

# Dynamique temporelle des champignons endomycorhiziens associés à *Mimosa latipinosa* Lam. (Fabaceae)

Cas du site minier de Mandena,  
Madagascar

*Irinah RATSIZAFY*  
CNRE, Madagascar  
Université d'Antananarivo, Madagascar

*Rondro Harinisainana BAOHANTA*  
CNRE, Madagascar

*Martial Doret ANDRIANANDRASANA*  
CNRE, Madagascar

*Faly RANDRIATAFIKA*  
Rio Tinto, Madagascar

*Rivo Andriamaro RAJOHARISON*  
Tropical Biodiversity  
& Social Enterprise, Madagascar

*Tsoushima E. RAZAKATIANA*  
CNRE, Madagascar

*Herizo RANDRIAMBANONA*  
CNRE, Madagascar

*Robin DUPONNOIS*  
IRD, France

*Heriniaina RAMANANKIERANA*  
CNRE, Madagascar

## Introduction

La recolonisation des sols par les végétaux après une exploitation minière est un défi de taille non seulement pour les sociétés minières, qui se sont engagées à les restaurer, mais aussi pour les scientifiques voulant comprendre la complexité des mécanismes qui régissent le fonctionnement de cet écosystème particulier. En effet, plusieurs études ont rapporté que les sols, après l'extraction des

minerais, deviennent extrêmement pauvres en éléments nutritifs, ce qui les rend impropres à l'installation et au développement de la majorité des espèces végétales (L'HUILLIER *et al.*, 2010). Le secteur minier de grande envergure étant en pleine croissance à Madagascar (CANAVESIO, 2014), la perte de la biodiversité et la dégradation de l'environnement sont à craindre.

Le choix des espèces végétales à planter sur les sites miniers doit impérativement tenir compte de leur capacité adaptative et de leur résistance aux contraintes extrêmes de tels sites (L'HUILLIER *et al.*, 2010). Ces espèces, bien que très rares, s'avèrent être des alliées efficaces pour amorcer le processus de restauration écologique de l'écosystème minier (LIU *et al.*, 2014). Elles sont, pour la plupart, qualifiées de « facilitatrices » car leur présence, même transitoire, améliore les conditions du milieu et facilite l'installation et le développement des espèces qui vont leur succéder (HENRY *et al.*, 2017).

Les mécanismes microbiologiques sont très peu exploités dans le phénomène de facilitation « plante-plante » (HOULES, 2017). Or, il a été maintes fois rapporté dans la littérature que dans les environnements arides, et/ou fragiles et stressés, la composante biologique du sol joue un rôle fondamental du fait de ses interactions exceptionnelles avec les plantes (ROGER-ESTRADE, 2013). Ainsi, les champignons mycorhiziens sont connus pour leur aptitude à établir des relations symbiotiques avec 95 % des plantes, dont les principales bénéfiques sont : l'amélioration de la nutrition minérale (phosphore et azote) et hydrique, l'amélioration de la structure du sol par la présence des hyphes extra-matriciels et la stimulation des autres micro-organismes bénéfiques par la production de substances spécifiques (ASMELASH *et al.*, 2016).

Concernant l'écosystème minier de Fort-Dauphin à Madagascar (notamment sur le site minier de Mandena), une attention particulière a été portée dans cette étude sur une espèce native, *Mimosa latispinosa* Lam. (Fabaceae ou Leguminosae). Des études précédentes ont en effet montré que cette espèce est capable de s'adapter aux conditions drastiques du sol après exploitation minière ; elle est également reconnue pour sa capacité à former des relations symbiotiques à la fois avec les *rhizobia* (bactéries fixatrices d'azote atmosphérique) et les champignons endomycorhiziens à arbuscules (MA) (SARASIN, 2011).

L'objectif principal de cette étude a été de suivre la dynamique temporelle des MA associés à l'espèce *M. latispinosa* implantée sur des sols déminéralisés après extraction des minerais. Pour ce faire, les objectifs spécifiques étaient d'évaluer à trois âges différents, d'une part, la densité des spores contenues dans le sol et, d'autre part, leur diversité spécifique.

## Matériels et méthodes

### Prélèvement des échantillons

Les échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0 à 20 cm dans le site minier de Mandena (S 24°56'56.33" ; E 46°59'54.08", à une altitude de 7 m au-dessus du niveau de la mer) à partir de trois parcelles revégétalisées avec *M. latipinosa* et âgées respectivement de six mois, un an et trois ans. Les échantillons de sol provenant de la forêt conservée dans le site minier de Mandena ont été utilisés comme « sol de référence ».

Pour chaque parcelle, l'échantillonnage a été réalisé au hasard avec quatre points différents de prélèvement afin d'assurer la meilleure représentativité. Ces quatre prélèvements de sol ont été mélangés dans un container stérile, et ce mélange constitue alors l'échantillon composite de la parcelle. Cette opération est répétée trois fois par parcelle.

### Analyses chimiques des sols

Les propriétés chimiques de l'ensemble des sols ont été analysées de la manière suivante. Le pH a été mesuré par électrométrie dans une suspension sol-solvant (1 : 2,5 ; v/v). Le carbone organique total (C) a été dosé par oxydation avec du dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ), en présence d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) concentré. L'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl décrite par PAUWELS *et al.* (1992). Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Bray II qui combine extraction du phosphore en milieu acide (HCl 0,1 N) et complexation par le fluorure d'ammonium ( $NH_4F$  0,03 N) de l'aluminium lié au phosphore.

### Extraction et dénombrement des spores

Les spores de MA ont été extraites selon la méthode de tamisage humide décrite par SIEVERDING (1991). Ainsi, 100 g de sol préalablement séché à l'air ambiant pendant 72 heures ont été tamisés avec des tamis moléculaires de mailles différentes (200  $\mu m$ , 100  $\mu m$ , 80  $\mu m$  et 50  $\mu m$ ), sous un jet d'eau permanent. Chaque fraction de sol retenue dans les différents tamis a été récupérée dans des tubes à centrifuger de 50 ml. Deux séries de centrifugation ont été ensuite réalisées : une première série avec de l'eau distillée stérilisée à 5 000 tours pendant 5 minutes et une deuxième série avec une solution de saccharose à 60 % à 1 000 tours pendant 3 minutes. Les spores qui ont migré par gradient de concentration vers le surnageant ont été récupérées sur du papier Wattman n° 1 quadrillé à travers un appareil de filtration millipore.

L'observation et le comptage des spores ont été réalisés au microscope (grossissement  $\times 400$ ). Les spores ont été comptées selon leur taille (200  $\mu m$ , 100  $\mu m$ , 80  $\mu m$  et 50  $\mu m$ ) et classées en morphotypes selon leur couleur (noir, brun, marron, jaune, blanc). La densité totale des spores est exprimée en nombre de spores/100 g de sol sec.

## Identification des spores

La description morphologique des spores a été réalisée selon le nuancier standardisé de couleurs des champignons Glomales établi par l'International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (Invam, <https://invam.wvu.edu/>).

Pour l'identification anatomique, une seule spore intacte par morphotype a été montée sur une lame de verre et colorée avec du polyvinyl lactophénol (PVLG) (1 : 1), puis observée afin de décrire son aspect externe. Ensuite, une autre spore du même morphotype a été montée entre lame et lamelle, broyée, colorée avec une solution de PVLG contenant du réactif de Meltzer, puis observée au microscope afin de décrire ses caractères anatomiques (AZCON-AGUILAR *et al.*, 2003).

Les critères de MUTHUKUMAR *et al.* (2009) et de l'Invam ont été utilisés pour l'identification des spores. Ces critères prennent en compte la morphologie, la disposition, la taille, la forme, la couleur des spores, les formes des hyphes sous-jacentes, l'ornementation des murs qui constituent leur paroi, les structures des couches murales et leur réaction aux différentes colorations ainsi que le contenu des spores.

## Évaluation de la diversité spécifique des MA

La diversité des MA a été évaluée en calculant la fréquence relative ( $f_i$ ) et les indices de diversité de Shannon-Weiner ( $H'$ ), selon les formules suivantes :

$$f_i = \frac{\text{Nombre de spores par morphotype identifié}}{\text{Nombre total de spores}} \quad H' = -\sum_{i=1}^S f_i \cdot \log_2 f_i$$

## Analyses statistiques

Pour toutes les variables étudiées, une analyse de variance a été effectuée. Les données ne répondant pas aux hypothèses de l'analyse de variance (normalité, homoscélasticité) ont été transformées selon les besoins, mais les résultats sont présentés dans leur échelle de mesure originale. Les moyennes ont été comparées selon le test de Newman-Keuls. La signification statistique est de  $p < 0,05$ . Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel XLSTAT 2018.

# Résultats

## Propriétés chimiques des sols

Les propriétés chimiques des sols montrent une évolution après la colonisation du sol par *M. latispinosa* (tabl. 1). Une nette amélioration de ces propriétés est

en effet observée après trois ans de culture de *M. latipinosa*. Les teneurs en azote (N) et en carbone (C) des sols dépassent largement celles du sol de référence (sol de la forêt de la zone de conservation) avec respectivement une teneur en azote de 0,175 % contre 0,126 % et une teneur en carbone de 2,14 % contre 1,66 %. Par ailleurs, une augmentation progressive du pH du sol déminéralisé (pH = 3,29) est également enregistrée avec l'installation de *M. latipinosa*.

Tableau 1  
Évolution des propriétés chimiques des sols sous *M. latipinosa*.

	pH (eau)	N (%)	P (ppm)	K (meq/100 g)	C (%)	C/N
SD	3,29	0,007	0,1	0,034	0,06	8,6
T0	3,92	0,091	0,9	0,031	1,02	11,2
T1	4,04	0,105	1,2	0,028	1,49	14,2
T2	4,78	0,175	2,3	0,058	2,14	12,2
TFC	5,19	0,126	4,3	0,135	1,66	13,2

pH : potentiel d'hydrogène ; C : carbone ; N : azote total ; P : phosphore assimilable ; K : potassium total.  
SD : sol déminéralisé ; T0 : sol sous *M. latipinosa* après six mois de culture ; T1 : sol sous *M. latipinosa* après un an de culture ; T2 : sol sous *M. latipinosa* après trois ans de culture ; TFC : sol issu de la forêt de la zone de conservation.

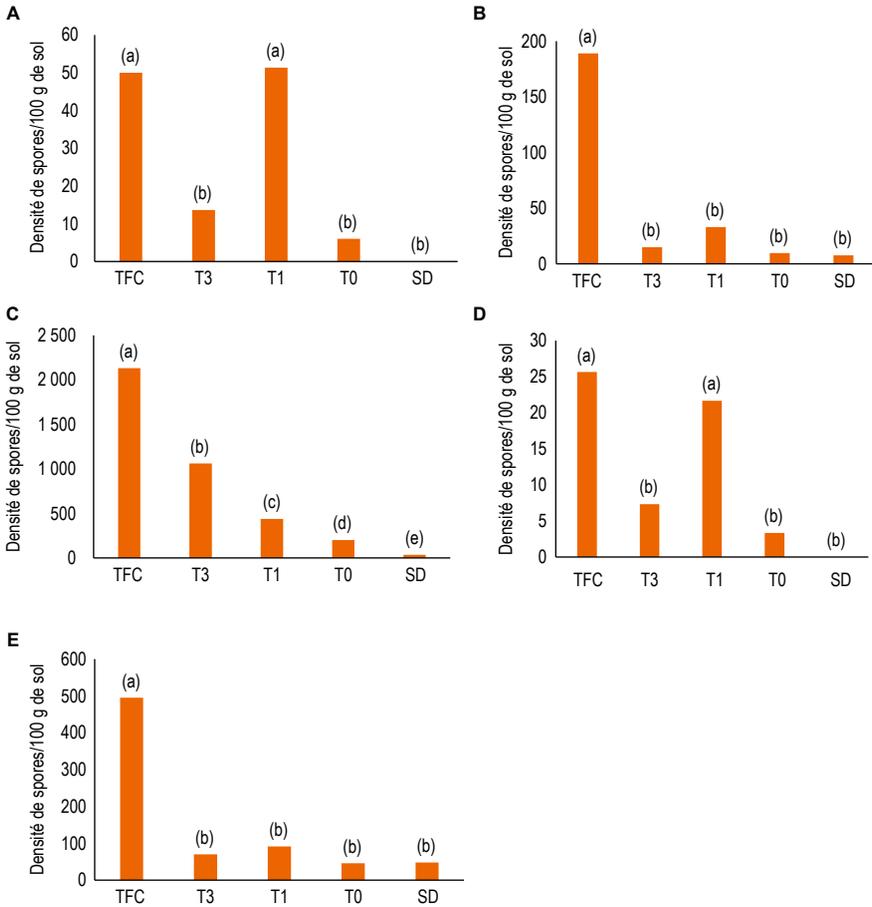
## Identification des spores

L'identification morphotypique des spores issues des sols de Mandena montre qu'elles appartiennent à trois familles : (1) la famille des Glomeraceae avec quatre espèces – *Glomus hoi*, *Funneliformis coronatum*, *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices* –, (2) les Gigasporaceae avec *Gigaspora* sp. et (3) les Acaulosporaceae avec *Acaulospora* sp.

## Densité et diversité des spores

Les résultats montrent une augmentation de la densité des spores de MA avec le temps (fig. 1). Une différence significative de la densité totale des spores est observée dès la première année de colonisation du sol par *M. latipinosa*, et cette densité augmente significativement d'année en année passant ainsi de 265 spores/100 g de sol après six mois de culture à 1 168 spores/100 g de sol après trois ans de colonisation. Le sol déminéralisé renferme la densité totale la plus faible avec 59 spores/100 g de sol tandis que le sol forestier de la zone de conservation renferme la densité la plus élevée (2 921 spores/100 g de sol).

Par ailleurs, trois espèces de MA sont toujours présentes dans le sol déminéralisé (*F. mosseae*, *G. hoi* et *R. intraradices*). Bien que la densité de leurs spores soit faible comparée à celles dans les autres sols, il existe une relative codominance entre ces trois espèces dans les sols déminéralisés, surtout entre *G. hoi* et *R. intraradices* dont les fréquences relatives respectives sont de 38,20 % et 53,50 % (tabl. 2).



**Figure 1**

Évolution dans le temps des espèces présentes dans les sols sous *Mimosa latispinosa*.

A : *Acaulospora* sp., B : *Funneliformis mosseae*, C : *Glomus hoi*,

D : *Funneliformis coronatum*, E : *Rhizophagus intraradices*

SD : sable déminéralisé, T0 : sol sous *M. latispinosa* après six mois de culture,

T1 : sol sous *M. latispinosa* après un an de culture, T2 : sol sous *M. latispinosa* après trois ans de culture,

TFC : sol de la forêt de la zone de conservation.

Les histogrammes marqués par une même lettre ne présentent pas de différence significative selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité 0,05.

Après la mise en culture de *M. latispinosa*, deux nouvelles espèces de MA (*Acaulospora* sp. et *F. coronatum*) apparaissent dans le sol. La densité de leurs spores augmente la première année puis diminue fortement la troisième année (fig. 1A et 1D). *G. hoi* est de plus en plus dominante au cours du temps (fig. 1C), atteignant une fréquence relative importante, de 90,93 %, la troisième année de culture (tabl. 2). En revanche, les densités des spores de *F. mosseae* et *R. intraradices* n'évoluent pas et ne sont pas significativement différentes de celles rencontrées dans le sol déminéralisé (fig. 1B et 1E).

Tableau 2  
Densité et diversité des spores endomycorhiziennes dans les sols sous *M. latipinosa*.

Sol	Densité totale de spores/100 g de sol	Fréquence relative (%)					Indice de Shannon-Wiener (H')	
		<i>Gigaspora</i> sp.	<i>Rhizophagus intraradices</i>	<i>Funneliformis coronatum</i>	<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Glomus hoi</i>		<i>Acaulospora</i> sp.
TFC	2 921,33 (a)	0,99	16,85	0,87	6,34	73,26	1,69	1,231 (b)
T3	1 168,67 (b)	-	5,99	0,63	1,29	90,93	1,17	0,566 (d)
T1	636,67 (c)	-	14,35	3,44	5,22	68,87	8,12	1,448 (a)
T0	265,67 (cd)	-	17,45	1,27	3,61	75,39	2,28	1,115 (b)
SD	59,33 (d)	-	84,33	-	6,27	9,40	-	0,766 (c)

SD : sable déminéralisé, T0 : sol sous *M. latipinosa* après six mois de culture, T1 : sol sous *M. latipinosa* après un an de culture, T2 : sol sous *M. latipinosa* après trois ans de culture, TFC : sol issu de la forêt de la zone de conservation.

Le sol sous culture de *M. latispinosa* depuis un an présente l'indice de diversité de Shannon-Wiener le plus élevé (1,448) suivi du sol cultivé depuis six mois et du sol forestier, avec des valeurs respectives de 1,115 et de 1,231 (tabl. 2). Le sol sous *M. latispinosa* depuis trois ans présente l'indice le plus faible (0,566). Il n'existe aucune différence significative entre les indices de diversité des sols colonisés par *M. latispinosa* depuis six mois, un an et le sol forestier. Cependant, l'indice de diversité des MA dans le sol colonisé par *M. latispinosa* pendant trois ans a diminué significativement.

## Discussion

Associées à des micro-organismes bénéfiques, tels que les bactéries fixatrices d'azote et les champignons mycorhiziens pour certaines espèces, les légumineuses, comme *M. latispinosa*, ont la capacité de se développer sur des écosystèmes fortement dégradés. Par ailleurs, leur utilisation dans les programmes de restauration est généralement conseillée (CHAER *et al.*, 2011). Notre étude a évalué l'évolution temporelle de la diversité des MA associés à *M. latispinosa* sur des sols déminéralisés après exploitation minière. En effet, parmi les micro-organismes interagissant avec les plantes, les MA jouent un rôle important dans la résistance et la survie des plantes dans ces milieux difficiles (DUPONNOIS *et al.*, 2010). Cependant, notre étude montre que la déminéralisation du sol a un fort impact sur la densité et la diversité de ces champignons.

Par ailleurs, l'installation et le développement de *M. latispinosa* induisent une augmentation significative au cours du temps de la densité des spores de MA. Toutefois, cette densité, même après trois années de culture, n'atteint pas celle des sols forestiers. Cela pourrait être lié à la diversité végétale relativement plus élevée dans la forêt (XIANG *et al.*, 2014).

L'identification des spores a mis en avant la famille des Glomeraceae. En effet, les espèces de cette famille, à laquelle la majorité des MA appartiennent, sont reconnues comme bien adaptées aux environnements soumis à des perturbations et à des stress (BENCHERIF *et al.*, 2015). Trois espèces de cette famille (*F. mosseae*, *G. hoi* et *R. intraradices*) sont ainsi toujours présentes, bien qu'en faibles quantités, dans le sol déminéralisé.

Une fois *M. latispinosa* mise en culture, deux espèces (*F. coronatum* et *Acaulospora* sp.) apparaissent et sporulent activement dès la première année de colonisation, puis la densité de spores diminue significativement lors de la troisième année de colonisation. En revanche, *Gigaspora* sp., pourtant présente dans le sol forestier, n'apparaît pas dans les sols après trois années de culture de *M. latispinosa*. Ces résultats s'accordent avec ceux de MAHERALI et KLIRONOMOS (2012) ; ces auteurs ont, en effet, mis en évidence que les espèces des Gigasporaceae présentent une colonisation limitée et lente et que, inversement,

les espèces des Glomeraceae colonisent rapidement et largement les racines. La compréhension des traits d'histoire de vie des champignons endomycorhiziens – c'est-à-dire leur capacité de colonisation, de dispersion et de tolérance face aux stress – est donc indispensable pour l'amélioration sur le long terme des programmes de restauration des écosystèmes miniers (GUO *et al.*, 2019).

Une augmentation significative de la densité de *G. hoi* après la mise en culture de *M. latipinosa* a également été mise en évidence. Ainsi, après trois ans de colonisation, une forte dominance de *G. hoi* est observée avec une fréquence relative de plus de 90 %. Cette dominance pourrait être expliquée par l'amélioration de la teneur en azote induite par la présence de *M. latipinosa*. En effet, HODGE ET FITTER (2010) ont montré qu'un enrichissement en azote entraînait une prolifération des spores de petites tailles comme *Glomus*. D'un point de vue plus spécifique, BARRETT *et al.* (2011) ont mis en évidence une implication directe de *G. hoi* dans la minéralisation de l'azote à partir de résidus organiques. Cette dominance quasi exclusive de *G. hoi* dans les sols sous *M. latipinosa* âgés de trois ans explique les faibles valeurs de l'indice de Shannon-Wiener. En effet, une communauté dominée par une espèce aura un coefficient inférieur à celui d'une communauté où toutes les espèces co-dominent (EL AYMANI *et al.*, 2019).

La monoculture de *M. latipinosa* lors de ces essais pourrait également être à l'origine de la dominance de *G. hoi*, puisque la composition de la communauté de champignons peut être fortement influencée par l'espèce-hôte (LIN *et al.*, 2015).

## Conclusion

Cette étude a mis en évidence la dynamique (densité et diversité) des espèces de MA associées à *M. latipinosa* mise en culture sur des parcelles de sol déminéralisé et ce, dans l'écosystème minier de Mandena à Fort-Dauphin (Madagascar). La présence de *M. latipinosa* sur le sol déminéralisé a amélioré ses propriétés chimiques. Il convient tout de même de souligner que d'autres études sur la toxicité et la structure physique des sols seraient nécessaires pour compléter ces résultats.

Cette étude a également montré que, malgré l'amélioration des qualités chimiques des sols à réhabiliter, la culture monospécifique de *M. latipinosa* entraîne, après trois années, une diminution de la diversité des MA, avec une nette dominance de *G. hoi* par rapport aux autres espèces.

Les résultats de cette étude sont pionniers. Pour renforcer les processus de restauration écologique d'un écosystème minier, il est indispensable de continuer les recherches sur les mécanismes qui régissent la dynamique des micro-organismes bénéfiques dans un sol déminéralisé seront nécessaires.

## Remerciements

Les auteurs remercient vivement le programme « Sud Expert Plantes Développement Durable » (SEP2D) pour le financement accordé via le projet de recherche Decore<sup>1</sup>, ainsi que les partenaires techniques (Qit Madagascar Minerals, QMM) et scientifiques (Laboratoire des symbioses tropicales et méditerranéennes, LSTM, à Montpellier). Ce travail n'aurait pu avoir lieu sans l'accord du Centre national de recherches sur l'environnement (CNRE) de Madagascar.

## Références bibliographiques

**ASMELASH F., BEKELE T., BIRHANE E., 2016**

The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. *Frontiers in microbiology*, 7 : 1095.

**AZCON-AGUILAR C., PALENZUELA J., ROLDAN A., BAUTISTA 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 (1) : 29-37.

**BARRETT G., CAMPBELL C. D., FITTER A. H., HODGE A., 2011**

The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus hoi* can capture and transfer nitrogen from organic patches to its associated host plant at low temperature. *Applied Soil Ecology*, 48 (1) : 102-105.

**BENCHERIF K., BOUTEKRAÏT A., FONTAINE J., LARUELLE F., DALPÉ Y., SAHRAOUI A. L. H., 2015**

Impact of soil salinity on arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity and microflora biomass associated with *Tamarix articulata* Vahl rhizosphere in arid and semi-arid Algerian areas. *Science of the Total Environment*, 533 : 488-494.

**CANAVESIO R., 2014**

Formal mining investments and artisanal mining in southern Madagascar: effects of spontaneous reactions and adjustment policies on poverty alleviation. *Land Use Policy*, 36 : 45-154.

**CHAER G. M., RESENDE A. S., CAMPELLO E. F. C., FARIA S. M. (de), BODDEY R. M., 2011**

Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. *Tree Physiology*, 31 (2) : 139-149.

**DUPONNOIS R., BÂ A. M., PRIN Y., BAUDOIN E., GALIANA A., DREYFUS B., 2010**

« Les champignons mycorrhiziens : une composante majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux ». In Dia A. et Duponnois R. (éd.) : *Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : concepts et mise en œuvre*, IRD Éditions, coll. Synthèse, Marseille : 421-440.

**EL AYMANI, I., EL GABARDI S., ARTIB M., CHLIYEH M., SELMAOUI K., OUAZZANI TOUHAMI A., DOUIRA A., 2019**

Effect of the number of years of soil exploitation by saffron cultivation in Morocco on the diversity of endomycorrhizal fungi. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 54 (1) : 9-24.

<sup>1</sup> Développement d'un pôle de compétences local en matière de restauration écologique de la végétation originelle et de production de bois dans les surfaces exploitées par Qit Madagascar Minerals (QMM) : importance des interactions biodiversité hypogée et épigée.

- GUO Y., HOU L., ZHANG Z., ZHANG J., CHENG J., WEI G., LIN Y., 2019**  
Soil microbial diversity during 30 years of grassland restoration on the Loess Plateau, China: tight linkages with plant diversity. *Land Degradation & Development*, 30 (10) : 1172-1182.
- HENRY C., RAIVOARISOA J.-F., RAZAFIMAMONJY A., RAMANANKIERANA H., ANDRIANAIVOMAHEFA P., DUCOUSSO M., SELOSSE M.-A., 2017**  
Transfer to forest nurseries significantly affects mycorrhizal community composition of *Asteropeia mchersonii* Wildings. *Mycorrhiza*, 27 (4) : 321-330.
- HODGE A., FITTER A. H., 2010**  
Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (31) : 13754-13759.
- HOULES A., 2017**  
Principe de facilitation appliqué à la restauration écologique de sites miniers dégradés : suivi des communautés ectomycorhiziennes au cours de successions végétales assistée par *Acacia spirorbis*. Thèse de doctorat, université de Montpellier, 242 p.
- L'HUILLIER L., JAFFRÉ T., WULFF A., 2010**  
*Mines et environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration*. Éditions IAC, Institut agronomique néocalédonien, Nouméa. 411 p.
- LIN G., MCCORMACK M. L., GUO D., 2015**  
Arbuscular mycorrhizal fungal effects on plant competition and community structure. *Journal of Ecology*, 103 : 1224-1232. DOI : 10.1111/1365-2745.12429
- LIU J., ZHANG X. H., LI T. Y., WU Q. X., JIN Z. J., 2014**  
Soil characteristics and heavy metal accumulation by native plants in a Mn mining area of Guangxi, South China. *Environmental monitoring and assessment*, 186 (4) : 2269-2279.
- MAHERALI H., KLIRONOMOS J. N. 2012**  
Phylogenetic and trait-based assembly of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *PLoS One*, 7 (5) : e36695.
- MUTHUKUMAR T., SATHIYADASH K., UMA E., MUNIAPPAN V., 2009**  
Arbuscular mycorrhizal morphology in sporophyte of *Psilotum nudum*. *Phytomorphology*, 59 (3/4) : 141-146.
- PAUWELS J. M., VAN RANST E., VERLOO M., MVONDO ZE A., 1992**  
*Manuel de laboratoire de pédologie. Méthodes d'analyses de sols et de plantes, équipement, gestion de stocks de verrerie et de produits chimiques*. Publications agricoles 28. Administration générale de la coopération au développement, Bruxelles, Belgique et Centre universitaire de Dschang, 265 p.
- ROGER-ESTRADE J., 2013**  
Le sol, patrimoine vivant. *Pour*, 2013 (4) : 53-63.
- SARASIN G., 2011**  
*Biotechnologie des symbioses racinaires en restauration écologique des écosystèmes dégradés à Madagascar*. Rapport de maîtrise, université Laval, 91 p.
- SIEVERDING E., 1991**  
*Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agroecosystems*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Bremer.
- XIANG D., VERBRUGGEN E., HU Y., VERESOGLOU S. D., RILLIG M. C., ZHOU W., XU T., LI H., HAO Z., CHEN Y., CHEN B., 2014**  
Land use influences arbuscular mycorrhizal fungal communities in the farming pastoral ecotone of northern China. *New Phytologist*, 204 : 968-978.

Éditeurs scientifiques

J.-P. Profizi, S. Ardila-Chauvet, C. Billot, P. Couteron,  
M. Delmas, T. M. H. Diep, P. Grandcolas, K. Kokou,  
S. Muller, A. S. Rana, H. L. T. Ranarijaona, B. Sonke

# Biodiversité des écosystèmes intertropicaux

Connaissance,  
gestion durable et valorisation



# Biodiversité des écosystèmes intertropicaux

Connaissance, gestion durable  
et valorisation

Éditeurs scientifiques

Jean-Pierre PROFIZI, Stéphanie ARDILA-CHAUVET, Claire BILLOT,  
Pierre COUTERON, Maité DELMAS, Thi My HANH DIEP,  
Philippe GRANDCOLAS, Kouami KOKOU, Serge MULLER,  
Anshuman Singh RANA, Hery Lisy Tiana RANARIJAONA, Bonaventure SONKE

*Cet ouvrage est une contribution du programme  
« Sud Expert Plantes Développement Durable » (SEP2D).  
Il a bénéficié du soutien de Agropolis Fondation.*

**IRD Éditions**

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Collection Synthèses

Marseille, 2021

Photo 1<sup>re</sup> de couverture

© IRD/R. Oslisly – Forêt galerie dans le parc national de la Lopé, Gabon.

Photo 4<sup>e</sup> de couverture

© IRD/G. Villegier – Fruits de *Coffea liberica*, espèce endémique d'Afrique de l'Ouest, introduite à La Réunion.

**Citation requise :**

PROFIZI J.-P. et al. (éd.), 2021 : *Biodiversité des écosystèmes intertropicaux. Connaissance, gestion durable et valorisation*. Marseille, IRD Éditions, coll. Synthèse, 784 p.

**Coordination fabrication**

IRD/Catherine Guedj

**Préparation éditoriale**

Agropolis Production/Isabelle Amsallem

**Mise en page**

Desk (53)

**Maquette de couverture**

IRD/Michelle Saint-Léger

**Maquette intérieure**

IRD/Pierre Lopez

La loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contre-façon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

**© IRD, 2021**

ISBN papier : 978-2-7099-2938-7  
ISSN : 2431-7128

ISBN PDF : 978-2-7099-2939-4  
ISBN epub : 978-2-7099-2940-0