdus) mais perte d'humus à moyen terme.* » Frédéric Thomas (L'agriculture du carbone)
- « *Le labour génère plus d'azote minéral que le semis direct. L'azote descend dans le profil avec l'eau des pluies d'automne-hiver, et va se perdre dans l'eau de drainage.* » Frédéric Thomas (L'agriculture du carbone)
- « *On aurait pu croire que le travail millénaire des paysans a eu pour but d'ameublir le sol pour permettre aux racines de leurs cultures de s'y installer. Il n'en est rien. L'agriculture a été dans les siècles passés l'art de ne pas cultiver le sol autrement dit de laisser la plante se débrouiller pour pénétrer le sol, l'essentiel étant de lui fournir un sol dégagé.* » Dominique Soltner
- « *C'est la vie qui forme le sol. La structure et la porosité sont surtout d'origine biologique. Le véritable but du travail du sol est de dégager le sol plus qu'ameublir la terre.* » Dominique Soltner
- « *Il faut nourrir le sol, pas la plante.* » Anonyme
- « *Le plus grand destructeur des sols, c'est l'essuie-glace* » Gérard Ducerf