

## **Gestion des microorganismes symbiotiques pour une restauration durable de la productivité des agrosystèmes tropicaux et méditerranéens**

**Franche, C.<sup>1</sup> et Duponnois, R.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> UMR DIADE IRD/UM2, Equipe Rhizogénèse, Institut de Recherche pour le Développement (IRD).  
911, Avenue Agropolis. Montpellier. France. Courriel : Claudine.Franche@ird.fr

<sup>2</sup> UMR 113 CIRAD/INRA/IRD/AGRO-M/UM2, Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes (LSTM), Campus International de Baillarguet. Montpellier. France. Courriel : Robin.Duponnois@ird.fr

**RESUME** Une des principales conséquences de la surexploitation des sols et de la paupérisation du couvert végétal est une augmentation des processus d'érosion qui entraîne une baisse de la fertilité physique, chimique mais également biologique (ex : microflore tellurique). Parmi les composantes microbiennes particulièrement sensibles à ces phénomènes d'érosion, figurent les microorganismes symbiotiques (rhizobia, Frankia, champignons mycorrhiziens) connus pour être des composantes clés dans le fonctionnement des principaux cycles biogéochimiques telluriques (C, N et P). De nombreux travaux ont montré l'importance de la gestion de ces microorganismes symbiotiques dans les pratiques culturales visant à améliorer la productivité des agrosystèmes. Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes stratégies de gestion du potentiel des sols en agents microbiens symbiotiques via l'inoculation contrôlée de microorganismes ou d'amélioration d'itinéraires culturaux par l'introduction de plantes nurses à travers différents exemples d'expérimentations réalisées en milieu tropical et méditerranéen.

**Mots clés** : symbiose microbienne, résilience écosystémique, érosion, fertilité des sols

**ABSTRACT** Degraded ecosystems are usually characterised by a disturbed vegetation cover accompanied by a rapid erosion of soil surface (Herrera et al., 1993). The desertification process involves a loss or reduction of major physicochemical and biological soil properties and significantly alters the inoculum potential of symbiotic soil microbial communities, more particularly the symbiotic microorganisms (rhizobia, Frankia, mycorrhizal fungi) known to be key components in the main terrestrial biogeochemical cycles (C, N and P). Many studies have shown the importance of the management of these symbiotic microorganisms in agricultural practices to improve agroecosystem productivity. In this chapter, we describe the different strategies for managing the soil potential of symbiotic microbes via the controlled inoculation of symbiotic microorganisms or the improvement of crop management by introducing nurse plants through various examples of experiments carried out in tropical and Mediterranean areas.

**Keywords:** microbial symbiosis, ecosystem resilience, erosion, soil fertility

## 1. Introduction

La surexploitation des ressources naturelles aboutit principalement à une altération des caractéristiques écologiques du milieu dont les premiers symptômes tangibles sont enregistrés au niveau de la strate épigée (faible densité de recouvrement, diversité appauvrie, baisse de la productivité de l'agrosystème, etc) (Piéri, 1991). Ces dégradations facilitent également les processus d'érosion hydrique et éoliens qui se manifestent par une altération des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols (baisse de la teneur en matière organique et en éléments minéraux, altération de la structure du sol, etc) (Requena et al., 2001). Il a également été clairement établi que la microflore tellurique était particulièrement affectée par ces processus érosifs tant au niveau de sa structure (abondance, diversité génétique) que de sa diversité fonctionnelle (Garcia et al., 1997). Parmi les composantes microbiennes sensibles à ces dégradations figurent les champignons mycorhiziens (Duponnois et al., 2001). Ces symbiotes fongiques sont considérés comme des éléments clés dans le fonctionnement du sol et plus particulièrement dans les milieux arides et semi-arides (Brundrett, 1991). La symbiose mycorhizienne améliore significativement la croissance de la plante en favorisant sa nutrition minérale et son état sanitaire (Smith & Read, 2008). Il a été démontré que l'établissement de la symbiose mycorhizienne influençait également quantitativement et qualitativement les caractéristiques de la microflore tellurique (abondance, diversité génétique et fonctionnelle) conduisant à la formation d'un compartiment microbien spécifique communément appelé « mycorhizosphère » (Duponnois et al., 2005). Elle a aussi un impact positif sur l'établissement des endosymbioses racinaires fixatrices d'azote tant avec les légumineuses que les plantes actinorhiziennes. L'ensemble de ces résultats montre que la symbiose mycorhizienne doit être considérée comme une composante majeure dans l'établissement de pratiques culturales visant à assurer une gestion durable des terres.

Ce chapitre a pour principaux objectifs de proposer des critères d'intervention visant à promouvoir durablement le potentiel infectieux mycorhizogène des sols en présentant quelques exemples de pratiques culturales susceptibles d'assurer le maintien du fonctionnement de la symbiose mycorhizienne au sein d'agrosystèmes plus ou moins dégradés.

En fonction de l'ampleur des perturbations enregistrées, la gestion du potentiel infectieux mycorhizogène (PIM) du sol peut être envisagée selon les stratégies suivantes :

- Agro-Ecosystème dégradé : gestion du PIM *via* la mise en place de techniques culturales appropriées visant à promouvoir l'impact de la symbiose mycorhizienne sur la productivité de l'agrosystème (restauration et réhabilitation)
- Agro-Ecosystème très gravement dégradé : adoption de la technique de mycorhization contrôlée associée à l'introduction d'espèces végétales et de symbiotes mycorhiziens exotiques au milieu.

Ces stratégies seront plus particulièrement développées en prenant comme modèles biologiques les plantes fixatrices d'azote (légumineuses, espèces actinorhiziennes

telles que les Casuarinaceae) connues pour pouvoir se développer dans des conditions environnementales hostiles (carences en azote minéral) et pour améliorer la fertilité des sols (plus particulièrement en azote) et la productivité de l'agrosystème (van der Heijden et al., 2006).

## **2. La gestion du potentiel infectieux mycorrhizogène (PIM) par la valorisation de la biodiversité végétale locale**

La rotation culturale basée sur la succession légumineuse / céréales aboutit généralement à une élévation du PIM et de la teneur en N biodisponible et à une amélioration de la qualité sanitaire du milieu de culture (Ex : effet antagoniste contre les nématodes phytoparasites) (Bagayoko et al., 2000). La conjugaison de ces impacts aboutit à une amélioration significative de la productivité de la culture de céréales associée à cette rotation culturale (Bagayoko et al., 2000). De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de ces rotations culturales légumineuses/céréales sur les teneurs en azote biodisponible pour les plantes (Pierce & Rice, 1988). Toutefois et dans les zones arides et semi-arides, les carences en phosphore sont considérées comme les principaux facteurs limitant la productivité des cultures céréalières. Dans ce contexte, les conséquences sur l'environnement tellurique des rotations culturales associant des successions légumineuses/céréales pourraient favoriser l'enrichissement du sol en P biodisponible (Alvey et al., 2001). Outre l'incidence des légumineuses sur les caractéristiques abiotiques du milieu favorisant la mobilisation du P soluble à partir des formes de phosphate inorganique (Ohwaki & Hirata, 1992), ces plantes peuvent également améliorer le PIM du sol et faciliter l'expression de la symbiose mycorrhizienne sur le développement de la culture céréalière (Bagayoko et al., 2000). En étudiant une rotation culturale associant le niébé (*Vigna unguiculata*) et le mil au Niger, Bagayoko et al. (2000) ont montré que cette pratique culturale améliorerait en moyenne le rendement en grains de la culture céréalière de 22%. Ces effets bénéfiques étaient fortement corrélés aux taux de colonisation des symbiotes fongiques sur les racines de mil.

## **3. La mycorhization contrôlée**

Il est maintenant parfaitement admis que le développement optimal d'une plante est atteint lorsque le taux d'infection mycorrhizienne est élevé (Garbaye, 1988). De nombreux travaux ont également démontré que l'effet de la mycorhization dépendait des symbiotes associés. Ces résultats ont permis de définir une pratique culturale, appelée « mycorhization contrôlée », basée sur la sélection de souches fongiques performantes suivant un paramètre donné (Ex : amélioration de la croissance, résistance au stress salin, etc) pour améliorer les performances de systèmes culturels agricoles ou forestiers. L'efficacité de la mycorhization contrôlée est fonction de 2 paramètres principaux : la fertilité du sol et les caractéristiques du potentiel mycorhizien du site. Cette technique d'inoculation est donc particulièrement efficace dans des milieux gravement dégradés (Ex : remblais, sites miniers) où la diversité et l'abondance des propagules mycorrhiziennes sont très faibles. Cette stratégie de réaffectation du milieu trouve sa pleine expression en foresterie ou en agroforesterie alors que des contraintes techniques limitent son utilisation chez les plantes de grande culture (Ex : production importante d'inocula fongiques, etc). De nombreux essais expérimentaux d'inoculation contrôlée ont été réalisés dans les milieux méditerranéens et tropicaux présentant des degrés de dégradation

importants comme la fixation des dunes côtières ou la phytostabilisation des sites post-miniers en utilisant des espèces exotiques d'arbres fixateurs d'azote à croissance rapide comme les acacias, filaos, etc (Dommergues et al., 1985). Cette conception de la valorisation de la symbiose en sélectionnant des symbiotes performants, compétitifs vis-à-vis de la microflore native et fréquemment inoculés à des espèces exotiques a été remise en question ces dernières années du fait principalement de la démonstration de l'importance de la conservation de la diversité des peuplements de champignons mycorhiziens pour assurer un fonctionnement optimal du sol. En effet Dabire et al. (2007) ont montré que l'introduction dans le sol d'une souche de champignon mycorhizien hautement compétitrice pouvait entraîner une baisse significative de la diversité fonctionnelle de la microflore tellurique et donc fragiliser le sol en regard de contraintes environnementales.

#### 4. La nodulation contrôlée

Dans certaines zones dégradées des régions arides et semi-arides, des expériences d'introduction des espèces ligneuses de la famille des Casuarinacées ont été entreprises (Zhong et al., 2011). Originaires d'Australie et du Sud Est de l'Asie, ces arbres à croissance rapide et aux usages multiples sont caractérisés par une plasticité du système racinaire qui leur permet de s'associer à la fois avec des champignons ectomycorhiziens, des champignons mycorhiziens à arbuscules et avec le microorganisme fixateur d'azote *Frankia*. Utilisés en agroforesterie, ou encore pour protéger les zones littorales des typhons et stabiliser les dunes, les Casuarinas contribuent à fixer jusqu'à 60 kg d'azote par hectare et par an (Diouf et al., 2008). Le développement des nodosités racinaires abritant *Frankia* est le résultat d'un échange de signaux spécifiques produits à la fois par la plante et par le microorganisme (Franche & Bogusz, 2011). Si ceux-ci sont encore mal caractérisés, on sait en revanche qu'il existe une spécificité d'hôte et que certaines souches de *Frankia* isolées à partir de l'espèce *Casuarina glauca* seront par exemple incapables de noduler l'espèce *Allocasuarina verticillata*. L'inoculation en pépinière avec les souches de *Frankia* appropriées constitue donc un préliminaire indispensable dans le cas où le sol est dépourvu des endosymbiotes spécifiques, ce qui est une situation fréquente en Afrique pour les Casuarinacées. En complément de ce traitement, la sélection des champignons endomycorhiziens et (ou) ectomycorhiziens compatibles avec les espèces sélectionnées assurera le succès des projets de plantation (Duponnois et al., 2003).

#### 5. Conclusion et perspectives

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre montre que la gestion du potentiel mycorhizien du sol constitue une approche performante pour améliorer la qualité des sols dans des conditions environnementales diverses des paysages méditerranéens et tropicaux. Cependant cette pratique d'ingénierie écologique doit être raisonnée en fonction des caractéristiques du milieu mais également en fonction des objectifs affichés (restauration, réhabilitation ou réaffectation du milieu). Etant donné que l'abondance mais aussi la diversité des peuplements mycorhiziens constituent les principaux indicateurs de l'efficacité de la symbiose sur le développement de la plante, il est recommandé de valoriser les ressources naturelles mycorhiziennes résilientes dans un environnement donné et de redonner au potentiel mycorhizien un niveau compatible avec une productivité optimale du système cultural. Cette gestion *in situ* peut être réalisée *via* des rotations culturales

associant des plantes hautement mycotrophes ou en utilisant des espèces végétales endémiques et hautement adaptées aux conditions défavorables caractérisant ces milieux dégradés (carences minérales, déficit en eau, etc). La mycorhization contrôlée et en conséquence la simplification induite de la communauté mycorhizienne doit être réservée à des situations très particulières où le système a perdu ses caractéristiques originelles (ex : sites post-miniers) et où l'intervention humaine est obligatoire.

Afin de raisonner au mieux la valorisation des ressources mycorhiziennes des sols, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur les processus biologiques régissant l'évolution spatio-temporelle et le rôle de la symbiose mycorhizienne dans les mécanismes assurant la capacité de résilience des éco- et agrosystèmes.

Toutefois et malgré le potentiel de la symbiose mycorhizienne pour améliorer la productivité des agrosystèmes dans le cadre d'une gestion durable des sols, potentiel qui a été démontré dans de multiples expérimentations, force est de constater que cette technique d'ingénierie écologique reste malheureusement très peu développée dans le monde agricole et plus particulièrement en Afrique. Un effort conséquent doit être entrepris pour vulgariser cette technique afin qu'elle soit prise en compte et valorisée dans les itinéraires culturels habituellement adoptés dans les régions tropicales et méditerranéennes.

## 6. Références

- Alvey, S., Bagayoko, M., Neumann, G. & Buerkert, A., 2001. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils. *Plant and Soil*, 231: 45-54.
- Bagayoko, M., Buerkert, A., Lung, G., Bationo, A. & Roemheld, V., 2000. Cereal/Legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa: soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nématodes. *Plant & Soil*, 218: 103-116.
- Brundrett, M.C., 1991. Mycorrhizas in natural ecosystems. In: Macfayden A, Begon M, Fitter AH (eds), *Advances in Ecological Research*, Vol. 21. Academic Press Ltd., London, pp. 171-313.
- Dabire, A.P., Hien, V., Kisa, M., Bilgo, A., Sangare, K.S., Plenchette, C., Galiana, A., Prin, Y. & Duponnois, R., 2007. Responses of soil microbial catabolic diversity to arbuscular mycorrhizal inoculation and soil disinfection. *Mycorrhiza*, 17: 537-545.
- Diouf, D., Sy, M-O., Gherbi, H., Bogusz, D. & Franche, C., 2008. *Casuarinaceae*. In *Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Forest Tree Species*, vol. 9, Kole, C.R., Scorza, R. & Hall, T.C. (eds), Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp. 279-292.
- Dommergues, Y.R., Duhoux, E. & Diem, H.G., 1985. Les arbres fixateurs d'azote. Éditions Espaces, 34. 528 p.
- Duponnois, R., Diédhiou, S., Chotte, J.L. & Ourey Sy, M., 2003. Relative importance of the endomycorrhizal and (or) ectomycorrhizal associations in *Allocasuarina* and *Casuarina glauca*. *Canadian Journal of Microbiology*, 49: 281-287.
- Duponnois, R., Founoune, H., Masse, D. & Pontanier, R., 2005. Inoculation of *Acacia holosericea* with ectomycorrhizal fungi in a semiarid site in Senegal: growth response and influences on the mycorrhizal soil infectivity after 2 years plantation. *Forest Ecology and Management*, 207: 351-362.

- 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: 239-251.
- Franche, C. & Bogusz, D., 2011. Signaling and communication in the actinorhizal symbiosis. In: Signaling and communication in plant symbioses. S. Perotto & F. Baluska (eds). Springer, pp. 73-92.
- Garbaye, J., 1988. Les plantations forestières tropicales : un champ privilégié pour la mycorhization contrôlée. *Bois et Forêts des Tropiques*, 216: 23-34.
- García, C., Roldán, A. & Hernandez, T., 1997. Changes in microbial activity after abandonment of cultivation in a semi-arid Mediterranean environment. *Journal of Environment Quality*, 26: 285-291.
- Ohwaki, Y. & Hirata, H., 1992. Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid contents in plant tissues and phospholipid levels in roots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38: 235-243.
- Pierce, F.J. & Rice, C.W., 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. P. 21-42. In: Hargrove, W.L. (Ed.) *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Piéri, C., 1991. Les bases agronomiques de l'amélioration et du maintien de la fertilité des terres des savanes au sud Sahara. In: *Savanes d'Afrique, terre fertile ? Actes des rencontres internationales (10-14 Décembre 1990)*. Montpellier, France, pp 43-7.
- 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 Environmental Microbiology*, 67: 495-498.
- Smith, S. & Read J., 2008. *Mycorrhizal symbiosis*, 3<sup>rd</sup> ed. Academic Press, 800 p.
- Van der Heijden, M.G.A., Bakker, R., Verwaal, J., Scheublin, T.R., Rutten, M., van Logtestijn, R. & Staehelin, C., 2006. Symbiotic bacteria as a determinant of plant community structure and plant productivity in dune grassland. *FEMS Microbiology Ecology*, 56: 178-187.
- Zhong, C., Pinyopusarerk, K., Kalingare, A. & Franche, C., 2011. Improving smallholder livelihoods through improved Casuarina productivity. China Forestry Publishing House, 264 p.

**Restauration de la productivité  
des sols tropicaux et méditerranéens  
Contribution à l'agroécologie**

Version préliminaire



**Eric ROOSE**  
Editeur scientifique

**IRD Editions**  
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT  
MONTPELLIER, JUILLET 2015