



**HAL**  
open science

## **Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France.**

François Le Tacon, D. Mousain, Jean Garbaye, Daniel Bouchard, Jean-Louis Churin, Christine Argillier, Jean-Michel Amirault, Benoît Généré

### ► **To cite this version:**

François Le Tacon, D. Mousain, Jean Garbaye, Daniel Bouchard, Jean-Louis Churin, et al.. Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France.. *Revue forestière française*, 1997, 49 (sp), pp.131-154. <10.4267/2042/5663>. <hal-03444107>

**HAL Id: hal-03444107**

**<https://hal.science/hal-03444107v1>**

Submitted on 23 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



# MYCORHIZES, PÉPINIÈRES ET PLANTATIONS FORESTIÈRES EN FRANCE

F. LE TACON - D. MOUSAIN - J. GARBAYE - D. BOUCHARD  
J.-L. CHURIN - Christine ARGILLIER - J.-M. AMIRAULT - B. GÉNÉRÉ

La première démonstration de la nécessité de l'association des arbres forestiers avec des champignons mycorhiziens a été faite il y a déjà plus d'un siècle (Frank, 1894). L'objectif de la mycorhization contrôlée des arbres forestiers est d'associer, au stade de la pépinière, les jeunes plants avec des souches fongiques mycorhiziennes performantes. Après transfert de ces plants en forêt, les souches fongiques inoculées peuvent survivre et assurer ainsi une meilleure reprise ou une meilleure croissance des arbres.

En pépinière forestière, les premiers essais de mycorhization contrôlée ont été réalisés aux alentours de 1920 en Australie par inoculation de semis de *Pinus radiata* à l'aide de carpophores de *Rhizopogon luteolus*. En Europe, le premier essai de mycorhization contrôlée a été réalisé par spores à la pépinière de Wareham Heath en Grande-Bretagne par Rayner et Levishon sur Épicéa de Sitka. Le premier essai de production d'inoculum ectomycorhizien en culture pure sur milieu solide imprégné de solution nutritive a été réalisé en 1954 par Bokor. Cette technique a été utilisée par Moser en 1958 pour l'inoculation contrôlée de semis de *Pinus cembro* par *Boletus plorans*. À partir de 1970, cette méthode de mycorhization contrôlée a été développée à petite échelle aux États-Unis par Marx, puis à grande échelle à partir de 1982 (Marx *et al.*, 1982 ; Marx *et al.*, 1984).

En France, les premiers essais de mycorhization contrôlée en pépinière forestière ont été réalisés à la pépinière de Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) en 1979 sur semis d'Épicéa et de Douglas (Le Tacon et Valdenaire, 1980). Les essais se sont ensuite diversifiés et ont concerné à la fois des essences introduites et des essences naturelles.

On a pensé pendant longtemps que la mycorhization contrôlée, dans le but d'améliorer la croissance des arbres forestiers, devait être limitée aux zones dépourvues d'inoculum naturel (zones tropicales ou équatoriales pour les ectomycorhizes, déblais de mines ou de carrière, etc.). Or, s'il existe partout des champignons mycorhiziens, ils ne sont pas toujours efficaces. Mais certains, aussi bien dans le cas des endomycorhizes à vésicules et arbuscules que des ectomycorhizes, ont une efficacité remarquable. Il semble maintenant possible d'intervenir dans beaucoup de situations au moins au stade de la pépinière ou de la plantation, d'autant plus que les techniques actuelles, que ce soit en arboriculture ou en matière forestière, sont extrêmement défavorables à une bonne mycorhization (fumigation, utilisation de fongicides, niveaux de fertilité chimique beaucoup trop élevés). Le résultat en est souvent la production de plants ayant des difficultés de croissance après transplantation. De plus, on s'est aperçu récemment que certains champignons sont encore efficaces à niveau de fertilité relativement élevé et permettent une meilleure utilisation du phosphore apporté par fertilisation.

Il est donc envisageable d'améliorer la croissance des arbres forestiers par mycorhization contrôlée dans beaucoup de conditions écologiques. En France, les résultats les plus significatifs étaient *a priori* à attendre dans les conditions où la microflore naturelle ectomycorhizienne a été partiellement ou totalement détruite. Ce sont les sols cultivés, les sols abandonnés depuis peu par l'agriculture ou les landes. En réalité, d'excellents résultats ont été obtenus même lorsque l'inoculum naturel ectomycorhizien était abondant.

Dans tous les sols forestiers naturels et dans de nombreux sols de pépinières, la croissance des arbres n'est possible que s'il existe un complexe mycorhizien fonctionnel. La reprise et le comportement des plants introduits en forêt dépendent pour beaucoup des symbiotes mycorhiziens qui leur sont associés. Au moment de la transplantation, les associés fongiques proviennent essentiellement de la pépinière d'origine. Il est donc nécessaire qu'un bon complexe mycorhizien s'installe pendant la phase d'élevage en pépinière et surtout que ce complexe ne soit pas détruit au moment de la transplantation.

## LES FACTEURS POUVANT INHIBER LE DÉVELOPPEMENT DES MYCORHIZES EN PÉPINIÈRE

De nombreuses techniques couramment utilisées en pépinière forestière ont un effet néfaste plus ou moins marqué sur le développement des mycorhizes.

### La désinfection des sols et des substrats

Toutes les méthodes de désinfection : **vapeur**, **bromure de méthyle**, **dazomet** (basamid ou fungosan, matière active diméthyl 3-5 perhydrothiadiazine 1-3-5 thione 2), **metam-sodium** (fumigan ou meta sol, etc., matière active méthyl dithiocarbamate de sodium) aboutissent à l'éradication totale de l'inoculum mycorhizien jusqu'à 20 à 30 cm de profondeur. Cette éradication est cependant temporaire. La recolonisation a lieu de proche en proche à partir de la zone non désinfectée (zones latérales ou horizons profonds) et, dans le cas des champignons ectomycorhiziens, à partir des spores présentes dans l'air. Cette recolonisation est évidemment aléatoire et plus ou moins rapide. La recolonisation par les champignons ectomycorhiziens demande généralement trois mois à un an.

Dans le cas des champignons endomycorhiziens à vésicules et arbuscules qui ne produisent pas de spores dans l'air, la recolonisation peut prendre plusieurs années. Tant que la recolonisation n'a pas eu lieu, la croissance des jeunes plants est faible ou nulle. La croissance reprend en général par taches au hasard de la recolonisation. Les taches finissent ensuite par se rejoindre.

### Les fongicides

Certains fongicides utilisés en pépinière forestière ont un rôle néfaste sur le développement des mycorhizes. C'est le cas de la cycloheximide utilisée contre *Cronartium ribicola* (Hacskeylo, 1961) ou du triadiméfon, un triazole utilisé contre cette même rouille (Kelley, 1982) ou d'autres rouilles, comme la rouille fusiforme (Marx *et al.*, 1984).

Diverses publications font état du rôle néfaste du bénomyl (benlate). Notre propre expérience montre que, dans certains cas, il pourrait avoir un rôle positif sur les mycorhizes en diminuant les nécroses racinaires dues à *Fusarium oxysporum*. Des résultats analogues ont été obtenus par d'autres auteurs (Stenström *et al.*, 1997, dans ce numéro).

D'une manière générale, on admet que les fongicides systémiques sont plus nocifs que les fongicides de contact. En effet, les composés systémiques sont absorbés par la plante, en général par les parties aériennes, et migrent dans toute la plante. Un fongicide systémique, comme le triadiméfon, appliqué sur les feuilles peut être transporté dans les racines et inhiber le développement des

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

champignons mycorrhiziens. À l'opposé, un fongicide de contact restera à la surface de la feuille et n'aura pas d'effet au niveau des racines ou sera lessivé par les eaux de pluie puis décomposé par les micro-organismes du sol ou adsorbé par les colloïdes. L'utilisation des fongicides de contact à dose modérée semble compatible avec le développement des mycorhizes (Stenström *et al.*, 1997, dans ce numéro, p. 121).

### Les nématicides

Les nématicides employés dans la lutte contre les nématodes du sol, éthylène dibromide, némagon, n'ont pas d'effet direct sur les mycorhizes ou augmentent indirectement l'indice mycorhizien par amélioration de l'état sanitaire des racines.

### Les herbicides

Les herbicides semblent nettement moins néfastes que les fongicides. Il existe une très nette interaction entre types de mycorhizes et tolérance des semis aux herbicides. Par exemple, les champignons ectomycorhiziens *Hebeloma crustuliniforme* et *Paxillus involutus* améliorent la résistance des semis du Pin noir à divers herbicides. De plus, le chlorthal et l'oxyfluorène stimulent la formation de mycorhizes par *Paxillus involutus* (N'Zala, 1985).

### Les fertilisants

D'une manière générale, un niveau trop élevé d'éléments minéraux dans le sol diminue le nombre de mycorhizes. L'explication a été donnée par Marx, Hatch et Mendicino (1977). L'augmentation de la disponibilité en azote et en phosphore dans les solutions du sol accroît la synthèse protéique et la synthèse de composés phosphorylés (acides nucléiques, ADN et ARN, phosphates d'inositol, etc.), ce qui entraîne une diminution de la teneur en sucres solubles de la racine. Or la teneur en sucre soluble de la racine détermine les possibilités de nutrition de l'associé fongique et donc le taux d'infection mycorhizienne. Björkman (1948) a montré qu'il existait une bonne corrélation entre ces deux paramètres.

En pépinière classique, on aboutit rarement à l'éradication complète et définitive des ectomycorhizes. Des champignons comme *Thelephora terrestris* ont une capacité remarquable à recoloniser les sols désinfectés et à se maintenir à niveau élevé de fertilité. Ce champignon joue un rôle essentiel dans les pépinières du monde entier. Sans lui, la croissance des jeunes plants forestiers serait compromise dans la plupart des pépinières.

### Les substrats organiques ou minéraux

Sur substrat, organique ou minéral, les mycorhizes sont presque toujours absentes ou éliminées. La croissance peut cependant être maximale en raison des niveaux de fertilité extrêmement élevés qui sont utilisés.

## LA MAÎTRISE DE LA MYCORHIZATION EN PÉPINIÈRE PRODUISANT DES PLANTS À RACINES NUES

### Les ectomycorhizes

En climat tempéré, il y a peu de risques d'avoir une pépinière dépourvue de symbiotes ectomycorhiziens, sauf après abus de désinfectants ou de fongicides rémanents. Si une nouvelle pépinière est installée sur un sol non forestier, il peut y avoir un manque complet d'inoculum naturel. Il faut en

général un an avant qu'un potentiel mycorhizien suffisant se constitue. Il peut cependant être intéressant d'inoculer artificiellement des souches bien définies, efficaces et compétitives (Chevalier, 1985).

Diverses raisons peuvent inciter à inoculer une pépinière classique. La désinfection partielle ou totale des sols avant le semis se pratique pour lutter contre les pathogènes responsables des fontes de semis ou des nécroses racinaires. Nous l'avons vu, cette désinfection détruit les champignons ectomycorhiziens, ce qui entraîne des difficultés importantes de croissance. La reconstitution du complexe ectomycorhizien est aléatoire et, dans la plupart des cas, il y aurait intérêt à inoculer pour éviter l'échec des semis ou l'irrégularité de croissance pendant la première année. Aux États-Unis, 95 % des pépinières sont désinfectées avant le semis et l'inoculation de champignons ectomycorhiziens est considérée comme hautement souhaitable. Elle est maintenant utilisée à grande échelle. En 1990, dix millions de semis 1-0 de pins ont été artificiellement inoculés par *Pisolithus tinctorius* dans le Sud-Est des États-Unis (Marx, 1990, communication personnelle). Ce nombre était de dix-huit millions en 1996 (Marx, 1997, communication personnelle).

Le surcoût de l'inoculum est faible comparé au coût d'une désinfection préalable en général effectuée au bromure de méthyle. En France, la désinfection des sols des pépinières forestières est beaucoup moins pratiquée.

Une autre raison pourrait inciter à introduire artificiellement des champignons ectomycorhiziens dans une pépinière classique pourvue d'un inoculum naturel. Souvent en effet l'inoculum naturel n'est pas le meilleur possible. Il y aurait avantage à inoculer des souches plus performantes que les souches naturelles. Les photographies 1, 2, 3, 4, 5 et 6 (p. 145) illustrent les résultats obtenus à la pépinière de Peyrat-le-Château sur semis de Douglas, Épicéa, Pin sylvestre et Mélèze d'Europe.

Quelles que soient les raisons qui pourraient amener à inoculer une pépinière, l'inoculation, sauf dans de rares exceptions, n'est possible qu'après désinfection préalable du sol. En effet, la microflore naturelle occupe tout l'espace disponible ; il n'existe par conséquent pas de "niches" permettant l'installation de nouveaux micro-organismes. Lorsque la désinfection du sol est pratiquée pour lutter contre les pathogènes, le surcoût de l'inoculation mycorhizienne ne devrait pas être très important. Si la désinfection n'est pas pratiquée au préalable, elle est évidemment nécessaire au succès de l'inoculation et, dans ces conditions, le surcoût devrait être beaucoup plus important. Néanmoins, ce surcoût pourrait être compensé par l'amélioration du rendement.

#### **Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (VA)**

Les sols d'une pépinière classique sont toujours normalement pourvus en champignons endomycorhiziens VA, même si cette pépinière a été établie sur un sol cultivé. En effet, ces champignons ne sont pas spécifiques et sont normalement associés aux plantes de culture et aux adventices.

Par contre, nous l'avons déjà dit, la désinfection du sol a des effets beaucoup plus graves que dans le cas des champignons ectomycorhiziens. Après désinfection du sol, l'inoculation est alors très souhaitable, voire indispensable, pour des espèces arborées très importantes comme le Frêne, le Merisier, les Noyers et les Érables (Plenchette *et al.*, 1983).

#### **LA MAÎTRISE DE LA MYCORHIZATION SUR SUBSTRATS ORGANIQUES OU MINÉRAUX**

La majorité des substrats, organiques ou minéraux, est dépourvue d'inoculum mycorhizien, encore que la tourbe puisse parfois en contenir. Il n'est pas nécessaire d'inoculer pour obtenir une croissance normale ou une croissance élevée puisque les niveaux de fertilité sont incomparablement plus élevés qu'en pépinière classique, et peuvent être parfaitement adaptés aux besoins des plants, soit par apport initial, soit par apport continu de solutions nutritives.

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

Néanmoins, nous pensons qu'il est préférable d'inoculer ces substrats avec des champignons ectomycorhiziens ou endomycorhiziens afin d'obtenir des plants mycorhizés, plutôt que de produire des plants dépourvus de symbiotes et fragiles (sensibilité aux pathogènes, crise de transplantation accentuée).

Il n'est pas nécessaire de faire de distinction entre production en plein sur tourbe et production de plants en conteneur. Le problème est exactement le même dans les deux cas. Cependant, la production de plants en conteneur permet de préserver intégralement le système symbiotique qui aura été éventuellement introduit, ce qui ne peut avoir que des avantages au moment de la plantation.

L'inoculation des substrats, quelle que soit leur nature, est possible à condition de diminuer les niveaux de fertilité (Gagnon *et al.*, 1995). Par exemple, sur tourbe fertilisée, pour obtenir un bon indice mycorhizien avec le Hêtre et le Chêne, il est nécessaire de réduire environ par quatre la dose considérée comme optimale pour la croissance de l'arbre en l'absence de symbiotes (tableau I, ci-dessous).

Tableau I **Dose d'éléments minéraux à apporter en grammes par m<sup>3</sup> de tourbe pour obtenir une croissance optimale de plants de Hêtre et de Chêne en 1-0 sur tourbe et sous tunnel**

	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Absence de champignons ectomycorhiziens . . . . .	300	150	150
Présence de champignons ectomycorhiziens . . . . .	75	37,5	37,5

À un tel niveau de fertilité, un bon indice mycorhizien a été obtenu avec *Hebeloma crustuliniforme* ou *Paxillus involutus*, et à un degré moindre avec *Laccaria laccata*. Nos essais effectués en solution nutritive montrent que l'on peut obtenir sur résineux un bon indice mycorhizien et une croissance normale avec seulement 10 ppm de N, P et K, 20 ppm de Ca et 5 ppm de Mg (Tyminska *et al.*, 1986).

La désinfection préalable des substrats organiques ou minéraux n'est pas nécessaire puisqu'ils sont dépourvus d'inoculum initial. La situation est moins simple dans le cas de substrats utilisés pendant plusieurs années consécutives comme la tourbe. L'inoculation du Hêtre et du Chêne par *Paxillus involutus* sur une tourbe utilisée pendant plusieurs années se fait parfaitement sans désinfection préalable, alors que l'inoculation par *Hebeloma crustuliniforme* ne peut se faire sans désinfection (Garbaye et Perrin, 1986).

L'utilisation d'engrais lentement solubles semble une excellente solution sur des substrats comme la tourbe ou la tourbe mélangée à des écorces. Ces engrais permettent de limiter les niveaux instantanés d'éléments minéraux présents dans la solution saturant ces substrats.

## LA PRODUCTION D'INOCULUM MYCORHIZIEN À GRANDE ÉCHELLE

L'inoculation en routine des pépinières ne peut s'envisager que s'il est possible de produire de l'inoculum mycorhizien en grande quantité et à bas prix. Il est nécessaire de distinguer encore l'inoculum ectomycorhizien de l'inoculum endomycorhizien VA.

### La production d'inoculum ectomycorhizien

Nous ne parlerons pas des techniques anciennes d'inoculation (sols prélevés dans une plantation, plants ou racines préalablement mycorhizés). Elles ont l'avantage d'être simples et peu coûteuses, mais ne permettent pas de contrôler réellement les symbiotes introduits. De plus, elles entraînent des risques d'introduction de micro-organismes pathogènes. Nous ne parlerons pas non plus de

l'inoculation par carpophores ou par spores. Cette technique n'a pas les inconvénients des précédentes, mais n'est applicable qu'à des cas particuliers (*Tuber melanosporum*, *Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon vinicolor* et *Rhizopogon luteolus*).

Nous traiterons ici uniquement de l'inoculation par culture pure de mycélium. Cette technique est applicable à beaucoup de champignons mais exclut malheureusement tous ceux qui ne peuvent être cultivés, ou qui ne se développent que très lentement en culture pure.

Deux possibilités sont actuellement mises en pratique : la production d'inoculum sur substrat solide et la production d'inoculum en fermenteur avec inclusion dans un polymère, qui est en général un polysaccharide (extrait d'algue ou alginate).

- *La production d'inoculum ectomycorhizien sur substrat solide*

Nous l'avons vu en introduction, cette technique a été proposée pour la première fois par Bokor en 1954. Elle consiste à cultiver le mycélium sur un mélange de tourbe et de vermiculite (variété de mica) imprégné par une solution nutritive. Les solutions les plus utilisées sont celles de Melin-Norkran et de Pachlewski. Elles peuvent être avantageusement remplacées par une solution de moût de brasserie diluée dix fois. Le problème est de passer du laboratoire à l'échelle industrielle. La tentative d'utilisation des fermenteurs à substrat solide n'a pas été couronnée de succès. Actuellement, aux États-Unis, on met en œuvre la technique utilisée pour la production de blanc de champignon de couche. L'inoculum est produit directement dans des sacs plastiques de 5 à 10 litres contenant le substrat saturé et pourvus d'une face à membrane permettant les échanges gazeux, tout en garantissant le maintien de la stérilité du milieu. Une société américaine, Mycorr-Tech Incorporated (440 Wn Pitt Way Pittsburgh, PA 15238, USA), produit maintenant commercialement de l'inoculum.

En production de plants à racines nues, il faut utiliser de 0,4 à 2 litres d'inoculum par mètre carré pour obtenir une bonne infection mycorhizienne. L'inoculum est mélangé au sol désinfecté juste avant le semis. Pour les substrats, on utilise un volume d'inoculum compris entre 1/5<sup>e</sup> et 1/10<sup>e</sup> du volume total. Suivant la technique utilisée, le coût de l'inoculation varie de 0,1 à 2 centimes par plant.

- *La production d'inoculum ectomycorhizien en fermenteur sur milieu liquide avec inclusion dans un polymère*

Cette méthode consiste à produire le mycélium en fermenteur sur milieu liquide, puis à l'inclure dans un polymère comme cela a été proposé par Cheetham *et al.* (1979) pour les *Saccharomyces*, par Dommergues *et al.* (1979) pour les bactéries et par Jung (1979) pour différents micro-organismes. Elle a ensuite été développée pour les champignons ectomycorhiziens et expérimentée en pépinière avec *Laccaria bicolor* S 238 N (Le Tacon *et al.*, 1983). Une charge à base d'argile ou de tourbe permet de stabiliser le produit final et d'obtenir un inoculum solide constitué de billes de 2 mm de diamètre environ. Comparé à l'inoculum produit directement sur substrat solide, l'inoculum produit en fermenteur et inclus dans un gel stabilisé améliore de façon significative la croissance des semis de Douglas et d'Épicéa. La supériorité de ce type d'inoculum pourrait être due à la plus grande activité métabolique du mycélium et à la protection qu'offrent les polymères après incorporation dans le sol (Le Tacon *et al.*, 1985). Cette technique a été adoptée en France par le Groupement d'Intérêt économique (GIE) Forêt Mycorhizes. En production de plants à racines nues, il est préconisé d'utiliser, par mètre carré, 1 litre d'inoculum contenant de 50 à 100 mg de mycélium par litre (équivalent poids sec).

### **La production d'inoculum de champignons endomycorhiziens à vésicules et arbuscules**

Il est actuellement impossible de cultiver ces champignons en culture pure. Il est cependant possible de tourner la difficulté. Si on ne dispose pas de souches identifiées, l'inoculation d'un sol

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

désinfecté ou d'un substrat artificiel peut se faire en incorporant une certaine proportion de sol contenant des propagules (spores ou racines mycorhizées) non identifiées.

Si on dispose de souches identifiées (suspension de spores, racines infectées, sol au préalable désinfecté ou substrat artificiel contenant des spores), il est possible de multiplier cet inoculum en conditions très contrôlées, sur substrat désinfecté avec une plante-hôte (Lovato *et al.*, 1992 ; Lovato *et al.*, 1994). Les racines infectées ou les spores ainsi produites servent d'inoculum. Diverses sociétés, dont une française (Biorhize, 9, avenue Frémiet, 75016 Paris), commercialisent de l'inoculum endomycorhizien.

Il est maintenant possible de produire, au moins à petite échelle, de l'inoculum endomycorhizien VA en conditions entièrement axéniques en utilisant des racines transformées par *Agrobacterium* (Mugnier et Mosse, 1987 ; Bécard et Fortin, 1988 ; Bécard *et al.*, 1992 ; Declerck *et al.*, 1996). L'encapsulation dans de l'alginate de propagules infectieuses de champignons endomycorhiziens à vésicules et arbuscules est également possible (Diem *et al.*, 1981 ; Strullu et Plenchette, 1990).

## EFFET APRÈS TRANSPLANTATION EN FORÊT DES SYMBIOTES MYCORHIZIENS INOCULÉS EN PÉPINIÈRE

Si l'inoculation en pépinière de champignons mycorhiziens sélectionnés n'avait comme seul effet qu'une amélioration de la croissance pendant la phase d'élevage des plants, l'intérêt de cette technique serait limité. La production de plants forestiers bien mycorhizés à la sortie de la pépinière est une condition essentielle de la réussite d'une plantation.

Des plants non mycorhizés introduits dans un milieu à faible fertilité, cas général des sols des plantations forestières, ont des difficultés à s'installer et peuvent plus ou moins rapidement mourir s'ils ne rencontrent pas rapidement des symbiotes mycorhiziens. Les difficultés d'infection varient suivant le degré d'artificialisation du milieu. Cependant, de nombreux essais ont fait maintenant la preuve de l'avantage d'introduire des plants mycorhizés quelles que soient les conditions de plantation.

Le type de symbiotes n'est pas indifférent et de nombreux essais ont également montré que la nature de l'associé fongique pouvait avoir un rôle important sur la survie des plants, sur la durée de la crise de transplantation et sur la performance des plants longtemps après la plantation.

Pour illustrer les possibilités de la mycorhization contrôlée en France, nous allons décrire quatre dispositifs expérimentaux : le dispositif de Ballandeix dans le Limousin sur Douglas, le dispositif de Montaren-Saint-Médières dans le Gard sur Cèdre de l'Atlas, le dispositif de Bouxières-aux-Bas sur Chêne pédonculé et le dispositif de Verdun sur Érable sycomore et Frêne en Lorraine. Ces essais sont ponctuels et n'ont pas été répétés dans suffisamment de conditions écologiques pour être généralisés. Il existe cependant une exception avec le Douglas qui a fait l'objet d'essais plus nombreux. Nous résumerons les résultats obtenus avec le Douglas et *Laccaria bicolor* S 238 N en Europe (France, Espagne et Grande-Bretagne) à partir d'une vingtaine d'essais dont le plus ancien est Ballandeix.

### Essai de Ballandeix (Haute-Vienne) sur Douglas (Le Tacon, Bouchard)

Trois types de plants de Douglas ont été produits à racines nues en 2-0 à la pépinière de Peyratle-Château : plants naturellement mycorhizés par *Thelephora terrestris*, plants inoculés en avril 1983 par *Laccaria bicolor* S 238 N (souche isolée par Trappe et Molina en 1976 dans l'Oregon) ou *Laccaria bicolor* 81 306 (souche isolée par Lamour et Le Tacon dans le Limousin en 1981) après désinfection

du sol. À la sortie de la pépinière, en 1985, les trois types de plants étaient bien mycorhizés par ces trois symbiotes différents, mais légèrement contaminés par *Rhizopogon subareolatus*. Ces trois types de plants ont été transplantés en avril 1985 (dispositif en blocs éclatés avec quatre répétitions, placeaux unitaires de 36 m<sup>2</sup>, densité initiale de plantation 1 × 1 m, soit 49 arbres par placeau unitaire, zone tampon de 5 m entre chaque placeau), après labour, sur une lande à Fougère à Chênes et Bouleaux, située à 650 mètres d'altitude au lieu-dit Ballandeix, sur la commune de Peyratle-Château (Haute-Vienne). La pluviosité annuelle est de 1 300 mm ; le sol, de type brun acide humifère développé sur granite, a été enrichi par une longue mise en culture. Onze ans après la transplantation, le traitement initialement inoculé par la souche américaine de *Laccaria bicolor* avait toujours une hauteur moyenne significativement supérieure à celle du traitement témoin (figure 1, ci-dessous), bien que les racines des différents traitements interfèrent et que la souche S 238 soit présente dans l'ancienne zone tampon. La hauteur moyenne du traitement initialement inoculé par la souche européenne de *Laccaria bicolor* a significativement différé de la hauteur moyenne du traitement témoin pendant huit ans. La différence de hauteur moyenne n'était plus significative en 1995. En 1990 et 1992, deux éclaircies ont été pratiquées dans le dispositif qui n'avait pas été prévu pour durer aussi longtemps (placeaux de trop faible surface et densité de plantation beaucoup trop élevée). Depuis l'origine, soit onze années de végétation après la transplantation et treize après l'inoculation, les témoins ont produit en moyenne par placeau 2 046 dm<sup>3</sup> de bois, les arbres inoculés par la souche européenne de *Laccaria bicolor* 2 521 dm<sup>3</sup> et les arbres inoculés par la souche américaine de *Laccaria bicolor* 3 001 dm<sup>3</sup> (figure 2, p. 139). Les différences sont statistiquement significatives entre les trois traitements. L'inoculation initiale par les deux souches de *Laccaria bicolor* a permis, depuis l'origine, un gain respectif en volume par rapport au témoin de 23 % et 46 %. Les éclaircies de 1990 et 1992 ont été insuffisantes dans les placeaux initialement inoculés par *Laccaria bicolor*, ce qui a entraîné une compétition accrue pour l'eau et les éléments minéraux entre les arbres de ces traitements, en raison de l'importance de la biomasse qui était beaucoup plus élevée que dans les témoins. Une nouvelle éclaircie, plus forte, a été effectuée en 1996 et semble à nouveau entraîner une différenciation entre les témoins et les arbres initialement inoculés (mesures en cours), malgré l'interpénétration des systèmes racinaires entre les différents traitements. Il apparaît ainsi nécessaire de pratiquer une sylviculture vigoureuse dans les peuplements issus de plants initialement mycorhizés par *Laccaria bicolor* S 238 N afin de conserver le bénéfice de l'inoculation initiale pendant un temps suffisamment long.

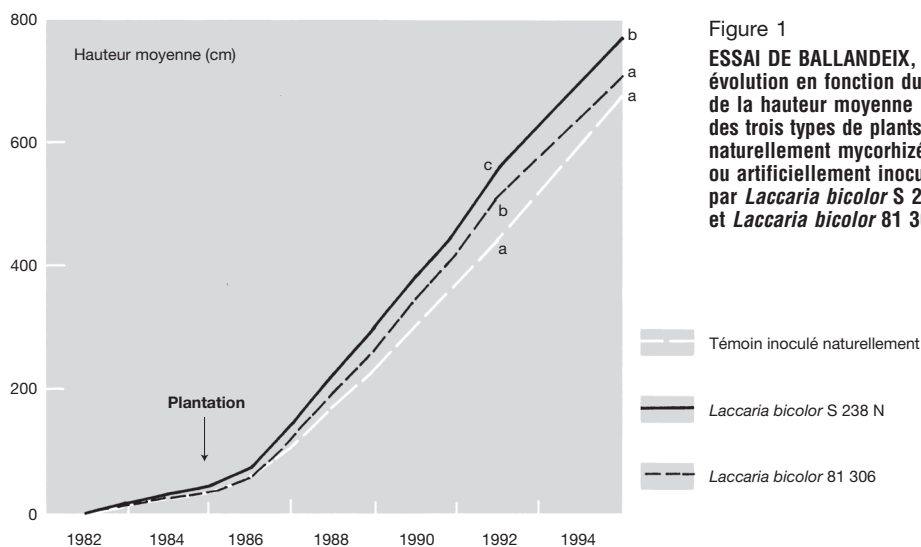
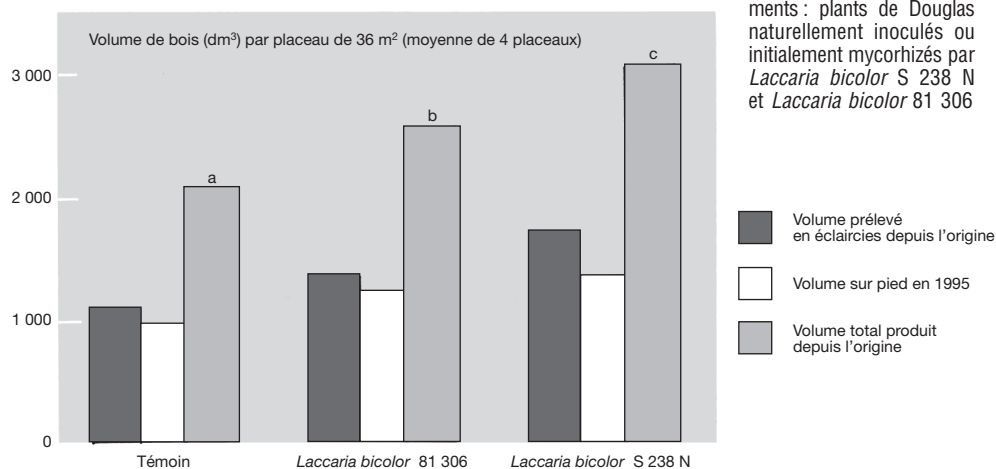


Figure 1  
**ESSAI DE BALLANDEIX,**  
 évolution en fonction du temps  
 de la hauteur moyenne  
 des trois types de plants de Douglas,  
 naturellement mycorhizés  
 ou artificiellement inoculés  
 par *Laccaria bicolor* S 238 N  
 et *Laccaria bicolor* 81 306

Figure 2 **ESSAI DE BALLANDEIX, volume total de bois en dm<sup>3</sup> produit en 1995 depuis l'origine, volume de bois en dm<sup>3</sup> prélevé en éclaircie depuis l'origine, volume de bois sur pied en 1995 en dm<sup>3</sup>**



### Ensemble des essais de mycorhization contrôlée effectués sur Douglas issus de semis en Europe

Le tableau II (p. 140) récapitule l'ensemble des essais de mycorhization contrôlée effectués en Europe sur Douglas issus de semis après transplantation.

L'analyse de l'ensemble de ces expériences permet de tirer quelques conclusions générales relatives à l'inoculation contrôlée du Douglas. Aucun des essais n'a donné de résultat significativement négatif, à l'exception d'un seul, l'essai de Royères en Limousin. Les raisons en ont été parfaitement identifiées : nous avons associé au Douglas une souche d'*Hebeloma cylindrosporum* efficace en pépinière, mais inadaptée au sol de plantation, qui était une lande à Callune. La microflore naturelle de la pépinière d'origine, en l'occurrence essentiellement *Thelephora terrestris*, a survécu après transplantation, alors qu'*Hebeloma cylindrosporum* a immédiatement disparu. Les plants initialement inoculés par *Hebeloma cylindrosporum* se sont retrouvés dépourvus de mycorhizes et par conséquent en grande difficulté de croissance. Dix ans après la transplantation, ils n'avaient toujours pas retrouvé une croissance normale (Le Tacon *et al.*, 1992).

En revanche, la souche américaine de *Laccaria bicolor* S 238 N est particulièrement efficace sur Douglas et donne en moyenne des résultats positifs sur la croissance du Douglas après transplantation. Il est cependant nécessaire qu'un certain nombre de conditions soient remplies. Les plants doivent être issus de semis, produits en 1 + 1, correctement mycorhizés par cette souche à la sortie de la pépinière, et installés dans des conditions stationnelles convenables. Il existe en effet un certain nombre de cas où elle ne procure pas de gains après transplantation. Elle est inefficace ou peu efficace en Grande-Bretagne, comme d'ailleurs toute autre espèce de champignons ectomycorhiziens inoculés en pépinière. L'absence de réponse à la mycorhization contrôlée dans la plupart des essais effectués en Grande-Bretagne n'a pas, pour l'instant, d'explication. Nous pouvons seulement supposer que la longue mise en culture de ces sols et leur niveau élevé de fertilité ont un rôle dans cette absence de réponse.

En France, la réponse à l'inoculation initiale par *Laccaria bicolor* S 238 N est en général bonne sauf quand le degré de colonisation à la sortie de la pépinière est faible ou nul (Abreschviller) ou lorsque les plants ont été introduits dans des sols anciennement cultivés abandonnés depuis peu par

l'agriculture et colonisés par des graminées (Walschbronn). Quelques essais ne donnent pas de réponse positive pour des raisons inconnues (Quenouille, Auzoux, Châteldon) qui sont probablement à rechercher dans la qualité de l'inoculum naturel (efficacité et/ou compétitivité). Les meilleures conditions de réponse à l'inoculation du Douglas par *Laccaria bicolor* S 238 N semblent être les sols acides (pH compris entre 3,8 et 5,5), de moyenne altitude (300 à 800 m), développés sur granite, grès et éventuellement limons, occupés soit par des landes à fougères soit par des peuplements feuillus naturels primaires ou secondaires.

Nous avons démontré, par des travaux d'écologie moléculaire, que, dans ces conditions et malgré la compétition des souches locales, *Laccaria bicolor* S 238 N pouvait survivre et continuer à coloniser les nouvelles racines des arbres initialement inoculés au moins dix ans après la transplantation (Di Battista, 1997 ; Selosse *et al.*, 1998).

Tableau II **Résumé des résultats après transplantation de 31 essais de mycorhization contrôlée effectués en Europe sur Douglas (France, Espagne et Grande-Bretagne)**

ESPAGNE IRTA (Parladé, Pera et Alvarez, 1997)	Âge après plantation	Symbiote	Hauteur moyenne des plants témoins (cm)	Hauteur moyenne des plants inoculés (cm)	Gain en hauteur moyenne (%)	Signification au seuil de 5 %
<b>Pays basque</b>						
Zegama . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	177,6	215,5	+ 21,0 %	* pendant 2 ans NS ensuite
Zegama . . . . .	4 ans	<i>Rhizopogon</i> <i>vinicolor</i>	90,1	96,4	+ 6,9 %	NS
Lagran 1 . . . . .	4 ans	<i>Melanogaster</i> <i>ambiguus</i>	96,1	141,1	+ 46,8 %	*
Lagran 1 . . . . .	4 ans	<i>Rhizopogon</i> <i>subareolatus</i>	90,7	100,9	+ 11,2 %	* pendant 2 ans NS ensuite
Lagran 2 . . . . .	4 ans	<i>Rhizopogon</i> <i>subareolatus</i>	65,6	78,8	+ 20,0 %	*
Lagran 1 . . . . .	4 ans	<i>Rhizopogon</i> <i>colossus</i>	85,9	120	+ 39,6 %	*
<b>Catalogne</b>						
Montseny . . . . . (plants produits à Peyrat-le-Château France)	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	163,6	195,4	+ 19,4 %	*
<b>Galice</b>						
Pontevedra . . . . . (plants produits dans Les Pépinières du Morvan France)	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	174	187,8	+ 7,9 %	* pendant 1 an NS ensuite
Pontevedra . . . . . (plants produits à Peyrat-le-Château France)	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	135	184,36	+ 36,5 %	* pendant 2 ans NS ensuite

**Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière**

D'autre part, depuis les premiers essais, la technique de production de plants mycorhizés a progressé (Génére *et al.*, 1997, dans ce numéro, p. 155). Nous préconisons maintenant l'utilisation de plants 1 + 1 conditionnés en sac et conservés au froid avant transplantation, ce qui permet la production d'un excellent système racinaire et une parfaite conservation des mycorhizes, comme le démontre l'essai de Siran (Cemagref). Cette technique est maintenant adoptée par le Groupement d'Intérêt économique (GIE) Forêt Mycorhizes (F-21290 Leuglay), qui exploite depuis le 27 décembre 1994, une licence INRA. Ce GIE regroupe quatre pépiniéristes (Les Pépinières du Morvan, Les Pépinières Robin, Les Pépinières Clémendot et Les Pépinières Naudet). Notons également qu'une souche française de *Laccaria bicolor* (81 306) isolée sous plantation de Douglas dans le Limousin donne des résultats intéressants, quoique inférieurs à ceux de la souche américaine.

Tableau II (suite)

FRANCE INRA	Âge après plantation	Symbiote	Hauteur moyenne des plants témoins (cm)	Hauteur moyenne des plants inoculés (cm)	Gain en hauteur moyenne (%)	Signification au seuil de 5 %
<b>Vosges</b>						
Brouvelieures . . . . .	8 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	303,3	368,17	+ 21,3 %	*
Sainte-Hélène . . . . .	8 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	333,59	407,16	+ 22,0 %	*
Abreschviller . . . . .	5 ans	<i>Rhizopogon</i> <i>vinicolor</i>	258,0	267,3	+ 3,6 %	NS
Walschbronn . . . . .	7 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	280,7	262,3	- 6,5 %	NS
<b>Limousin</b>						
Ballandeix . . . . .	11 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	671,75	766	+ 14,0 %	*
Ballandeix . . . . .	11 ans	<i>Laccaria bicolor</i> 81 306	671,75	703	+ 4,7 %	* pendant 8 ans après la plantation NS après 11 ans
Longechaud	6 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	280,7	304	+ 8,3 %	NS
Quenouille . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	190,1	187,9	- 1,1 %	NS
Royères . . . . .	10 ans	<i>Hebeloma</i> <i>cyindrosporum</i>	373	265	- 28,9 %	*
Guise . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	261	298	+ 14,0 %	*
Saint-Brisson . . . . . conteneurs	8 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	515,49	595,91	+ 15,6 %	*
Saint-Brisson . . . . . conteneurs	8 ans	<i>Laccaria bicolor</i> 81 306	515,49	598,52	+ 16,10 %	*
Saint-Brisson . . . . . racines nues	8 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	522,71	543,23	+ 3,9 %	* pendant 5 ans après la plantation NS ensuite

Tableau II (suite)

FRANCE CEMAGREF (Général et Amirault)	Âge après plantation	Symbiote	Hauteur moyenne des plants témoins (cm)	Hauteur moyenne des plants inoculés (cm)	Gain en hauteur moyenne (%)	Signification au seuil de 5 %
<b>Limousin</b>						
Auzoux . . . . .	3 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	118,4	115,7	- 2,2 %	NS
Chateldon . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	283,8	291,6	+ 2,7 %	NS
Pellanges . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	290,2	303	+ 4,4 %	NS
Salon-la-Tour . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	200,5	235,4	+ 17,4 %	*
Luthenay-Uxeloup . . . . .	2 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	72,3	92,9	+ 28,5 %	*
<b>Auvergne</b>						
Siran . . . . . comparaison technique tradition- nelle et inoculation par S 238 N associée à un stockage à 1 °C en sac	2 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	67,8	85	+ 25,4 %	*
<b>Normandie</b>						
Varangebec . . . . .	5 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	189,3	197,4	+ 4,2 %	NS
<b>Midi-Pyrénées</b>						
Verdun-en-Lauragais	3 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	104,7	116	+ 10,8 %	NS

ROYAUME-UNI (Walker, 1997 communication personnelle)	Âge après plantation	Symbiote	Hauteur moyenne des plants témoins (cm)	Hauteur moyenne des plants inoculés (cm)	Gain en hauteur moyenne (%)	Signification au seuil de 5 %
<b>Essai</b>						
NYM 43P89 . . . . . (Yorkshire)	6 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	265	274	+ 3,3 %	NS
		<i>Thelephora</i> <i>terrestris</i> R 34	265	276	+ 4,1 %	NS
		<i>Thelephora</i> <i>terrestris</i> R 38	265	275	+ 3,7 %	NS
		<i>Laccaria proxima</i>	265	275	+ 3,7 %	NS
<b>Essai</b>						
NYM 58P91 . . . . . (Yorkshire)	4 ans	<i>Laccaria bicolor</i> S 238 N	157	154	- 1,9 %	NS

En Espagne, aussi bien au Pays basque qu'en Galice ou en altitude en Catalogne, les performances de *Laccaria bicolor* S 238 N sont remarquables (Parladé *et al.*, 1997, dans ce numéro, p. 163). D'autres champignons et en particulier des espèces de *Rhizopogon*, spécifiques du Douglas, semblent très prometteurs (Parladé *et al.*, 1997, dans ce numéro, p. 163).

**Essai de Bouxières-aux-Bas (Meurthe-et-Moselle) sur Chêne rouvre, *Quercus petraea* (Garbaye et Churin, 1997)**

Trois types de plants de Chêne rouvre ont été produits à racines nues en un an à la pépinière de l'Office national des Forêts de Clairlieu sur tourbe fertilisée et sous tunnel plastique : plants naturellement inoculés par *Thelephora terrestris*, plants inoculés en avril 1987 par *Hebeloma crustuliniforme* (souche STH isolée par Garbaye sous feuillus à Sainte-Hélène, Vosges, 1981) ou par *Paxillus involutus* (souche NAU isolée par Garbaye sous feuillus dans une pépinière en 1981) après désinfection de la tourbe au bromure de méthyle.

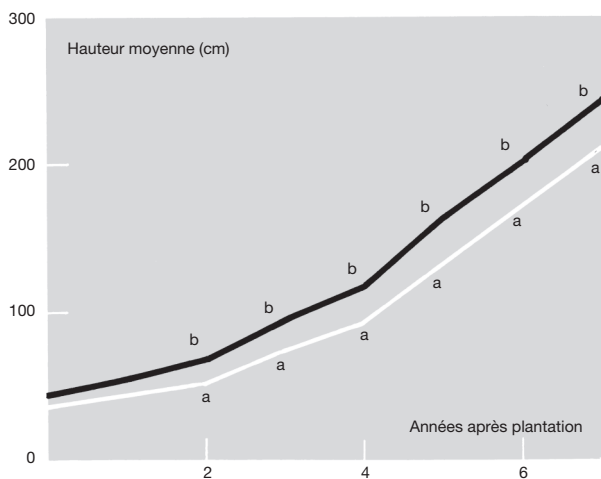


Figure 3  
**ESSAI DE BOUXIÈRES-AUX-BAS, évolution en fonction du temps de la hauteur totale moyenne des plants de Chêne, naturellement mycorhizés ou artificiellement inoculés par *Paxillus involutus***

— *Paxillus involutus*  
 — Témoin

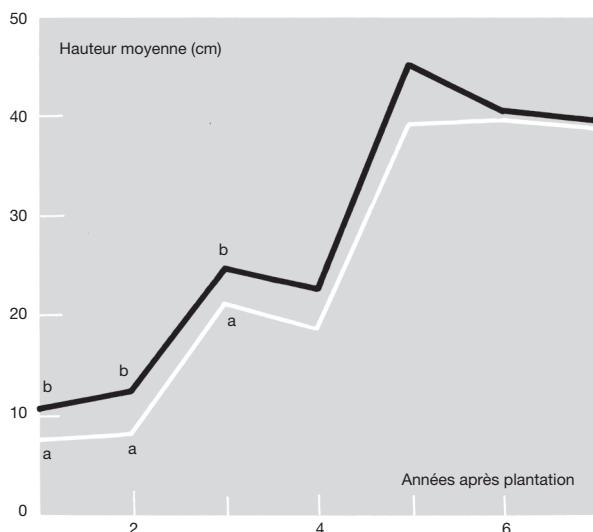


Figure 4  
**ESSAI DE BOUXIÈRES-AUX-BAS, évolution en fonction du temps de la pousse annuelle moyenne des plants de Chêne, naturellement mycorhizés ou artificiellement inoculés par *Paxillus involutus***

— *Paxillus involutus*  
 — Témoin

À la sortie de la pépinière, en 1988, les plants inoculés étaient mycorhizés à 40 % par les symbiotes introduits et contaminés par *Thelephora terrestris*. Les témoins étaient entièrement colonisés par *Thelephora terrestris*. Ces trois types de plants ont été transplantés en avril 1988 (dispositif en blocs éclatés avec quatre répétitions), après labour, sur une ancienne terrasse de la Moselle située à 300 mètres d'altitude au lieu-dit Bouxières-aux-Bas après coupe à blanc du peuplement feuillu originel. La pluviosité annuelle est de 800 mm ; le sol est de type brun lessivé à mull acide sur limons. Nous n'avons jamais observé de différences de croissance entre les témoins et les plants initialement mycorhizés par *Hebeloma crustuliniforme*. Par contre, les plants initialement mycorhizés par *Paxillus involutus* ont toujours eu une croissance supérieure aux deux autres traitements y compris pendant la phase de pépinière. Cette différence de croissance s'est maintenue avec le temps (figures 3 et 4, p. 143). En 1994, soit six ans après la transplantation et sept après l'inoculation, le gain de croissance en hauteur est de 15,7 % et le gain de croissance en diamètre de 31,8 %. En indice de volume (D<sup>2</sup>H), l'inoculation initiale par *Paxillus involutus* a procuré un gain de 98 %. Un autre essai confirme l'intérêt de *Paxillus involutus* pour le Chêne (Garbaye et Churin, 1997). De nouveaux essais sont en cours avec de nouvelles souches. Un réseau d'essais identique à celui qui a été mis en place pour le Douglas devrait progressivement voir le jour. Ce n'est qu'au vu des résultats d'un tel réseau qu'il sera ou non possible de conseiller le développement de la mycorhization contrôlée du Chêne et du Hêtre.

#### **Essai de Montaren-Saint-Médiers (Gard) sur Cèdre de l'Atlas (Mousain et Argillier)**

En 1992, quatre types de plants de Cèdre de l'Atlas ont été produits en conteneurs à la pépinière du Cemagref des Milles (Bouches-du-Rhône) de la façon suivante :

– TF1 : Cèdres non inoculés et fertilisés avec 25 apports de 25 ml par conteneur d'une solution nutritive N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 11-6-12 à 0,5 %.

– TF2 : Cèdres non inoculés et fertilisés avec 50 apports de 25 ml par conteneur d'une solution nutritive N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 11-6-12 à 0,5 %.

– MF1 : Cèdres mycorhizés par *Tuber albidum* et fertilisés avec 25 apports de 25 ml par conteneur d'une solution nutritive N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 11-6-12 à 0,5 %.

– MF2 : Cèdres mycorhizés par *Tuber albidum* et fertilisés avec 50 apports de 25 ml par conteneur d'une solution nutritive N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 11-6-12 à 0,5 %.

Après une saison de végétation en pépinière, aucune différence significative n'existait entre les traitements en terme de croissance en hauteur. Cependant dans les deux traitements inoculés, le taux de mycorhization était élevé, alors qu'il était nul dans les traitements non inoculés. À l'automne 1992, les plants en conteneurs ont été transplantés à Montaren-Saint-Médiers à une altitude de 265 m dans le Gard, sur une rendzine développée sur le calcaire du Barrémien supérieur à faciès urgonien.

#### **PÉPINIÈRE DE PEYRAT-LE-CHÂTEAU, SEMIS DE SIX MOIS DE DOUGLAS, ÉPICÉA, PIN SYLVESTRE ET MÊLÈZE D'EUROPE.**

Photo 1 Microflore naturelle sans désinfection du sol.

Photo 2 Sol désinfecté au bromure de méthyle et non recolonisé par des champignons ectomycorhiziens.

Photo 3 Sol désinfecté au bromure de méthyle et commençant à être recolonisé par *Thelephora terrestris*.

Photo 4 Sol désinfecté au bromure de méthyle et entièrement recolonisé naturellement par *Thelephora terrestris*. Les pathogènes du sol ayant été au moins partiellement éradiqués par la désinfection, la croissance est meilleure que sans désinfection du sol.

Photo 5 Sol désinfecté au bromure de méthyle et inoculation par *Pisolithus tinctorius*, uniquement efficace sur Pin sylvestre et Mélèze.

Photo 6 Sol désinfecté au bromure de méthyle et inoculation par *Laccaria bicolor* S 238 N.

Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière



Photos F. LE TACON

Aucune différence significative n'a été observée sur le taux de reprise qui a été très élevé quel que soit le traitement. Par contre, dès la première année suivant la transplantation, les deux traitements inoculés ont eu une croissance supérieure aux deux traitements non inoculés (tableau III, ci-dessous). La croissance a été identique dans tous les traitements l'année suivante, puis les différences se sont à nouveau accentuées (figure 5, ci-dessous). Ces résultats prometteurs demandent évidemment à être confirmés dans des conditions différentes. La constitution d'un réseau d'essais est là aussi indispensable avant tout développement commercial.

Tableau III **Essais de Montaren-Saint-Médiars : accroissement annuel en cm par plant**  
 Les moyennes d'une même ligne affectées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ( $p < 0,05$  test de Scheffe)

Années	TF1	TF2	MF1	MF2
1992-1993 . . . . .	12,2 a	11,4 a	15,5 b	15,3 b
1993-1994 . . . . .	12,8 a	12,3 a	14,0 a	13,9
1994-1995 . . . . .	8,7 a	9,1 ab	11,2 c	10,9 bc
1995-1996 . . . . .	16,2 a	19,0 ab	19,7 b	21,3 b
1992-1996 . . . . .	50,5 a	52,1 a	60,6 b	61,8 b

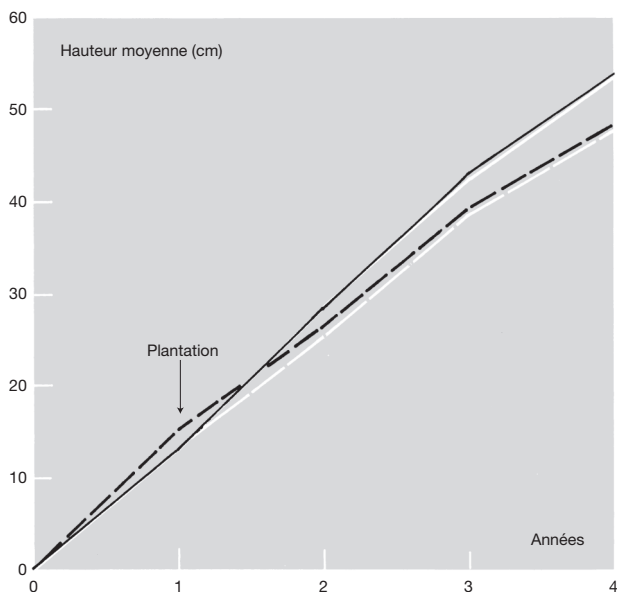


Figure 5  
**ESSAI DE MONTAREN-SAINT-MÉDIARS, évolution en fonction du temps de la hauteur totale moyenne des plants de Cèdre, naturellement mycorhizés après plantation ou artificiellement inoculés en pépinière par *Tuber albidum***

**Essai de Verdun (Meuse) sur Érable sycomore et Frêne (Le Tacon *et al.*, 1992)**

Des semis de Frêne et d'Érable sycomore ont été mycorhizés ou non en conteneur par un champignon endomycorhizien à vésicules et arbuscules *Glomus mosseae* après désinfection du sol de pépinière. À la fin de la phase de pépinière, l'effet de l'inoculation était très significatif pour les deux espèces. Les jeunes plants ont été transplantés en conteneur en forêt domaniale de Verdun sur un sol brun colluvial, précédemment occupé par une frênaie. Ce sol contenait une microflore naturelle constituée essentiellement par *Glomus monosporum*. La croissance des deux espèces a été suivie pendant six ans. La première année, les plants d'Érable sycomore non mycorhizés ont subi une crise

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

de transplantation sévère, alors que les plants préalablement mycorhizés en pépinière ont immédiatement démarré (figure 6, ci-dessous). Les plants non mycorhizés au départ se sont ensuite associés à la microflore naturelle (*Glomus monosporum*) et ont acquis un potentiel de croissance en hauteur équivalent à celui des plants initialement mycorhizés par *Glomus mosseae*. La première année, les plants de Frêne non mycorhizés ont subi une crise de transplantation encore plus importante (figure 7, ci-dessous). Ils se sont ensuite également associés à *Glomus monosporum*, mais n'ont retrouvé un potentiel de croissance équivalent à celui des plants initialement mycorhizés que six ans après la plantation (figure 7, ci-dessous).

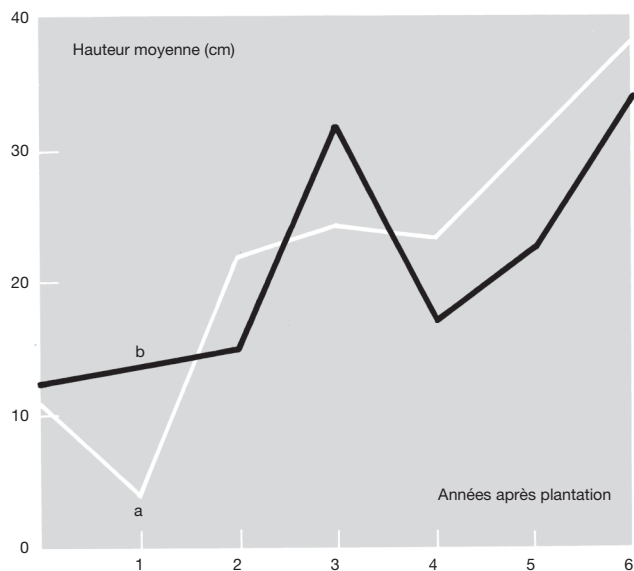


Figure 6  
**ESSAI DE VERDUN,**  
 évolution en fonction du temps  
 de la pousse annuelle moyenne  
 des deux types de plants d'Érable  
 sycomore, naturellement mycorhizés  
 après plantation ou artificiellement  
 inoculés en pépinière  
 par *Glomus mosseae*

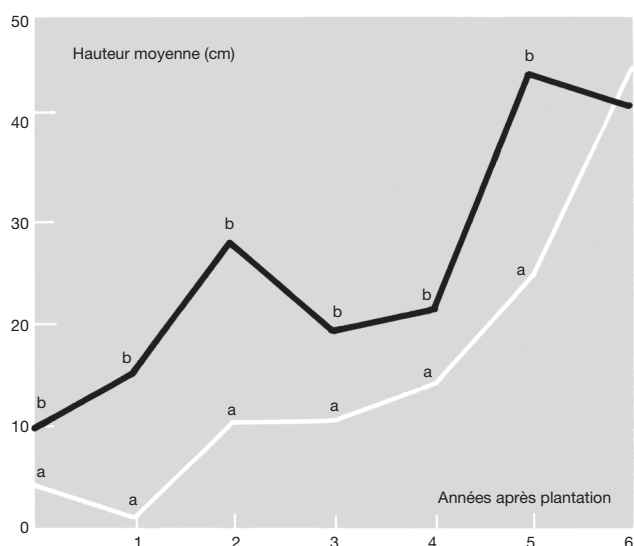


Figure 7  
**ESSAI DE VERDUN,**  
 évolution en fonction du temps  
 de la pousse annuelle moyenne  
 des deux types de plants de Frêne,  
 naturellement mycorhizés après plantation  
 ou artificiellement inoculés en pépinière  
 par *Glomus mosseae*



7



8



9

### GIE FORÊT MYCORHIZES

Photos 7 et 8 **Pépinières Clémendot.**  
Inoculation à grande échelle par *Laccaria bicolor*  
S 238 N produit en fermenteur et inclus  
dans des billes d'alginate.

Photos Ch. FLON

Photo 9 **Pépinières Naudet.**  
Semis de Douglas après inoculation  
de *Laccaria bicolor* S 238 N encapsulé.

Photo D. BOUCHARD

Photo 10 **Pépinières du Morvan.**  
Semis 2-0 de Douglas non inoculés à droite  
et inoculés à gauche par *Laccaria bicolor* S 238 N.  
La fructification de *Laccaria bicolor* S 238 N  
est abondante.

Photo J.-L. CHURIN

Photo 11 **Pépinières Clémendot.**  
Production de Douglas 1 + 1, inoculés au centre par  
*Laccaria bicolor* S 238 N et naturellement inoculés  
de part et d'autre.

Photo D. BOUCHARD



10



11



12



13

**ESSAI DE BALLANDEIX  
trois ans après la plantation**

Photo 12 Plants témoins de Douglas colonisés par la microflore naturelle de la pépinière d'origine et la microflore naturelle du site de plantation.

Photo 13 Plants de Douglas initialement inoculés par *Laccaria bicolor* 81 306 d'origine européenne.

Photo 14 Plants de Douglas initialement inoculés par *Laccaria bicolor* S 238 N d'origine américaine.

Photos J.-L. CHURIN



14

**ESSAI DE VERDUN  
un an après la plantation**

Photo 15 Plants de Frêne 1-0 produits en conteneurs et initialement non inoculés.

Photo 16 Plants de Frêne 1-0 produits en conteneurs et initialement inoculés par un champignon endomycorhizien à vésicules et arbuscules, *Glomus mosseae*.

Photos F. LE TACON



15



16

## CONCLUSIONS

Il est essentiel qu'un bon complexe mycorhizien s'installe pendant la phase d'élevage en pépinière, et que ce complexe ne soit pas détruit au moment de la transplantation. De ce point de vue, la production de plants en conteneur est supérieure à la production de plants à racines nues. Le conditionnement en sac et au froid des plants produits à racines nues permet cependant une bonne préservation du système symbiotique (Al Abras *et al.*, 1988) et une nette amélioration de la reprise (Génére, 1997).

Dans la plupart des pépinières produisant des plants à racines nues, l'établissement de la symbiose est indispensable à la croissance normale des plants pour toutes les espèces à ectomycorhizes ou à endomycorhizes VA. Beaucoup de techniques utilisées en pépinière influent de manière négative sur le développement des mycorhizes (fumigation, utilisation de fongicides à dose trop élevée, fertilisation minérale excessive). On n'aboutit cependant jamais à une éradication complète des champignons ectomycorhiziens. Certains champignons comme *Thelephora terrestris* ont en effet une capacité extraordinaire à survivre dans ces conditions, et à recoloniser des sols désinfectés. La fumigation détruit par contre les champignons endomycorhiziens VA qui ne se réinstallent qu'après plusieurs années. Il peut y avoir intérêt à inoculer les pépinières produisant des plants à racines nues, soit pour éviter une recolonisation aléatoire après fumigation, soit pour introduire des souches performantes qui seront ensuite adaptées et compétitives dans le sol de plantation.

Les substrats sont la plupart du temps dépourvus de symbiotes mycorhiziens. En raison du niveau de fertilité très élevé qui y est appliqué, les symbiotes n'y sont pas indispensables à la croissance pendant cette phase d'élevage. Il est cependant préférable d'y produire des plants mycorhizés et donc de pratiquer des niveaux de fertilisation moins élevés.

L'inoculation directe y est possible sans désinfection préalable. Cette option a été adoptée aux États-Unis, où plusieurs dizaines de millions de semis en conteneurs ou à racines nues sont inoculés chaque année (Castellano *et al.*, 1985 ; Castellano, 1994, 1996). Il est possible de produire de l'inoculum ectomycorhizien en grande quantité, soit par fermentation et inclusion du mycélium dans un gel, soit par culture du mycélium sur un substrat solide, soit par récolte des carpophores.

Il est aussi maintenant possible de produire de l'inoculum endomycorhizien VA par association de souches sélectionnées avec un hôte adapté. Cet inoculum peut être utilisé dans les sols de pépinière après désinfection du sol pour la production de plants à racines nues. Il peut aussi être utilisé pour inoculer les plants produits en conteneurs issus de semis ou de micropropagation *in vitro* (Lovato *et al.*, 1992 ; Navatel *et al.*, 1995).

En ne considérant que les ectomycorhizes pour lesquelles il existe le plus de données et de résultats expérimentaux, nous avons vu que des gains très substantiels de croissance pouvaient déjà être obtenus en remplaçant dès le stade de la pépinière les champignons locaux par des souches sélectionnées plus efficaces. Pour l'instant, nous considérons que seul le Douglas associé à *Laccaria bicolor* S 238 N a fait l'objet de suffisamment d'essais de longue durée pour pouvoir être conseillé en France dans les opérations de reboisement. Le suivi de cette souche par des méthodes de biologie moléculaire a permis de montrer qu'elle pouvait parfaitement survivre au moins dix ans après transplantation et continuer à dominer le système racinaire des arbres inoculés douze ans auparavant (Selosse *et al.*, 1998). Il est donc possible d'envisager une survie de cette souche pendant toute la durée d'un peuplement. Cependant, en raison de son effet positif sur la croissance du Douglas, il est nécessaire de pratiquer des éclaircies particulièrement fortes dans ces peuplements de Douglas issus de plants initialement inoculés par *Laccaria bicolor* S 238 N.

Des résultats prometteurs ont été obtenus après transplantation avec le Chêne associé à *Paxillus involutus* ou le Cèdre associé à *Tuber albidum*. Des résultats plus contradictoires ont été obtenus

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

avec d'autres essences. **Des réseaux d'essais de terrain à long terme doivent être installés avant tout développement important de la mycorhization contrôlée, quelles que soient les essences et quels que soient les associés fongiques.** En effet, seuls les essais de terrain de longue durée peuvent permettre de déterminer l'efficacité des souches introduites sur la croissance de l'arbre-hôte. Toute autre méthode de sélection, basée par exemple sur des critères physiologiques est problématique. Nous ne savons en effet pas pourquoi une souche est plus efficace qu'une autre dans des conditions écologiques déterminées. La variabilité d'efficacité entre souches est probablement la résultante d'un grand nombre de paramètres.

De même, la compétitivité des souches introduites vis-à-vis de la microflore locale ne peut être appréciée au laboratoire. Seuls les essais de terrain de longue durée, permettant d'intégrer la réalité et la variabilité des conditions climatiques, peuvent donner des indications. Il est d'ailleurs maintenant possible de s'assurer par typage moléculaire de la survie à long terme des souches introduites, comme cela a été fait pour *Laccaria bicolor* S 238 N et *Laccaria bicolor* 81 306 associées à l'Épicéa et au Douglas (Di Battista, 1997 ; Selosse *et al.*, 1998).

F. LE TACON - J. GARBAYE J.-L. CHURIN - D. BOUCHARD Équipe de Microbiologie forestière INRA - Centre de Recherches de Nancy F-54280 CHAMPENOUX	D. MOUSAIN Laboratoire de Recherches sur les Symbiotes des racines INRA - Centre de Recherches de Montpellier 2, place Viala F-34060 MONTPELLIER CEDEX 1
Christine ARGILLIER Division Agriculture et Forêt méditerranéennes CEMAGREF Aix-en-Provence actuellement Division Ressources ichtyologiques en plans d'eau CEMAGREF 361, rue J.-F. Breton, BP 5095 F-34033 MONTPELLIER CEDEX 1	B. GÉNÉRÉ - J.-M. AMIRAULT Division Ressources génétiques et Plants forestiers CEMAGREF Domaine des Barres F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON

## BIBLIOGRAPHIE

- AL ABRAS (K.), LAPEYRIE (F.), LE TACON (F.), MARTIN (F.). — Appréciation de la qualité des systèmes racinaires des plants forestiers par leur état symbiotique. Incidence sur la crise de transplantation de l'Épicéa commun *Picea excelsa* Link. — *Revue forestière française*, vol. XL, numéro spécial "Diagnostics en forêt", 1988, pp. 140-148.
- ALVAREZ (I.F.), PARLADÉ (J.), PERA (J.), ESPINEL (S.), BOUCHARD (D.), LE TACON (F.). — Performance of bare-root Douglas-Fir seedlings inoculated with *Laccaria bicolor* S238 five years after field outplanting. In : Proceedings of the Fourth European Symposium on Mycorrhizas, Granada (Spain), 1994.
- ALVAREZ (I.F.), PARLADÉ (J.), TRAPPE (J.M.), CASTELLANO (M.A.). — Hypogeous mycorrhizal fungi of Spain. — *Mycotaxon*, vol. 47, 1993, pp. 201-217.
- ARGILLIER (C.), FALCONNET (G.), TILLARD (P.), MOUSAIN (D.). — Essais d'introduction dans un arénosol de Petite-Camargue de Pins pignons (*Pinus pinea* L.) mycorhizés par *Suillus collinitus*. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 2, 1997, pp. 131-140.
- BÉCARD (G.), DOUDS (D.D.), PFEFFER (P.E.). — Extensive *in vitro* hyphal growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in the presence of CO<sub>2</sub> and flavonoids. — *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 58, 1992, pp. 821-825.
- BÉCARD (G.), FORTIN (J.A.). — Early events of vesicular-arbuscular mycorrhiza formation on Ri T-DNA transformed roots. — *New Phytol.*, vol. 108, n° 2, 1988, pp. 211-218.

- BJÖRKMANN (E.). — The effect of strangulation on the formation of mycorrhiza in pine. — *Svensk. Bot. Tidskr.*, vol. 38, 1944, pp. 1-14.
- BOKOR (R.). — A mykorrhiza-gombákkal tör téno talajoltások új agrotechnikai eljárása. — *Erdészeti Kutatások*, Budapest, vol. 11, 1954, pp. 27-45.
- CASTELLANO (M.A.). — Current status of outplanting studies using ectomycorrhiza-inoculated forest trees. In : *Mycorrhizae and plant health* / F.L. Pflieger, R.G. Linderman Eds. — Saint-Paul (MN) : APS Press, 1994. — 360 p.
- CASTELLANO (M.A.). — Outplanting performance of mycorrhizal inoculated seedlings. In : *Concepts in mycorrhizal research* / K.G. Mukerji Ed. — Kluwer Academic Publishers, 1996. — 374 p. (Handbook of vegetation science v. 19/2).
- CASTELLANO (M.A.), TRAPPE (J.M.), MOLINA (R.). — Inoculation of container-grown Douglas-fir with basidiospores of *Rhizopogon vinicolor* and *R. colossus* : effects of fertility and spore application rate. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 15, 1985, pp. 10-13.
- CHEETHAM (P.S.J.), BLUNT (K.W.), BUCKE (C.). — Physical studies on cell immobilization using calcium alginate gels. — *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 21, 1979, pp. 2155-2168.
- CHEVALIER (G.). — La Mycorrhization contrôlée en pépinière forestière. Possibilités d'application en conteneurs. — *Revue forestière française*, vol. XXXVII, n° 2, 1985, pp. 93-106.
- DECLERCK (S.), STRULLU (D.G.), PLENCHETTE (C.). — *In vitro* mass-production of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus versiforme* associated with Ri T-DNA transformed carrot roots. — *Mycol. Res.*, 100 HS p 10, 1996, pp. 1237-1242.
- DELTRAN (S.), GARBAYE (J.), LE TACON (F.). — Production rapide de plants feuillus sur tourbe fertilisée ; nouveaux résultats. — *Revue forestière française*, vol. XXVII, n° 6, 1975, pp. 437-448.
- DI BATTISTA (C.). — Comportement en pépinière et en plantation d'un champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor* S 238 N inoculé sur Épicéa (*Picea abies*) et Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Typage moléculaire de la souche introduite. — Nancy : Université Nancy I - Henri-Poincaré, 1997. — 90 p. (Thèse).
- DIEM (H.G.), JUNG (G.), MUGNIER (J.), GANRY (F.), DOMMERMUES (Y.). — Alginate entrapped *Glomus mosseae* for crop inoculation. In : *Proceedings of the 5th North American Conference on Mycorrhizas*. — Québec : Université Laval, 1981.
- DOMMERMUES (Y.), DIEM (H.G.), DIVIES (C.H.). — Microbiological process for controlling the productivity of cultivated plants. — US Patent 4, 155, 737, 1979 may 22.
- FRANK (A.B.). — Die Bedeutung der Mykorrhiza-Pilze für die gemeine Kiefer. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, n° 16, 1890, pp. 1862-1890.
- GAGNON (J.), LANGLOIS (C.G.), BOUCHARD (D.), LE TACON (F.). — Growth and ectomycorrhizal formation of container-grown Douglas fir seedlings inoculated with *Laccaria bicolor* under four levels of nitrogen fertilization. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 25, 1995, pp. 1953-1961.
- GAUTRY (J.Y.), JOUVENCEAU (S.), THIVOLLE-CAZAT (A.). — Mycorrhization contrôlée du Douglas et de l'Épicéa et interaction clone x champignon. — *Annales de l'AFOCEL*, 1991, pp. 125-158.
- GARBAYE (J.). — Compétitivité des champignons ectomycorhiziens : premiers résultats et application à la sélection de souches pour la mycorrhization contrôlée du Hêtre et du Chêne rouvre dans le Nord-Est de la France. — *Revue forestière française*, vol. XXXVI, n° 1, 1984, pp. 33-43.
- GARBAYE (J.). — Effet du champignon mycorrhizien *Hebeloma crustuliniforme* sur la croissance du Chêne et du Hêtre. — *Revue forestière française*, vol. XXXV, n° 1, 1983, pp. 21-26.
- GARBAYE (J.). — Les Problèmes posés par la mycorrhization contrôlée du Chêne. — *Revue forestière française*, n° 2 spécial "Chêne sessile, Chêne pédonculé et Chêne rouge d'Amérique en forêt française", 1990, pp. 233-239.
- GARBAYE (J.). — Pourquoi et comment observer l'état mycorrhizien des plants forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLII, n° 1, 1990, pp. 35-41.
- GARBAYE (J.), CHURIN (J.-L.). — Growth stimulation of young oak plantations inoculated with the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus* with special reference to summer drought. — *Forest Ecology and Management*, in press (accepted march 14, 1997).
- GARBAYE (J.), LAINEZ (J.), LE TACON (F.). — Survie, croissance et mycorrhization après plantation de plants de Hêtre produits sur tourbe fertilisée. — *Revue forestière française*, vol. XXXV, n° 1, 1983, pp. 27-34.
- GARBAYE (J.), MENEZ (J.), WILHELM (M.E.). — Les Mycorrhizes des jeunes chênes dans les pépinières et les régénérations naturelles du Nord-Est de la France. — *Acta Oecol. Plant.*, vol. 7, 1, 1986, pp. 87-96.
- GARBAYE (J.), PERRIN (R.). — L'inoculation ectomycorhizienne des plants feuillus sur tourbe fertilisée : résultats sur Chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) avec quatre souches fongiques. — *European Journal of Forest Pathology*, vol. 16, n° 4, 1986, pp. 239-246.
- GARBAYE (J.), WILHELM (M.E.). — Influence de la mycorrhization acquise en pépinière sur la mycorrhization de jeunes plantations de chêne. — *Acta Oecologia*, vol. 5, 1984, pp. 151-161.
- GÉNÉRÉ (B.). — Évaluation en jeune plantation de 2 types de plants de Douglas mycorrhizés artificiellement par *Laccaria laccata* S238N. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 52, n° 1, 1995, pp. 375-384.
- GÉNÉRÉ (B.). — Les Facteurs influençant la qualité physiologique des plants plantés, et la prise en compte des risques climatiques après plantation. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 4, 1997, pp. 313-323.
- GÉNÉRÉ (B.), AMIRALTY (J.-M.). — L'Élevage du Douglas mycorrhizé au semis : influence de la pépinière et du type de plant. — *Études Forêt du CEMAGREF*, n° 6 (annales 1990), 1991, pp. 186-200.
- HACSKAYLO (E.). — Influence of cycloheximide on growth of mycorrhizal fungi and on mycorrhizae of pine. — *Forest Science*, vol. 7, 1961, pp. 376-379.
- JUNG (G.). — Procédé d'inclusion de microorganismes dans une matrice de polymères et produit ainsi obtenu. — *Fr. patent* 7, 908, 597, 5 avril 1979.

## Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production forestière

- KELLEY (W.D.). — Effect of triadimefon on ectomycorrhizae of loblolly and slash pines in Alabama. — *Forest Science*, vol. 28, n° 2, 1982, pp. 232-236.
- LE TACON (F.), ALVAREZ (I.F.), BOUCHARD (D.), HENRION (B.), JACKSON (R.M.), LUFF (S.), PARLADÉ (J.I.), PERA (J.), STENSTRÖM (E.), VILLENEUVE (N.), WALKER (C.). — Variations in field response of forest trees to nursery ectomycorrhizal inoculation in Europe. In : *Mycorrhizas in Ecosystems* / D.J. Read, D.H. Lewis, A.H. Fitter, I.J. Alexander Eds. — Oxford : CAB International, 1992. — pp. 119-134.
- LE TACON (F.), BOUCHARD (D.). — Effects of different ectomycorrhizal fungi on growth of Larch, Douglas fir, Scots pine and Norway spruce seedlings in fumigated nursery soil. — *Acta oecologica. Oecologia applicata*, vol. 7, n° 4, 1986, pp. 389-402.
- LE TACON (F.), GARBAYE (J.), BOUCHARD (D.), CHEVALIER (G.), OLIVIER (J.-M.), GUINBERTEAU (J.), POITOU (N.), FROCHOT (H.). — Field results from ectomycorrhizal inoculation in France. In : *Canadian workshop on mycorrhizae in forestry* / M. Lalonde, Y. Piché Eds. — Québec : Université Laval, 1988.
- LE TACON (F.), GARBAYE (J.), BOUCHARD (D.), CHURIN (J.-L.). — Les différentes techniques de production de plants et le contrôle de la mycorrhization chez les feuillus précieux. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, numéro spécial "Les feuillus précieux : Frêne, Merisier et grands Érables", 1992, pp. 47-54.
- LE TACON (F.), JUNG (G.), MICHELOT (P.), MUGNIER (J.). — Efficacité en pépinière forestière d'un inoculum de champignon ectomycorhizien produit en fermenteur et inclus dans une matrice de polymères. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 40, n° 2, 1983, pp. 165-176.
- LE TACON (F.), JUNG (G.), MICHELOT (P.), MUGNIER (J.), MAUPERIN (C.). — Efficiency in a forest nursery of an ectomycorrhizal fungus inoculum produced in a fermentor an entrapped in polymeric gels. — *Canadian Journal of Botany*, vol. 63, n° 9, 1985, pp. 1664-1668.
- LE TACON (F.), VALDENAIRE (J.-M.). — La Mycorrhization contrôlée en pépinière, premiers résultats obtenus à la pépinière du Fonds forestier national de Peyrat-le-Château sur Épicéa et Douglas. — *Revue forestière française*, vol. XXXII, n° 3, 1980, pp. 281-292.
- LEVISON (I.). — Growth stimulation of forest tree seedlings by the activity of free-living mycorrhizal mycelium. — *Forestry*, vol. 29, 1956, pp. 53-59.
- LOVATO (P.E.), GUILLEMIN (J.-P.), GIANINAZZI (S.). — Application of commercial arbuscular endomycorrhizal fungal inoculants to the establishment of micropropagated grapevine rootstock and pineapple plants. — *Agronomie*, 12, 1992, pp. 873-880.
- LOVATO (P.E.), SCHÜEPP (H.), TROUVELOT (A.), GIANINAZZI (S.). — Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Orchard and Ornamental Plants. In : *Mycorrhiza* / A. Varma, B. Hock Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1994.
- MARX (D.H.), CORDELL (C.E.). — Specific ectomycorrhizae improve reforestation and reclamation in the eastern United States. In : *Canadian Workshop on Mycorrhizae in Forestry* / M. Lalonde, Y. Piché Eds. — Québec : Université Laval, 1988.
- MARX (D.H.), CORDELL (C.E.), KENNEY (P.S.), MEXAL (J.G.), ARTMANN (J.D.), RITTLE (J.W.), MOLINA (R.J.). — Commercial vegetative inoculum of *Pisolithus tinctorius* and inoculation techniques for development of ectomycorrhizae on bare root tree seedlings. — *Forest Science Monograph*, vol. 75, 1984, pp. 1-10 (101 p.).
- MARX (D.H.), HATCH (A.B.), MENDICINO (J.F.). — High soil fertility decreases sucrose content and susceptibility of loblolly pine roots to ectomycorrhizal infection by *Pisolithus tinctorius*. — *Canadian Journal of Botany*, vol. 55, n° 12, 1977, pp. 1569-1574.
- MARX (D.H.), JARK (K.), RUEHLE (J.L.), BELL (W.). — Development of *Pisolithus tinctorius* ectomycorrhizae on pine seedlings using basidiospores-encapsulated seeds. — *Forest Science*, vol. 30, n° 4, 1984, pp. 897-907.
- MARX (D.H.), RUEHLE (J.L.), KENNEY (D.S.), CORDELL (C.E.), RIFFLE (J.W.), MOLINA (R.J.), PAWUK (W.H.), NAVRATIL (S.), TINUS (R.W.), GOODWIN (O.C.). — Commercial vegetative inoculum of *Pisolithus tinctorius* and inoculation techniques for development of ectomycorrhizae on container-grown tree seedlings. — *Forest Science*, vol. 28, n° 2, 1982, pp. 373-400.
- MOSER (M.). — Die künstliche Mycorrhizaimpfung von Forstpflanzen. I : Erfahrungen bei der Reinkulture von Mycorrhizapilzen. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 77, 1958, pp. 32-40.
- MOSER (M.). — Die künstliche Mycorrhizaimpfung von Forstpflanzen. II : Die Torfstreukultur von Mycorrhizapilzen. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 77, 1958, pp. 273-278.
- MUGNIER (J.), MOSSE (B.). — Vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in transformed root-inducing T-DNA roots grown axenically. — *Phytopathology*, vol. 77, 1987, pp. 1045-1050.
- NAVATEL (J.C.), BOURRAIN (L.), BLAL (M.), PARAT (J.). — Use of mycorrhizal inoculation on micropropagated plants of walnut to improve the weaning phase. In : COST 822 meeting, Gent, septembre 1995.
- N'ZALA (D.). — Interaction des traitements herbicides et des symbioses mycorrhiziennes sur la croissance des plants forestiers. — Nancy : Université de Nancy I, 1985 (Thèse).
- PACHLEWSKI (R.). — Investigations of pure culture of mycorrhizal fungi of pine (*Pinus sylvestris* L.). — Warsaw (Poland) : Forest Research Institute, 1967.
- PLENCHETTE (C.), FORTIN (J.A.), FURLAN (V.). — Growth responses of several plants species to mycorrhizae in a soil moderate P-fertility. — *Plant and Soil*, vol. 70, n° 2, 1983, pp. 211-217.
- SELOSSE (M.A.), JACQUOT (D.), BOUCHARD (D.), MARTIN (F.), LE TACON (F.). — Spatio-temporal persistence and distribution of an American inoculant strain of the ectomycorrhizal basidiomycete *Laccaria bicolor* in a French forest plantation. — *Molecular Ecology*, in press, 1998 (accepté septembre 1997).
- STRULLU (D.G.), PLENCHETTE (C.). — Développement de nouveaux inoculums de champignons mycorrhiziens obtenus par encapsulation. — *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 76, n° 8, 1990, pp. 25-30.

- TRAPPE (J.M.). — Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries. — *Annual Review of Phytopathology*, vol. 15, 1977, pp. 203-222.
- TYMINSKA (A.), LE TACON (F.), CHADCEUF (J.). — Effect of several ectomycorrhizal fungi on *Pinus sylvestris* seedlings at increasing phosphorus levels in the medium. — *Canadian Journal of Botany*, vol. 64, 1986, pp. 2753-2757.
- VILLENEUVE (N.), LE TACON (F.), BOUCHARD (D.). — Survival of inoculated *Laccaria bicolor* in competition with native ectomycorrhizal fungi and effects on the growth of outplanted Douglas-fir seedlings. — *Plant and Soil*, vol. 135, 1991, pp. 95-107.
- VOIRY (H.). — Classification morphologique des ectomycorhizes du Chêne et du Hêtre dans le Nord-Est de la France. — *European Journal of Forest Pathology*, vol. 11, n° 5-6, 1981, pp. 284-299.

---

### MYCORRHIZES, PÉPINIÈRES ET PLANTATIONS FORESTIÈRES EN FRANCE (Résumé)

Dans les écosystèmes forestiers, les arbres ne peuvent survivre sans mycorrhizes. Dans les sites de reboisement dépourvus d'inoculum ectomycorhizien (sols cultivés, déblais de mines, etc.), les plants non pourvus de mycorrhizes à la sortie de la pépinière peuvent ne jamais se développer. Dans les sites de reboisement pourvus d'inoculum naturel, les plants non mycorrhizés à la sortie de la pépinière ont une mauvaise croissance pendant la première ou les deux premières années suivant la plantation. La croissance ne redevient normale que lorsque le système symbiotique s'est établi. Pour les programmes de reboisement, il est donc essentiel de produire des plants parfaitement mycorrhizés. Néanmoins, des déficiences en mycorrhizes ne sont pas rares dans les pépinières forestières, en raison de la mise en œuvre de différentes pratiques qui peuvent inhiber le développement mycorhizien. La désinfection des sols, qui est de plus en plus utilisée pour le contrôle des pathogènes ou des mauvaises herbes, détruit l'inoculum mycorhizien naturel. Les niveaux élevés de fertilisation pratiqués et l'utilisation de fongicides réduisent les possibilités de développement des mycorrhizes. Les plants produits en conteneurs sur substrat avec solutions nutritives sont souvent dépourvus de mycorrhizes. Il est nécessaire d'optimiser les pratiques de pépinière de façon à favoriser le développement naturel des mycorrhizes. L'inoculation artificielle peut aussi être pratiquée en pépinière forestière. Elle a deux objectifs : l'introduction de champignons symbiotiques dans des sols ou des substrats où ils sont absents et le remplacement partiel des populations naturelles par des souches plus efficaces. Les champignons introduits en pépinière doivent être adaptés aux conditions écologiques du site de plantation : climat, pH du sol, fertilité. Ils doivent aussi pouvoir faire face à d'autres composantes de l'écosystème comme les phénomènes d'allélopathie qui peuvent se développer entre champignons mycorrhiziens et espèces non hôtes. Les champignons introduits doivent être aussi plus efficaces que la moyenne en termes d'effets sur la croissance de l'espèce hôte. Ils doivent aussi être suffisamment compétitifs envers les espèces fongiques locales. La sélection de souches mycorrhiziennes pour une utilisation à grande échelle dans les programmes de reboisement repose essentiellement sur les essais de terrain. Environ trente essais de terrain ont été mis en place dans différentes conditions écologiques avec le Douglas associé à *Laccaria bicolor* S 238. Dans plusieurs essais et plusieurs années après la plantation, les arbres qui ont été initialement associés à cette souche américaine continuent d'avoir une croissance plus élevée que les arbres naturellement mycorrhizés. Des résultats préliminaires intéressants ont aussi été obtenus avec le Chêne associé à *Paxillus involutus* et le Cèdre associé à *Tuber albidum*. Ces résultats préliminaires doivent être confirmés par un plus grand nombre d'essais de terrain.

### MYCORRHIZAE, NURSERIES AND FOREST PLANTATIONS IN FRANCE (Abstract)

Trees in forest ecosystems are unable to survive in the absence of mycorrhizae. In afforestation sites devoid of ectomycorrhizal propagules (e.g., cultivated land, mining spoils, etc.), non-mycorrhizal seedlings from nurseries may never develop. Even on sites with native mycorrhizal propagules, non-mycorrhizal nursery seedling develop slowly during the first year or two following plantation and normal growth is not restored until the symbiotic relation is established. It is therefore essential for afforestation schemes to produce fully mycorrhized planting material. However, mycorrhizal deficiency is not infrequent in forest nurseries due to various techniques that may inhibit mycorrhizal development — soil fumigation, which is increasingly used for pathogen and weed control, destroys natural mycorrhizal inoculum, while high levels of fertilization and application of fungicides reduce or eliminate mycorrhizae. Containerized planting material grown in heavily fertilized, sterile, artificial potting mixtures generally lack mycorrhizae. Nursery practices should be optimized so as to promote mycorrhizal development. Artificial mycorrhizal inoculation may also be used in forest nurseries. Its purposes are twofold — introducing the mycorrhizal fungi in deficient soils or substrates, and partially replacing some of the native populations with more effective strains. The fungi inoculated in the nursery must be suited to the ecology of the afforestation site in terms of climate, soil pH, fertility. They must also be capable of sustaining other components in the ecosystem such as allelopathy or antagonism which may develop between the mycorrhizal fungi and the non-host species. Furthermore, the inoculated fungi must have a higher than average effect on growth of the host species and be sufficiently competitive with respect to local fungal species. The selection of mycorrhizal species suitable for large scale application in afforestation schemes relies essentially on field trials. About thirty field trials have been set up in various ecological environments on Douglas fir associated with *Laccaria bicolor* S 238. In a number of trials and several years after outplanting, the trees inoculated with this American strain in the nursery continue to grow better than naturally mycorrhized trees. Some interesting preliminary results were also obtained on *Quercus* sp. associated with *Paxillus involutus* and *Cedrus atlantica* associated with *Tuber albidum*. These preliminary results need to be confirmed by further field trials.