

Valoriser et conserver les ressources forestières méditerranéennes : rôle potentiel des champignons mycorhiziens associés à la strate arbustive pionnière

R. DUPONNOIS^{1, 2}
L. OUAHMANE^{3, 4}
A. GALIANA⁵
M. HAFIDI³
Y. PRIN⁵
B. DREYFUS¹

¹ Ird, Umr 040 Cirad/Inra/Ird/Supagro/Um2
Laboratoire des symbioses tropicales
et méditerranéennes (Lstm)
34398 Montpellier Cedex 5
France

² Ird, Laboratoire commun de microbiologie
Ird/Isra/Ucad
Centre de recherche de Bel Air
BP 1386, Dakar
Sénégal

³ Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences Semlalia
Marrakech
Maroc

⁴ Centre régional de recherche forestière
Marrakech
Maroc

⁵ Cirad, Umr 113
Cirad/Inra/Ird/Supagro/Um2
Laboratoire des symbioses tropicales
et méditerranéennes (Lstm)
34398 Montpellier Cedex 5
France

Pour des reboisements au Maroc, des recherches sur le statut symbiotique de *Cupressus atlantica* et sur l'optimisation du rôle des champignons mycorhiziens ont abouti notamment à stimuler la croissance en hauteur des jeunes cyprès ainsi que leur résistance suite à la transplantation. D'autres expériences ont montré que le potentiel infectieux mycorhizogène des sols est significativement amélioré par l'association cyprès-arbustes. L'ensemble de ces résultats est discuté en termes de croissance du cyprès et aussi de fonctionnement biologique du sol.



Photo 1.
Formation à *Cupressus atlantica* dans le Haut Atlas marocain.
Photo L. Ouahmane.

RÉSUMÉ

VALORISER ET CONSERVER LES RESSOURCES FORESTIÈRES MÉDITERRANÉENNES : RÔLE POTENTIEL DES CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS ASSOCIÉS À LA STRATE ARBUSTIVE PIONNIÈRE

Les régions du pourtour méditerranéen sont assujetties à de fortes pressions anthropiques qui se traduisent par une surexploitation des ressources naturelles et une régression significative des surfaces boisées. Ces altérations du couvert forestier aggravent les processus d'érosion des sols qui entraînent une dégradation des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des horizons superficiels. Parmi les différentes composantes microbiennes affectées par ces perturbations figurent les communautés de champignons mycorhiziens à arbuscules (Cma). Cet article présente les principaux résultats obtenus sur le statut symbiotique d'une essence typique des écosystèmes forestiers méditerranéens, *Cupressus atlantica*, et des techniques susceptibles d'optimiser le rôle des Cma dans les opérations de reboisement au Maroc. Les résultats montrent que la croissance de cette espèce est très dépendante de la présence des Cma. Plusieurs approches visant à valoriser les Cma pour améliorer la croissance du cyprès en conditions naturelles ont été comparées. La mycorrhization contrôlée de cette essence par un complexe de Cma a stimulé la croissance en hauteur des jeunes cyprès ainsi que leur résistance à la crise de transplantation. Parallèlement, plusieurs expériences ont montré que le potentiel infectieux mycorrhizogène des sols était significativement amélioré par la gestion d'espèces arbustives et que l'association cyprès-arbustes pouvait être très bénéfique au développement du jeune arbre. L'ensemble de ces résultats est discuté en fonction de leur intérêt dans les programmes de reboisement avec le cyprès, en termes de croissance de l'essence forestière mais aussi en termes de fonctionnement biologique du sol.

Mots-clés : *Cupressus*, symbiose mycorrhizienne, mycorrhization contrôlée, diversité microbienne, écosystème méditerranéen.

ABSTRACT

USE AND CONSERVATION OF MEDITERRANEAN FOREST RESOURCES: THE POTENTIAL ROLE OF MYCORRHIZAL FUNGI IN ASSOCIATION WITH PIONEER SHRUB STOREYS

The regions around the Mediterranean are subject to severe human pressures that have resulted in overexploitation of natural resources and a significant decline in wooded areas. Diminishing woodland cover is worsening soil erosion processes, which in turn are degrading the physical, chemical and biological characteristics of the upper soil horizons. The microbial soil components affected by these disturbances include communities of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). This article describes the main results obtained for the symbiotic status of a typical tree species in Mediterranean forest ecosystems, *Cupressus atlantica*, and the techniques that could optimise the role of AMFs in reforestation operations in Morocco. Our results show that growth in this species is highly dependent on the presence of AMFs. Several approaches aiming to use AMFs in order to improve cypress growth under natural conditions were compared. Controlled mycorrhization of cypresses using an AMF complex simulated the upward growth of young cypresses as well as their resistance to transplantation trauma. Several experiments conducted in parallel showed that the potential for soil infection by mycorrhizal fungi was significantly improved by managing shrubby species and that associating cypresses with shrubs could be highly beneficial to the development of the young trees. The article discusses the value of all of these results for reforestation programmes using cypress, in terms of their growth as a woodland species but also in terms of biological soil functions.

Keywords: *Cupressus*, mycorrhizal symbiosis, controlled mycorrhization, microbial diversity, Mediterranean ecosystem.

RESUMEN

VALORIZAR Y CONSERVAR LOS RECURSOS FORESTALES MEDITERRÁNEOS: PAPEL POTENCIAL DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ASOCIADOS AL ESTRATO ARBUSTIVO PIONERO

Las regiones de la cuenca mediterránea están sometidas a fuertes presiones antrópicas, que se reflejan en una sobreexplotación de los recursos naturales y un significativo retroceso de las superficies forestales. Estas alteraciones de la cubierta forestal agravan los procesos de erosión de los suelos, que provocan una degradación de las características físicas, químicas y biológicas de los horizontes superficiales. Entre los distintos componentes microbianos afectados por estas perturbaciones figuran las comunidades de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Este artículo presenta los principales resultados obtenidos sobre el carácter simbiótico de una especie típica de los ecosistemas forestales mediterráneos, *Cupressus atlantica*, y sobre las técnicas que podrían optimizar el papel de los HMA en las operaciones de reforestación en Marruecos. Los resultados muestran que el crecimiento de esta especie depende mucho de la presencia de HMA. Se compararon varios enfoques destinados a valorizar los HMA para mejorar el crecimiento del ciprés en condiciones naturales. La micorrización controlada de esta especie por un complejo de HMA estimuló el crecimiento en altura de los jóvenes cipreses y su resistencia al estrés del trasplante. Paralelamente, varios experimentos pusieron de manifiesto que el potencial infeccioso micorrizogéno de los suelos se veía mejorado significativamente mediante el manejo de especies arbustivas, y que la asociación cipreses-arbustos podía ser muy beneficiosa para el desarrollo del árbol joven. Se examina el conjunto de los resultados en función de su interés en los programas de reforestación con cipreses, tanto en lo que respecta al crecimiento de la especie forestal como al funcionamiento biológico del suelo.

Palabras clave: *Cupressus*, simbiosis micorrízica, micorrización controlada, diversidad microbiana, ecosistema mediterráneo.

Introduction

Dans les écosystèmes méditerranéens semi-arides, le processus de désertification s'est accéléré depuis plusieurs décennies suite aux différents aléas climatiques (périodes de sécheresse prolongée) et une surexploitation des ressources naturelles (surpâturage, déforestation intensive, etc.). Ces activités anthropiques se manifestent principalement par une dégradation significative de la dynamique et de la composition des écosystèmes forestiers. Elles entraînent également de profondes modifications dans les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols consécutives à une importante érosion hydrique et éolienne des sols (REQUENA *et al.*, 2001). Il a été clairement établi que ce processus d'érosion et de dégradation du couvert végétal réduisait la composition et la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique (GARCIA *et al.*, 1997). Parmi les composantes microbiennes du sol impliquées dans le fonctionnement des principaux cycles biogéochimiques (phosphore, P, azote, N, et carbone, C) figurent les champignons mycorhiziens. Ces microorganismes ont un rôle clé dans l'évolution des écosystèmes terrestres, plus particulièrement dans les environnements arides en assurant principalement la pérennité du couvert végétal (BRUNDRETT, 1991). Les altérations de la couverture végétale induites par les activités anthropiques ont un effet délétère sur la diversité et l'abondance des propagules fongiques mycorhiziennes et, en conséquence, diminuent le potentiel mycorhizogène des sols (MC LELLAN *et al.*, 1995 ; DUPONNOIS *et al.*, 2001). Du fait des relations privilégiées existant entre les communautés de symbiotes mycorhiziens et les végétaux terrestres, ces perturbations du potentiel mycorhizien contribuent au ralentissement des processus naturels ou artificiels de revégétalisation du milieu (REQUENA *et al.*, 2001). Afin de remédier à ces carences microbiologiques, deux stratégies sont généralement proposées :

- L'inoculation préalable en pépinière des plants forestiers par des souches de champignons mycorhiziens performants quant à leur impact sur le développement de l'hôte (DUPONNOIS *et al.*, 2007).
- La gestion des communautés de symbiotes fongiques par des espèces végétales hautement mycotrophes (DUPONNOIS *et al.*, 2001; AZCON-AGUILAR *et al.*, 2003). Alors que la conservation de la biodiversité dans le pourtour méditerranéen est considérée comme un défi majeur pour la société, l'utilisation de ces ressources microbiennes reste encore relativement anecdotique dans les opérations de reboisement ou de gestion des écosystèmes forestiers méditerranéens.

Depuis plusieurs années, des recherches conduites en étroite collaboration entre l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (Maroc), les services des eaux et forêts du Haut Atlas

(Maroc) et le Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes (Umr 113 Cirad/Inra/Ird/Supagro/Um2) ont été entreprises afin d'identifier des pratiques sylvicoles performantes et respectueuses de l'environnement reposant sur la valorisation de la symbiose mycorhizienne en foresterie. Ces recherches ont pour objectifs principaux non seulement d'optimiser la réussite des opérations de reboisement au Maroc mais aussi de dynamiser les processus microbiens telluriques impliqués dans le fonctionnement biologique du sol, afin d'assurer un niveau de fertilité adéquat pour un développement durable du couvert forestier.

Cet article récapitule les principaux résultats obtenus dans ce programme de recherche avec, en particulier, les connaissances acquises sur le cyprès de l'Atlas (*Cupressus atlantica* Gaussen).



Photo 2.
Strate arbustive majoritairement composée par *Lavandula* spp.
Photo L. Ouahmane.

Le cyprès de l'Atlas : distribution et statut symbiotique

Le cyprès de l'Atlas est une essence xérophile, très plastique et robuste. Elle est capable de s'adapter à des conditions physiques très sévères. Elle relève de l'étage méditerranéen semi-aride froid de montagne. Le cyprès a une extension importante mais discontinue. Il constitue un élément circumméditerranéen trouvé à l'état spontané en Iran, en Grèce, en Tunisie, en Algérie et au Maroc dans la haute vallée de l'Aghbar (tête de l'oued Nfis) (BOUDY, 1958). Au Maroc, en dehors de ce véritable peuplement, cet arbre est rencontré dans de très rares stations dans la même vallée de Nfis sous forme de bosquets très réduits ou même de pieds noyés au milieu du thuya, du genévrier rouge et du genévrier oxcède (photo 1). Ces petits isolats constituent probablement des reliques d'une ancienne extension de la forêt de l'Aghbar. Au sein de ce couvert forestier, les strates végétales inférieures sont principalement composées d'espèces herbacées (exemple : *Stipa nitens* Ball.) et arbustives (exemple : *Cistus salvifolius* L., *Lavandula dentata* L., *L. stoechas* L., *Thymus pallidus* Coss., *Polygala balansae* Coss., *Globularia alypum* L., *T. satureioides* Coss, etc.) (photo 2). Dans la forêt de l'Aghbar, le cyprès de l'Atlas occupe une superficie de 1 485 ha mais la formation qu'il constitue est très mutilée et présente une structure très clairsemée. L'aire de distribution de cette essence forestière a significativement régressé depuis le milieu du XX^e siècle et, à l'heure actuelle, cette espèce a perdu ses capacités de régénération naturelle du fait du surpâturage et de l'appauvrissement des sols.

Le statut mycorrhizien du cyprès est de type endotrophe (OUAHMANE *et al.*, 2006 a). Les symbiotes fongiques associés à cette essence sont des champignons mycorrhiziens à arbuscules (Cma) appartenant principalement au genre *Glomus*, avec comme espèces *G. intraradices*, *G. mannihotis*, *G. fasciculatum* mais aussi des espèces des genres *Scutellospora* et *Acaulospora*. La dépendance mycorrhizienne des espèces du genre *Cupressus* a été déterminée en conditions contrôlées en évaluant la réponse de trois espèces de *Cupressus* (*C. atlantica*, *C. sempervirens* et *C. arizonica*) à l'inoculation par une souche de Cma, *G. intraradices* (OUAHMANE *et al.*, 2006 b). Les résultats montrent que le développement des trois espèces de *Cupressus* testées est étroitement lié à la symbiose mycorrhizienne. Leur dépendance mycorrhizienne calculée selon PLENCHETTE *et al.*¹ (1983) varie de 37,6 % (*C. atlantica*) à 53,1 % et 54,1 % pour *C. sempervirens* et *C. arizonica*, respectivement (OUAHMANE *et al.*, 2006 b).

La strate arbustive : influence sur les caractéristiques chimiques et microbiologiques des sols

Dans les milieux dégradés des milieux semi-arides, les herbes et arbustes se développent selon une distribution éparsée sous forme de taches de végétation. Cette répartition constitue des îlots de fertilité (GARNER, STEINBERGER, 1989) qui peuvent faciliter le déroulement des différentes étapes de la dynamique forestière (en particulier aux premiers stades de développement de la strate arborée) (CALLAWAY, 1995 et 1997). Certaines espèces végétales

peuvent améliorer les caractéristiques physiques et chimiques au sein de ces taches de végétation (exemple : augmentation de la teneur en matière organique du sol, amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol) et ainsi agir en tant que plantes « nurses » pour les autres végétaux du milieu en facilitant leur croissance et en améliorant leur survie (CARILLO-GARCIA *et al.*, 2000). Ces plantes « nurses » sont des espèces qui, par leurs caractéristiques intrinsèques (exemple : résistance à la sécheresse), colonisent des milieux très dégradés (AZCON-AGUILAR *et al.*, 2003). De plus, elles sont généralement associées à des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote et/ou des champignons mycorrhiziens. Ces derniers leur permettent d'améliorer le volume de sol prospecté par les racines pour assurer la nutrition minérale de la plante via la prolifération des hyphes extramatriciels et d'avoir accès à des ressources minérales inaccessibles aux racines seules (exemple : phosphates organiques et inorganiques). L'association avec ces symbiotes fongiques donne à certaines plantes pionnières la capacité de coloniser des sols dégradés, fréquemment carencés en éléments nutritifs tels que le phosphore ou l'azote. Des études menées sur la lavande et le thym ont montré que ces espèces amélioraient significativement la multiplication des propagules fongiques dans le sol (OUAHMANE *et al.*, 2006 a). Comparé à un sol nu, sans couvert végétal, le potentiel mycorrhizien (nombre de propagules mycorrhiziennes par 100 g de sol) est multiplié par 17 lorsque ce sol est colonisé par *Lavandula dentata*, par 23 lorsque le sol est influencé par *L. stoechas* et par *Thymus satureioides* (OUAHMANE *et al.*, 2006 a). Cette stimulation de la multiplication des communautés de symbiotes fongiques s'accompagne également de profondes modifications dans la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique. Ainsi, des

¹ Leur dépendance mycorrhizienne calculée selon PLENCHETTE *et al.* (1983) : ((biomasse totale de la plante mycorrhizée - biomasse totale de la plante non mycorrhizée) / biomasse totale de la plante mycorrhizée) x 100).

résultats récents (OUAHMANE *et al.*, résultats non publiés) montrent que les communautés microbiennes des sols rhizosphériques de *L. stoechas*, *L. dentata* et *T. satureioides* mobilisent plus de phosphore assimilable par la plante que celles présentes dans le sol nu. Paradoxalement, aucune différence significative n'a été enregistrée dans les caractéristiques chimiques des sols (P assimilable, N organique et C organique) en fonction de leurs origines (sol nu ou sous lavande, etc.). Ce résultat montre que le rôle principal de ces plantes « nurses » réside dans une amélioration des propriétés microbiologiques du sol (abondance des propagules mycorhiziennes, diversité fonctionnelle de la microflore) susceptible de profiter aux jeunes plants d'espèces forestières natives du Haut Atlas comme le cyprès.

Valorisation de la symbiose mycorhizienne dans la domestication du cyprès en pépinière

La mycorhization contrôlée d'une essence forestière donnée repose sur l'utilisation d'une souche fongique performante quant à son effet sur la croissance de la plante hôte et sur sa capacité à subsister durablement lorsque les plants mycorhizés seront transplantés en milieu naturel. Paradoxalement, de nombreuses études attestent l'importance de la diversité du cortège mycorhizien associé à la plante au niveau de la réponse de la plante hôte à l'inoculation mycorhizienne mais aussi au niveau de l'impact de l'établissement de la symbiose sur la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique (VAN DER HEIJDEN *et al.*, 1998 ; OUAHMANE *et al.*, 2006 c). Récemment, nous avons comparé l'effet sur la croissance de *C. atlantica* de l'inoculation par *G.*

intraradices ou par un complexe de souches mycorhiziennes isolées sous *C. atlantica* dans la station d'Idni (Haut Atlas, Maroc). Les résultats montrent que les deux types d'inoculation stimulent le développement de la plante dans des proportions égales (x 1,91) (OUAHMANE *et al.*, 2006 c). Par contre, lorsque le sol est préalablement amendé par du phosphate naturel (phosphate naturel de Khouribga, Maroc), le complexe mycorhizien a permis une meilleure mobilisation de P et une meilleure croissance de la plante hôte (figure 1). L'optimisation de l'altération du phosphate naturel induite par l'inoculation du complexe mycorhizien ne résulte pas uniquement des sym-

biotes inoculés mais aussi de modifications de la diversité fonctionnelle de la microflore résultant de l'établissement de la symbiose. En effet, en effectuant des mesures de respirométrie induite (SIR, *substrate induced respiration*), une augmentation significative du dégagement de CO₂ a été enregistrée avec différents acides organiques, dont les acides citrique et oxalique (OUAHMANE *et al.*, 2006 c). Or il est connu que ces deux acides ont un fort pouvoir complexant et sont particulièrement impliqués dans les processus d'altération des phosphates inorganiques. Ces résultats montrent que l'établissement de la symbiose mycorhizienne a fortement stimulé la prolifération de

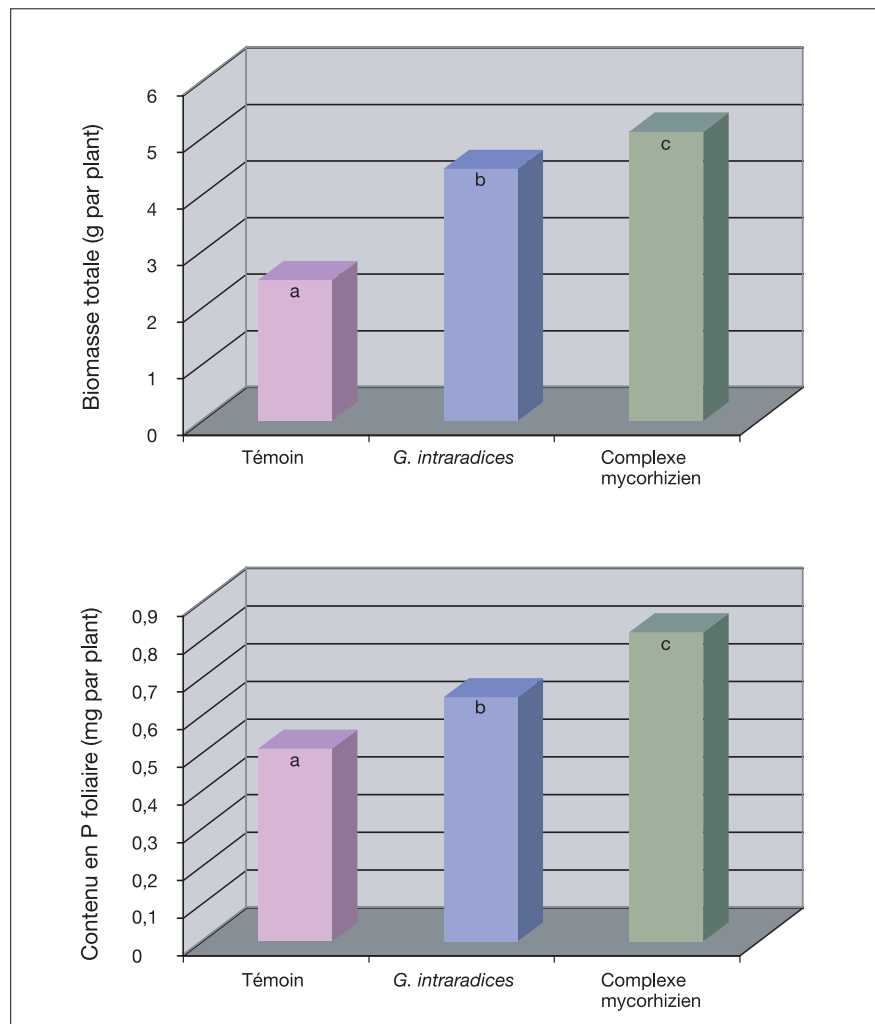


Figure 1.

Influence de l'inoculation par *Glomus intraradices* ou par un complexe de souches de champignons mycorhiziens à arbuscules sur la biomasse totale et la teneur en P des feuilles de *C. atlantica*, après six mois de culture en serre. Les colonnes indexées par une même lettre ne sont pas significativement différentes du témoin d'après le test Newman-Keuls ($p < 0,05$).

microorganismes produisant ces acides organiques et entraînant une forte solubilisation du phosphate naturel. Ces acides ainsi libérés dans le sol ont donné aux bactéries et champignons capables de les métaboliser, un avantage compétitif par rapport à ceux constituant la microflore originelle. Cet effet « mycorrhizosphère », mesuré par la technique de SIR, a été également observé dans d'autres conditions avec d'autres espèces végétales (DUPONNOIS *et al.*, 2005). Ces travaux attestent la pertinence du concept de « complexe trophique » associant la plante, les communautés de champignons symbiotiques et la microflore mycorrhizosphérique, où le symbiote mycorrhizien sélectionne certaines composantes de la microflore tellurique pour créer un nouveau compartiment microbien communément appelé « mycorrhizosphère ». Ces microorganismes pourront agir de concert avec le champignon pour optimiser la nutrition minérale de la plante hôte.

Valorisation de la microflore symbiotique native dans les programmes de reboisement

Les résultats acquis et présentés dans les paragraphes précédents montrent l'importance de la microflore symbiotique mycorrhizienne native des sols méditerranéens dans le développement d'une essence forestière telle que le cyprès. Afin de valoriser ces ressources microbiennes dans les opérations de reboisement au Maroc, deux stratégies peuvent être envisagées :

- soit la mycorrhization contrôlée du cyprès avec un ensemble de souches mycorrhiziennes natives de la zone à reboiser (complexe mycorrhizien) ;
- soit la gestion *in situ* du potentiel mycorrhizogène par des plantes hau-

tement mycotrophes telles que les espèces pionnières (lavande, thym).

Un essai de mycorrhization contrôlée a été mis en place, en avril 2005, dans la station d'Ildni (8° 17' 02" Ouest, 31° 54' 34" Nord). Des plants de *C. atlantica* inoculés par un complexe de souches mycorrhiziennes natives du sol de plantation ont été transférés au champ et leur croissance a été comparée à celle de plants non inoculés. La plantation a été réalisée selon un dispositif en blocs factoriels en randomisation totale et trois répétitions. Chaque traitement (non inoculé ou inoculé) était composé de dix plants dans chaque bloc (OUAHMANE *et al.*, 2007). Les données obtenues ont été traitées par une analyse de variance à deux facteurs contrôlés et les moyennes ont été comparées avec le test de Newman-Keuls ($p < 0,05$) (OUAHMANE *et al.*, 2007). Les résultats montrent que cette technique améliore significativement la croissance en hauteur des plants au cours de la première année de plantation (figure 2) (OUAHMANE *et al.*, 2007). Les pentes des courbes de croissance en hauteur ont également été comparées pour chaque traitement en effectuant une analyse de covariance (comparaison des pentes des droites de régression) (OUAHMANE *et al.*, 2007). Les résultats montrent que la pente de la droite de croissance des plants mycorrhizés est statistiquement plus importante que celle des plants non mycorrhizés (OUAHMANE *et al.*, 2007). Outre l'effet positif de l'inoculation mycorrhizienne sur la croissance en hauteur observée au moment de la plantation, ce résultat montre que l'introduction du complexe mycorrhizien améliore effectivement le développement des plants de cyprès au cours de la première année de croissance. Parallèlement, l'inoculation a atténué de manière spectaculaire la crise de transplantation (figure 3). Toutefois, ces interprétations ont été réalisées sur une plantation d'une année et il est nécessaire de suivre l'évolution des plants sur une plus longue période afin de confirmer le rôle

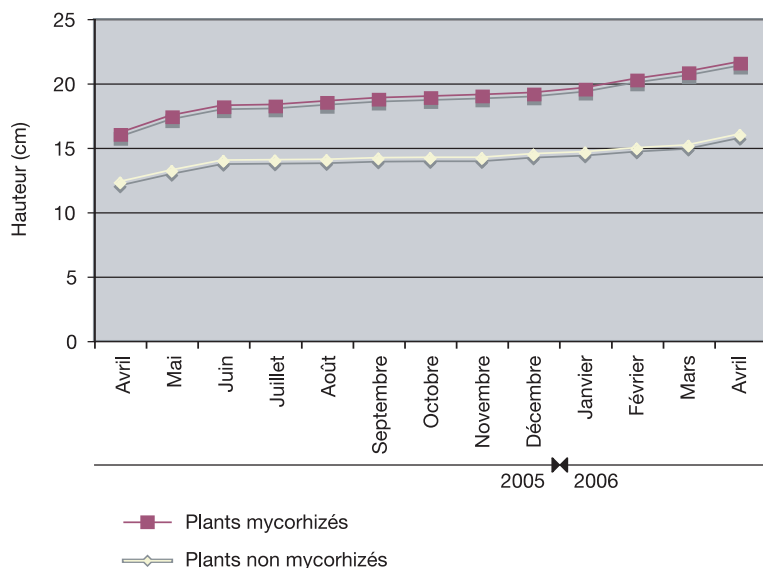
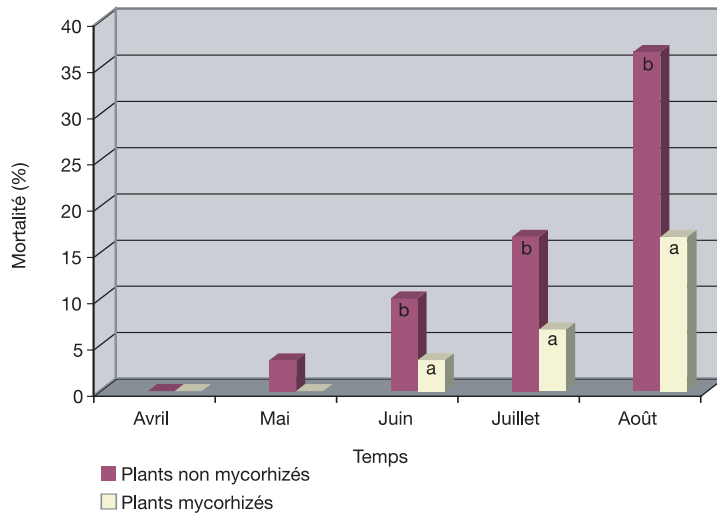
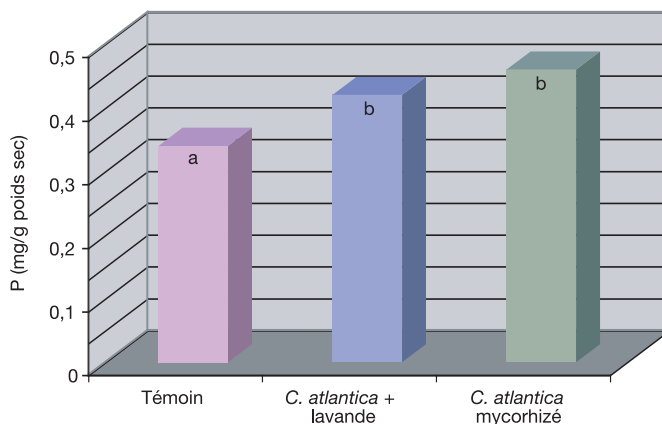
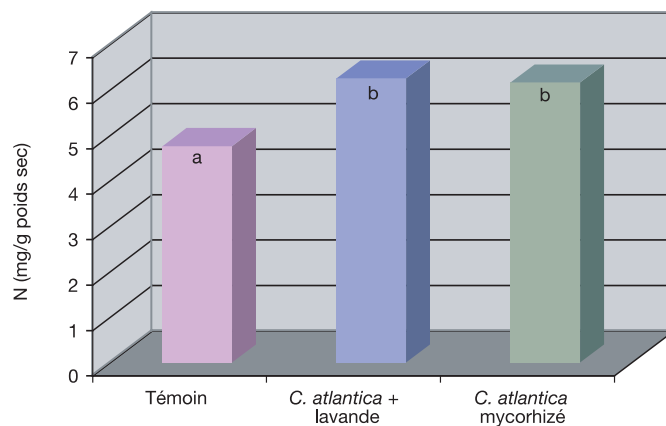


Figure 2.

Évolution de la hauteur de plants de cyprès inoculés ou non par un complexe de souches de champignons mycorrhiziens à arbuscules en plantation dans le Haut Atlas marocain.

**Figure 3.**

Évolution de la mortalité cumulée des plants de cyprès inoculés ou non par un complexe de souches de champignons mycorhiziens à arbuscules en plantation dans le Haut Atlas marocain. Les colonnes indexées par une même lettre ne sont pas significativement différentes du témoin d'après le test de Khi 2 ($p < 0,05$).

**Figure 4.**

Comparaison de l'influence de l'association des plants de *C. atlantica* à des plants de lavande et de l'inoculation par un complexe de souches de champignons mycorhiziens à arbuscules sur les teneurs foliaires en azote et en phosphore. Les colonnes indexées par une même lettre ne sont pas significativement différentes du témoin d'après le test Newman-Keuls ($p < 0,05$).

bénéfique de la mycorhization contrôlée dans le développement du cyprès.

Afin d'évaluer la faisabilité d'une gestion *in situ* du potentiel mycorhizien par des plantes hautement mycotrophes, une plantation expérimentale a été installée dans la station d'Idni avec les traitements suivants : plants de *C. atlantica* non inoculés (témoin), plants de *C. atlantica* associés à des plants de *Lavandula stoechas* (photo 3) et plants de *C. atlantica* inoculés par un complexe de champignons mycorhiziens natifs de la zone à reboiser. Le dispositif expérimental était identique à celui présenté précédemment avec trois blocs et dix répétitions par traitement et par bloc. Les données ont été traitées par une analyse de variance à deux facteurs contrôlés et les moyennes ont été comparées avec le test de Newman-Keuls ($p < 0,05$). Après seulement une année de plantation, nous avons pu observer que les teneurs en N des feuilles des jeunes cyprès étaient aussi élevées chez les plants associés à la lavande que ceux préalablement mycorhizés, mais supérieures à celles relevées chez les cyprès témoins (figure 4). Pour le phosphore, la présence de la lavande a également induit une augmentation de la concentration foliaire par rapport au témoin, dans les mêmes proportions que celles enregistrées avec l'inoculation mycorhizienne (figure 4). Bien que ces résultats soient préliminaires, il semble que cette plante pionnière ait le même rôle dans la nutrition minérale de la plante que l'inoculation préalable par des souches mycorhiziennes. Ces résultats pourraient ouvrir de nouvelles perspectives dans la gestion des systèmes forestiers car, outre leur effet direct sur le cyprès, ces plantes pionnières, de par leur capacité à coloniser des milieux dégradés, pourraient agir aussi contre l'érosion hydrique, facteur majeur de l'appauvrissement des sols méditerranéens.

Conclusion

L'ensemble de ces résultats montre clairement que la symbiose mycorrhizienne constitue un élément clé dans la réussite de programme de reboisement en milieu méditerranéen. La mycorrhization contrôlée, telle qu'elle a été pratiquée depuis de nombreuses années repose sur l'utilisation de souches mycorrhiziennes performantes et compétitives vis-à-vis de la microflore native du milieu. Dans nos travaux, une attention toute particulière a été portée sur l'influence de cette biotechnologie de l'inoculation quant au fonctionnement microbien du sol. Il s'avère que l'origine des souches fongiques utilisées, et dans une moindre mesure la diversité des composantes fongiques de l'inoculum mycorrhizien, a une influence significative sur certains processus microbiens du sol comme par exemple la mobilisation de P à partir de phosphates inorganiques. Cette propriété doit être prise en compte dans le cadre d'une réhabilitation durable d'écosystèmes dégradés.

Enfin, le rôle de la strate arbusculaire dans la distribution des zones de fertilité (îlots de fertilité) susceptibles de contribuer à la dynamique du couvert forestier a été mis en évidence. Une des voies d'action de ces plantes « nurses » consiste à stimuler le développement des communautés de champignons mycorrhiziens. Nos résultats montrent que le potentiel mycorrhizien peut être amélioré par la plantation de tels arbustes. Le recours à ces plantes pionnières pourrait aussi contribuer à limiter les processus d'érosion hydrique, très néfastes dans la zone du pourtour méditerranéen, en établissant artificiellement des bandes de végétation perpendiculaires à la pente. Ces espèces, en améliorant les caractéristiques microbiologiques du sol, pourraient matérialiser des zones de fertilité et constituer des milieux favorables à la croissance d'essences forestières dans le cadre de plantations artificielles.



Photo 3.
Technique de plantation associant plusieurs plants de *L. stoechas*
et un plant de *C. atlantica*.
Photo L. Ouahmane.

Références

- AZCON-AGUILAR C., PALENZUELA J., ROLDAN A., BAUTIST S., VALLEJO R., BAREA J.M., 2003. Analysis of the mycorrhizal potential in the rhizosphere of representative plant species from desertification-threatened Mediterranean shrublands. *Applied Soil Ecology*, 22 : 29-37.
- BOUDY P., 1958. Économie forestière Nord Africaine, description forestière du Maroc. Tome III, Larousse éditeur, Paris, France, p. 1-375.
- BRUNDRETT M.C., 1991. Mycorrhizas in natural ecosystems. *In* : *Advances in Ecological Research*. MacFayden A., Begon M., Fitter A.H. (ed.), Academic Press Ltd., Londres, Royaume-Uni, vol. 21, 171-313.
- CALLAWAY R.M., 1995. Positive interactions among plants. *Botanical Review*, 61 : 306-349.
- CALLAWAY R.M., 1997. Positive interactions in plant communities and the individualistic-continuum concept. *Ecologia*, 112 : 143-149.
- CARRILLO-GARCIA A., BASHAN Y., BETHLENFALVAY G.J., 2000. Resource island soils and the survival of the giant cactus cardon of Baja California Sur. *Plant and Soil*, 218 : 207-214.
- DUPONNOIS R., PLENCHETTE C., THIOULOUSE J., CADET P., 2001. The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology*, 17 (3) : 239-251.
- DUPONNOIS R., COLOMBET A., HIEN V., THIOULOUSE J., 2005. The mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and rock phosphate amendment influence plant growth and microbial activity in the rhizosphere of *Acacia holosericea*. *Soil Biology and Biochemistry*, 37 : 1460-1468.

DUPONNOIS R., PLENCHETTE C., PRIN Y., DUCOUSSO M., KISA M., BÂ A.M., GALIANA A., 2007. Use of mycorrhizal inoculation to improve reforestation process with Australian *Acacia* in Sahelian ecozones. *Ecological engineering*, 29 : 105-112.

GARCIA C., HERNANDEZ T., ROLDAN A., ALBALADEJO J., 1997. Biological and biochemical quality of a semi-arid soil after induced revegetation. *Journal of Environment Quality*, 26 : 1116-1122.

GARNER W., STEINBERGER Y., 1989. A proposed mechanism for the formation of fertile islands in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environment*, 16 : 257-262.

MC LELLAN A.J., FITTER A.H., LAW R., 1995. On decaying roots, mycorrhizal colonization and the design of removal experiments. *Journal of Ecology*, 83 : 225-230.

OUAHMANE L., HAFIDI M., KISA M., BOUMEZOUCH A., THIOULOUSE J., PLENCHETTE C., DUPONNOIS R., 2006 a. Some Mediterranean plant species (*Lavandula* spp. and *Thymus satyroides*) act as "plant nurses" for the early growth of *Cupressus atlantica*. *Plant Ecology*, 185 : 123-134.

OUAHMANE L., HAFIDI M., KISA M., BOUMEZOUCH A., THIOULOUSE J., DUPONNOIS R., 2006 b. *Lavandula* species as accompanying plants in *Cupressus* replanting strategies. Effect on plant growth, mycorrhizal soil infectivity and soil microbial catabolic diversity. *Applied Soil Ecology*, 34 : 190-199.

OUAHMANE L., THIOULOUSE J., HAFIDI M., PRIN Y., DUCOUSSO M., GALIANA A., PLENCHETTE C., KISA M., DUPONNOIS R., 2006 c. Soil functional diversity and P solubilization from rock phosphate after inoculation with native or exotic arbuscular mycorrhizal fungi. *Forest Ecology and Management*. Sous presse.

OUAHMANE L., HAFIDI M., THIOULOUSE J., DUCOUSSO M., KISA M., PRIN Y., GALIANA A., BOUMEZOUCH A., DUPONNOIS R., 2007. Improvement of *Cupressus atlantica* Gaussen growth by inoculation with native arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Applied Microbiology*. Sous presse.

PLENCHETTE C., FORTIN J.A., FURLAN V., 1983. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil*, 70, 199-209.

REQUENA N., PEREZ-SOLIS E., AZCON-AGUILAR C., JEFFRIES P., BAREA J.M., 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Applied and Environmental Microbiology*, 67 : 495-498.

VAN DER HEIJDEN M.G.A., KLIRONOMOS J.N., URSIC M., MOUTOGLIS P., STREITWOLF-ENGEL R., BOLLER T., WIEMKEN A., SANDERS I.R., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396 : 69-72.