



Les arbres parlent-ils ?

François LE TACON

Directeur de Recherche Émérite de l'INRAe

26 03 2021

Introduction

L'idée que les arbres parlent remonte à la mythologie grecque. Les chênes du bois sacré de Dodone, proche du sanctuaire de Zeus dans l'Épire, parlaient et prononçaient des oracles. En outre, après avoir servi à la construction du navire Argo, leur bois parlait et avertissait Jason et les argonautes de l'approche des dangers lors de la conquête de la Toison d'or. Et si l'on en croit le poème *Nuit* de Victor Hugo, les arbres se parlent aussi tout bas :

*Le ciel d'étain au ciel de cuivre
Succède. La nuit fait un pas.
Les choses de l'ombre vont vivre.
Les arbres se parlent tout bas.*

À l'appui de ces légendes, plusieurs chercheurs ont avancé que les arbres communiquaient entre eux par différents mécanismes souterrains ou aériens. C'est ainsi qu'est née l'idée des *talking trees* ou arbres parlants. Ces idées ont été reprises en 2017 par un forestier allemand, Peter Wohlleben, qui affirme que les arbres sont capables de dialoguer intelligemment entre eux. D'une manière plus générale, l'idée que les plantes, se parleraient, s'entraideraient, se défendraient et seraient intelligentes s'est développée dans l'opinion publique.

Qu'en est-il réellement ?

Capacité à communiquer et intelligence, deux fonctions différentes

L'intelligence est un concept abstrait qui fait l'objet de débats chez les philosophes comme chez les biologistes. L'intelligence dépend entre autres de la capacité à communiquer mais aussi de la capacité à traiter les informations reçues, de les stocker, de l'apprentissage et surtout de la capacité à prendre des décisions en toute conscience. Le mot conscience vient du latin *conscientia*, c'est-à-dire la connaissance qu'un être vivant a de lui-même, de son état et de son rapport avec le milieu extérieur.

Les végétaux, comme tout organisme vivant, doivent pour survivre communiquer avec leur environnement ou avec d'autres organismes. Sont-ils pour autant

intelligents ? Pouvoir communiquer n'est évidemment pas suffisant pour être qualifié d'intelligent.

La capacité à communiquer est une caractéristique de tous les organismes vivants. Elle est à la fois interne et externe.

Les organismes vivants communiquent avec leur environnement afin de pouvoir s'adapter aux conditions extérieures. Les informations sont captées par des récepteurs et parviennent après transduction jusqu'aux noyaux des cellules où elles interviennent sur la transcription de l'ADN en ARN messagers. Ces ARN messagers sont ensuite exportés dans le cytoplasme et traduits en protéines dans les ribosomes.

Les êtres vivants, appartenant ou non à des espèces différentes, échangent aussi entre eux des informations qui se traduisent en compétition ou au contraire en coopération, la symbiose étant l'état le plus abouti.

Enfin chez les organismes pluricellulaires, les cellules communiquent entre elles par échange réciproque d'informations afin de réguler leur métabolisme différemment ou en harmonie avec les cellules voisines.

Comment les végétaux communiquent-ils ?

Quand un végétal rencontre des bactéries, des champignons ou tout autre organisme, il perçoit les signaux qui sont émis par ses voisins. Ces signaux sont des motifs chimiques très divers (ions, sucres, hormones, acides aminés, peptides, protéines, etc.). Ces motifs, ou molécules signales ou molécules de signalisation ou ligands sont perçus par des récepteurs (*Receptor-Like Kinases* ou RLKs) situés sur la paroi des cellules végétales. Ces récepteurs sont des protéines complexes qui comprennent un domaine extracellulaire pour la perception du signal, un domaine transmembranaire et un domaine kinase intracellulaire. La perception du signal déclenche dans la cellule une multitude de réactions comme l'afflux de calcium, la production d'oxygène actif, l'accumulation d'acide salicylique, etc. Ces processus agissent sur la transcription de l'ADN en ARN messagers dont la traduction modifie le métabolisme (Figure 1).

S'il s'agit d'un pathogène, diverses réactions de défenses vont être activées. C'est ce qui constitue l'immunité innée du végétal. En dehors de ces processus d'immunité, les RLKs sont impliqués dans les réponses contre les stress abiotiques, la symbiose plantes-micro-organismes et la régulation de la croissance des plantes.

Les domaines extracellulaires des RLKs sont très variables, ce qui rend leur capacité à percevoir une grande variété de signaux. Si le domaine extracellulaire est une lectine (LecRLK), les signaux perçus sont des sucres (Figure 1). Les lectines sont en effet des protéines capables de s'associer à des sucres. Les RLKs sont divisés en 17 classes dont les LecRLKs. Aucun homologue des LecRLKs n'a été trouvé dans le génome des animaux ni celui des champignons. Les LecRLKs semblent donc spécifiques des végétaux. Il existe 75 LecRLKs chez l'arabette (*Arabidopsis thaliana*), 173 chez le riz, 231 chez le peuplier, 198 chez l'Eucalyptus, 189 chez le soja, 113 chez la pomme de terre, 46 chez le concombre, 22 chez la tomate, etc.

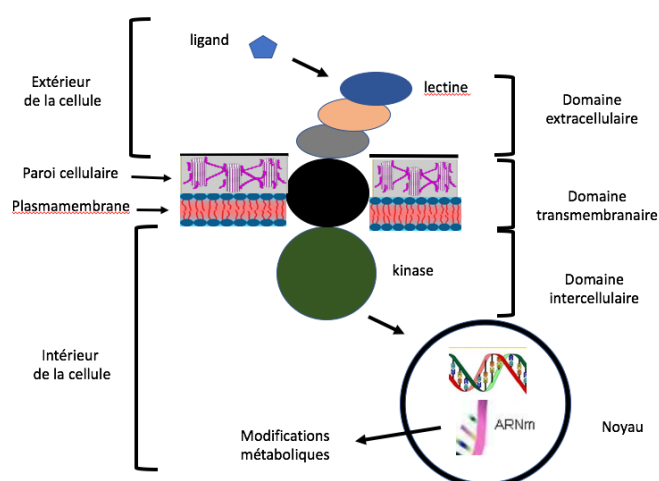


Figure 1. Schéma et fonctionnement simplifiés d'un récepteur LecRLK. Les couleurs des différents domaines correspondent à celles du récepteur PtLecRLK1 de la figure 3.

Comment les végétaux et les arbres communiquent-ils par leurs racines ?

Le sol est un immense réservoir de micro-organismes (champignons, bactéries, protistes, etc.). Un gramme de sol peut contenir jusqu'à 1 milliard de cellules bactériennes. Ces communautés microbiennes jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques et en particulier celui du carbone. Elles ont aussi des effets bénéfiques ou au contraire délétères sur les plantes ou les arbres. Les champignons mycorhiziens sont indispensables aux arbres et à la majorité des végétaux. Ils en assurent la nutrition minérale, en particulier en phosphore, et assurent leur protection contre les pathogènes du sol. Des bactéries appelée PGPR pour

Plant Growth Promoting Rhizobacteria sont également capables de stimuler la croissance des plantes et de s'opposer à l'activité d'agents pathogènes.

Un exemple du rôle d'un LecRLK, un récepteur des cellules de racines de peuplier indispensable à la symbiose ectomycorhizienne

L'établissement de la symbiose ectomycorhizienne ou association entre un champignon supérieur (Ascomycète ou Basidiomycète) et un arbre nécessite la mise en place de nombreux processus coordonnés conduisant au développement de nouvelles structures appelées mycorhizes d'origine mixte, champignon et arbre. L'établissement de la symbiose nécessite une co-réponse orchestrée entre l'hôte et son symbiote par l'échange de diverses molécules de signalisation via des récepteurs. Plusieurs molécules signales ont été identifiées, mais peu de récepteurs l'ont été.

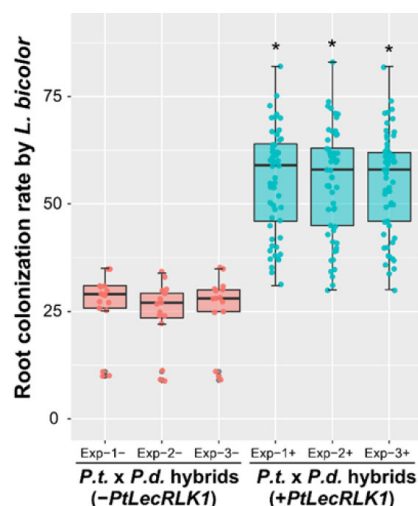


Figure 2. Colonisation par *Laccaria bicolor* des racines d'hybrides de *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* ayant (à droite en bleu) le récepteur PtLecRLK1 ou non (à gauche en rouge). Résultats de 3 essais différents. Extrait de Labbé et al., 2019, *Nature Plants*, 5, 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0469-x>

Un champignon ectomycorhizien, *Laccaria bicolor*, colonise préférentiellement un peuplier, *Populus trichocarpa*, plutôt qu'un autre, *Populus deltoides* (Labbé et al., 2019). Nous avons donc émis l'hypothèse de l'existence de loci génétiques distincts présents dans le génome de *P. trichocarpa*, mais absents dans celui *P. deltoides* et tenté de les identifier. Plusieurs QTLs (*Quantitative Trait Loci*) de 1,5 à 15 mégabases ont été localisés dans les génomes d'une descendance de plusieurs centaines d'hybrides de *P. deltoides* et *P. trichocarpa*. Le QTL situé sur le chromosome XI explique à lui seul 71% de la variance. Ce QTL a été résolu à un récepteur de type lectine kinase (PtLecRLK1). Il n'est présent que chez le parent

T. trichocarpa et seul les hybrides portant ce récepteur sont bien colonisés par le champignon ectomycorhizien *L. bicolor* (Figure 2).

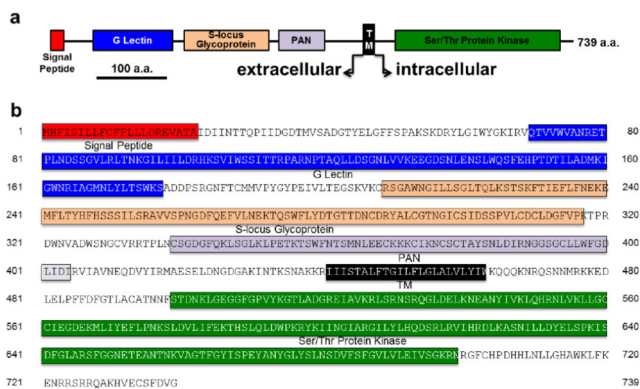


Figure 3. Domaines (a) et séquence peptidique (b) du récepteur PtLecRLK1. Extrait de Labbé et al., 2019, *Nature Plants*, 5, 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0469-x>

Ce récepteur (Figure 3) qui est activé par un sucre, le mannose, a été séquencé et la séquence codante de 2220 bp synthétisée. Cette séquence a été utilisée pour transformer l'écotype Col-0 d'*Arabidopsis thaliana*, qui ne peut être colonisé par un champignon mycorhizien, par *floral dip*, une méthode simplifiée de transformation par *Agrobacterium tumefaciens*. L'expression de ce gène dans les parois cellulaires d'*A. thaliana* permet à *L. bicolor* de former des ectomycorhizes typiques avec un manteau et un réseau de Hartig (réseau mycélien intercellulaire) caractéristiques (Figure 4). Dans les transgènes +PtLecRLK1, *L. bicolor* réprime l'expression de 24 gènes de défense du peuplier contre un seul dans -PtLecRLK1. De même *L. bicolor* modifie profondément le métabolisme général dans +PtLecRLK1 comparativement à -PtLecRLK1. On peut cependant s'étonner que l'introduction dans le génome de l'arabette d'un seul gène codant pour une protéine, certes très complexe et ayant des effets multifonctionnels, puisse permettre l'établissement d'une symbiose qui nécessite la mise en œuvre coordonnée de multiples mécanismes. En réalité, l'arabette avait des ancêtres qui possédaient tout l'arsenal nécessaire à un autre type de symbiose ancestral, les endomycorhizes arbusculaires. Seule une partie de la capacité à mycorhizer a été perdue par l'arabette au cours de l'évolution. Or les mécanismes de symbiose sont en grande partie communs aux trois grandes associations : endomycorhizes arbusculaires, ectomycorhizes et nodules fixateurs d'azote. L'introduction de la séquence génomique du récepteur PtLecRLK1 dans le génome de l'arabette a permis la remise en route des voies métaboliques non spécifiques qui n'avaient pas été perdues au cours de l'évolution. C'est la première fois qu'une plante non hôte devient réceptrice à un symbiote étranger, ce qui ouvre de nouvelles perspectives.

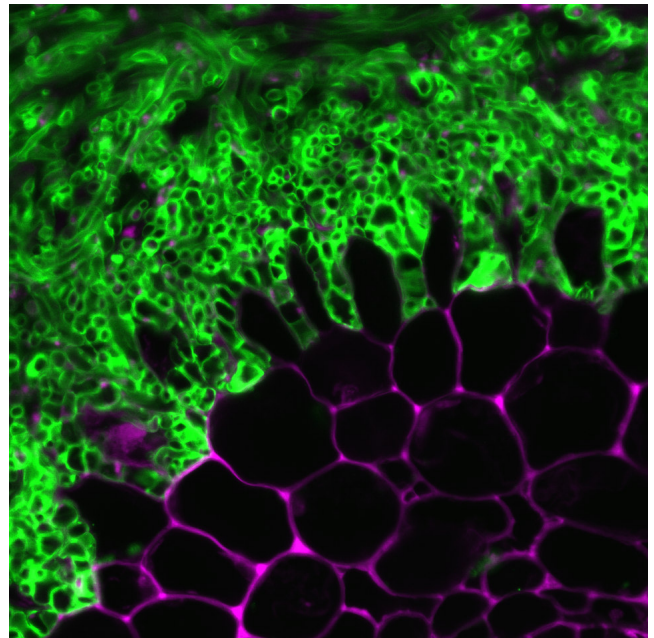


Figure 4. Racine d'*Arabidopsis thaliana* + PtLecRLK1 colonisée par *Laccaria bicolor*. Le manteau et le réseau de Hartig formés par le champignon apparaissent en vert. Aucune association n'apparaît dans le cas de d'*Arabidopsis thaliana* dépourvu du gène PtLecRLK1. Extrait de Labbé et al., 2019, *Nature Plants*, 5, 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0469-x>

Dans la symbiose ectomycorhizienne, le fonctionnement du récepteur lectine kinase PtLecRLK1 est précédé par celui d'autres récepteurs percevant des signaux fongiques tels les Lipochitoooligosaccharides ou LCOs identifiés dans les symbioses arbusculaires et les symbioses fixatrices d'azote. De tels signaux viennent juste d'être mis en évidence chez *L. bicolor* (Cope et al., 2019). De même, l'auxine, une phytohormone, produite fréquemment par des champignons ou des bactéries et dont on connaît le rôle depuis longtemps sur la croissance des plantes, est reconnue par un récepteur ABP (*Auxin Binding Protein*) situé dans la paroi des cellules épidermiques des racines de l'arbre. Une sous-unité du récepteur se fixe alors sur une protéine G et l'active, ce qui entraîne en cascade toute une série de réactions métaboliques après transcription de divers gènes en ARN messagers.

Inversement les racines des arbres et plus généralement celles des plantes excrètent dans le sol une multitude de métabolites qui servent de signaux de communication avec les micro-organismes qui les captent. Ces exsudats racinaires activent le métabolisme fongique et la multiplication des hyphes, ce qui augmente les chances de rencontre entre racines et champignons. Les phytohormones de type strigolactone sont des métabolites clés exsudés par les végétaux et qui sont reconnus par un transporteur fongique ABC (PDR1) dont l'activation entraîne la multiplication des hyphes fongiques (Kretzschmar et al., 2012).

Des réseaux mycorhiziens communs (RMCs) s'établissent entre arbres et autres organismes

Des réseaux mycorhiziens communs (RMCs) interconnectent des racines d'arbres appartenant à la même espèce ou non *via* des ectomycorhizes et les réseaux mycéliens connectés aux mycorhizes (Courty *et al.*, 2010). Les progrès dans la compréhension de la structure et du fonctionnement des RMCs sur le terrain ont été longtemps entravés en raison des difficultés inhérentes à l'étude des systèmes mycéliens *in situ* dans le sol sans les perturber et les détruire.

L'utilisation de marqueurs moléculaires a révélé que la plupart des champignons des RMCs colonisent plusieurs plantes hôtes simultanément. Certains champignons ectomycorhiziens peuvent former des réseaux atteignant plus de 10 m de diamètre et peuvent donc s'étendre sur une zone comprenant plusieurs arbres et les relier entre eux. De plus, d'autres champignons formant des associations avec des bruyères peuvent s'intégrer à des réseaux reliant les arbres. De même, des orchidées peuvent partager des réseaux avec des arbres forestiers (Selosse *et al.*, 2006).

Ces réseaux fongiques permettent de redistribuer les ressources entre les hôtes selon des gradients source-puits. Simard *et al.* (1997), en utilisant un double marquage $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ ont montré, dans un réseau fongique reliant sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et bouleau (*Betula papyrifera*), un transfert de carbone des arbres en pleine lumière vers les arbres à l'ombre. Ainsi, les arbres adultes semblent pouvoir fonctionner comme "arbres nourriciers" des jeunes semis sous couvert.

Cependant, l'importance de ces transferts reste limitée et discutée (Fitter *et al.*, 1998, Robinson et Fitter, 1999, Wu *et al.*, 2001, Simard et Durall, 2004).

Les arbres communiquent-ils par leurs feuilles ?

Il est fréquemment avancé que des insectes ou d'autres herbivores comme les girafes, qui endommagent les feuilles, entraînent l'émission de composés volatils (éthylène, terpènes, ou autres) qui diffusent dans l'atmosphère et seraient réceptionnés par les plantes ou arbres voisins qui pourraient ainsi se mettre en défense et éviter les agresseurs (Baldwin *et al.*, 2006). La plupart des essais effectués pour mettre en évidence de tels effets ont été obtenus en laboratoire et ne révèlent que des effets à la marge. Deux expériences (Baldwin et Schultz, 1983, *Science* ;

Rhoades, 1983) auraient mis en évidence une communication entre arbres après défoliation expérimentale. Une de ces études semble statistiquement déficiente (Baldwin et Schultz, 1983). Les résultats de l'autre pourraient résulter d'une maladie infectieuse transmise entre les chenilles et non à la communication entre arbres. Fowler et Lawton (1985) ont réalisé un essai de terrain sur bouleau (*Betula pubescens*) en défoliant des arbres de 5 % et 25 %. La défoliation expérimentale n'a pas réduit les niveaux ultérieurs d'attaque par des insectes et n'a été suivie d'aucune communication entre arbres. Depuis, ces résultats restent controversés et sont loin de faire l'unanimité dans la communauté scientifique. Ils ont continué à être véhiculés par des scientifiques comme Ian Baldwin du Max Plant Institute et de nombreux médias ou des ouvrages comme celui de Peter Wohlleben. Ils se sont ainsi transformés en certitude pour un vaste public.

Cependant, si les arbres, comme toutes les plantes, dialoguent par leurs racines avec un nombre incalculable de micro-organismes du sol, dont majoritairement des champignons, ils le font aussi par leurs feuilles avec tous les micro-organismes qui peuvent s'y déposer et y vivre. Les feuilles des plantes constituent un milieu particulier qui est appelé phyllosphère. Sa surface est environ deux fois plus grande que la surface terrestre. Cet environnement fournit un habitat à de nombreux micro-organismes qui colonisent d'une part la surface des feuilles où ils forment principalement des agrégats et d'autre part des espaces à l'intérieur des feuilles. Ils sont qualifiés d'épiphytes s'ils restent à la surface de la feuille et d'endophytes s'ils y pénètrent. Les micro-organismes peuvent en effet pénétrer à l'intérieur des feuilles par les stomates et coloniser la chambre sous-stomatique. D'autres sont capables de coloniser les espaces situés entre les cellules. Ils peuvent être commensaux et ne provoquer aucune altération des cellules, voire même être bénéfiques. Mais d'autres sont pathogènes et provoquent des altérations qui peuvent entraîner la mort des cellules et la mort de la plante ou de l'arbre.

La plupart des micro-organismes de la phyllosphère sont des bactéries qui sont non pathogènes. Il existe en moyenne 100 cellules bactériennes par cm² carré de feuilles. Les bactéries s'adaptent à la phyllosphère par différents processus : formation d'agrégats, altération de la cuticule de la feuille, production de biosurfactants, utilisation d'acides aminés, de sucres et de divers métabolites produits par les feuilles. Tous ces processus sont orchestrés par des échanges continus de message entre les bactéries et les feuilles via des récepteurs de type RLK que nous avons déjà évoqués. Les champignons sont moins nombreux que les bactéries sur les feuilles et ont été moins étudiés.

Ce sont en majorité des saprophytes, capables de protéger la feuille des champignons pathogènes. Ils sont présents sur les feuilles, soit sous forme de spores, soit sous forme de mycélium et, comme les champignons associés aux racines, échangent continuellement des messages avec la plante par l'intermédiaire de signaux et de récepteurs.

Conclusions

Les végétaux et donc les arbres communiquent avec leur environnement ainsi qu'avec les micro-organismes qui les entourent par l'intermédiaire de signaux moléculaires très divers et de récepteurs transmembranaires. Les échanges sont à double sens et entraînent des cascades d'évènement qui déterminent la nature des relations entre les partenaires, bénéfiques ou délétères. Les végétaux et donc les arbres possèdent en très grand nombre des récepteurs particuliers, les *Receptor-Like Kinases* ou RLKs, qui leurs permettent de recevoir des signaux de toute nature et de les traiter. Dans l'état actuel des connaissances, les végétaux apparaissent recevoir plus de messages qu'ils n'en envoient. Ils seraient donc plus des capteurs que des émetteurs. Les signaux émis sont surtout reconnus par les racines en raison de la très grande diversité des organismes telluriques.

Des réseaux fongiques ectomycorhiziens peuvent relier des racines d'arbres appartenant à une même espèce ou à des espèces différentes et assurer le transport de carbone ou d'autres éléments en privilégiant les individus privés de lumière. Si dans quelques cas particuliers ces transferts de carbone sont importants, la plupart du temps, ils sont très marginaux et on est loin de ce qui est parfois appelé *Wood-Wibe-Web*.

Les arbres dialoguent aussi par leurs feuilles avec tous les micro-organismes qui peuvent s'y trouver. Par contre l'hypothèse selon laquelle les arbres pourraient protéger leurs voisins d'insectes ou d'herbivores par émission de substances volatiles est controversée.

Références

Baldwin I.T., Schultz J.C., 1983. Rapid changes in tree leaf chemistry induced by damage evidence for communication between plants. *Science*, 221, 277–279.

Baldwin I.T., Kessler A., Halitschke R., 2002. Volatile signaling in plant–plant–herbivore interactions: what is real? *Curr. Opin. Plant Biol.*, 5, 351–354.

Baldwin I.T., Halitschke R., Paschold A., von Dahl C.C., Preston C.A., 2006. Volatile signaling in plant–plant interactions: “talking trees” in the genomics era. *Science*, 311, 812–815.

Cope K.R. *et al.*, 2019. The Ectomycorrhizal Fungus *Laccaria bicolor* Produces Lipochitooligosaccharides and Uses the Common Symbiosis Pathway to Colonize *Populus* Roots. *The Plant Cell*, 31, 10, 2386–2410; DOI: 10.1105/tpc.18.00676.

Courty P.E., Buée M., Diedhiou A.G., Frey-Klett P., Le Tacon F., Rineau F., Turpault M.-P., Uroz S., Garbaye J., 2010. The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: new perspectives and emerging concept. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 5, 679–698.

Fitter A.H., Graves J.D., Wakens N.K., Robinson D., Scrimgeour C., 1998. Carbon transfer between plants and its control in networks of arbuscular mycorrhizas. *Functional Ecology*, 12, 3, 406–412.

Fowler S.V., Lawton J.H., 1985. Rapidly Induced Defenses and Talking Trees: The Devil's Advocate Position. *The American Naturalist*, 126, 2, 181–195.

Giron-Calva PS, Molina-Torres J, Heil M., 2012. Volatile dose and exposure time impact perception in neighboring plants. *J. Chem. Ecol.*, 38, 226–228.

Kretschmar T., Kohlen W., Sasse J. *et al.*, 2012. A petunia ABC protein controls strigolactone-dependent symbiotic signalling and branching. *Nature*, 483, 341–344. <https://doi.org/10.1038/nature10873>.

Labbé J., Muchero W., Czarnecki O., Wang J., Wang X., Bryan A., Zheng K., Yang Y., Yawdy S., Gunter L., Schackwitz W., Martin J., Le Tacon F., Li T., Zhang Z., Ranjan P., Yang X., Jacobson D. A., Tschaplinski T. J., Schmutz J., Chen J.-G. and Tuskan G.A., 2019. Mediation of symbiotic plant–fungus mycorrhizal interaction by a lectin receptor-like kinase. *Nature Plants*, 5, 676–680. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0469-x>.

Robinson D., Fitter A., 1999. The magnitude and control of carbon transfer between plants linked by a common mycorrhizal network, *Journal of Experimental Botany*, 50, 330, 9–13, <https://doi.org/10.1093/jxb/50.330.9>

Selosse M.-A., Richard F., He X., Simard S.W., 2006. Mycorrhizal networks : *des liaisons dangereuses ? Trends in Ecology and Evolution*, 21, 11, 621–628.

Simard S.W., Perry, D., Jones, M. *et al.*, 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature*, 388, 579–582, <https://doi.org/10.1038/41557>

Simard S. W. and Durall D.M., 2004. Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance. *Canadian Journal of Botany*, 82, 8, 1140–1165.

Wohlleben P., 2017. *La vie secrète des arbres, ce qu'ils ressentent, comment ils communiquent. Un monde inconnu s'ouvre à nous.* Traduit de l'allemand par Corinne Tresca. Edition Les Arènes.

Wu K., Nara T., Hogetsu T., 2001. Can ¹⁴C-labeled photosynthetic products move between *Pinus densiflora* seedlings linked by ectomycorrhizal mycelia? *New Phytologist*, 149, 137–146.