



**HAL**  
open science

## Emploi d'amendement organique et de champignons endomycorhiziens pour la phytostabilisation de laitiers sidérurgiques

Mathieu Scattolin, Daniel Garcia, Olivier Faure, Fernando Pereira, Frédéric Paran

### ► To cite this version:

Mathieu Scattolin, Daniel Garcia, Olivier Faure, Fernando Pereira, Frédéric Paran. Emploi d'amendement organique et de champignons endomycorhiziens pour la phytostabilisation de laitiers sidérurgiques. 2èmes Rencontres Scientifiques: Réhabilitation et Valorisation des Sites et Sols pollués - 2nd Scientific Meeting: Rehabilitation of polluted Sites and Soils, RV2S/RSS 2018, Oct 2018, Saint-Etienne, France. pp.84 à 89. emse-03149742

**HAL Id: emse-03149742**

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-03149742v1>

Submitted on 23 Feb 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.

## Emploi d'amendement organique et de champignons endomycorhiziens pour la phytostabilisation de laitiers sidérurgiques

Mathieu Scattolin, Daniel Garcia, Olivier Faure, Fernando Pereira, Frédéric Paran

Mines Saint-Étienne, "Centre National de la Recherche Scientifique" (CNRS), "Unité Mixte de Recherche" (UMR)  
5600 "Environnement, Ville et Société" (EVS), Centre "Sciences des Processus Industriels et Naturels" (SPIN),  
Département "Procédés pour l'Environnement et les Géo-ressources" (PEG), F - 42 023 Saint-Étienne (France)  
[mathieu.scattolin@mines-stetienne.fr](mailto:mathieu.scattolin@mines-stetienne.fr)

### RÉSUMÉ

Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles (classifiées en tant que déchets) produites en grandes quantités par l'industrie du fer et de l'acier : la sidérurgie. Particulièrement riches en éléments traces métalliques, ces matériaux sont massivement stockés au sein de crassiers et constituent autant de nuisances potentielles pour l'environnement et la santé publique. Plusieurs études [(Mendez et Maier, 2008), (Vameralli et al., 2010)] ont mis en évidence l'efficacité de procédés de phytostabilisation pour réhabiliter des sites contaminés par de fortes teneurs en métaux, aussi bien par leurs aspects durables et écologiques que pour leurs faibles coûts de mise en œuvre. Le site SAFIR<sup>1</sup> d'Industeel<sup>2</sup> considéré renferme approximativement 500 000 tonnes de laitiers étalés sur une superficie d'environ 4 ha. Une précédente étude (Bourchardon et al., 2014) réalisée sur ce même crassier a démontré que l'emploi de MIATE<sup>3</sup> en tant qu'amendement organique favorise l'installation d'espèces herbacées métallophytes capables de s'implanter naturellement sur ce type de substrat. Ont été ici évalués: 1) les effets conjoints de l'apport de MIATE et de l'inoculation d'un champignon AMF<sup>4</sup> sur la végétation aussi bien en termes de production de biomasse que d'accumulation en éléments métalliques dans les organes aériens et 2) la quantité optimale de MIATE à apporter en vue d'obtenir les meilleurs taux de mycorhization (symbiose entre les plantes et l'AMF).

**MOTS-CLÉS** : laitier sidérurgique, phytomanagement, éléments traces métalliques, champignon AMF.

### ABSTRACT

Steel slags are major by-products (considered as waste) produced by the steel and iron industry. Particularly rich in metallic trace elements, these materials are massively stored in slagheaps and constitute as many potential nuisances for the environment and public health. Several studies [(Mendez et Maier, 2008), (Vameralli et al., 2010)] have shown the effectiveness of phytostabilization processes for rehabilitating sites contaminated by high levels of metals, both because of their sustainable and ecological aspects but also due to their low implementation costs. The SAFIR Industeel slagheap considered contains approximately 500 000 tons of slags spread over an area of about 4 ha. A previous study (Bourchardon et al., 2014) carried out on the same site has demonstrated that the use of "Composted Sewage Sludge" (CSS) as an organic amendment favors the installation of metallophytes herbaceous species able to naturally grow on this type of substrate. Here, have been evaluated: 1) the combined effects of CSS and inoculation of an AMF on vegetation in terms of biomass production as well as accumulation of metallic compounds in aerial parts and 2) the optimal amount of CSS in order to obtain the best rates of mycorrhization (symbiosis between the plants and the AMF).

**KEYWORDS**: steel slag, phytomanagement, metallic trace metals, AMF.

### INTRODUCTION

L'acier est un matériau très apprécié pour ses nombreuses qualités : résistance mécanique élevée, entretien facile, forte capacité de recyclage, etc. Son emploi dans le monde est aujourd'hui 7 fois plus important qu'en 1950 et des estimations suggèrent que, d'ici 2050, la production mondiale d'acier tendra à augmenter d'1,5 fois (Pandia et al., 2016). Les sous-produits formés lors de la fusion ou de l'élaboration d'un métal sont appelés laitiers. Ce terme générique englobe plusieurs matériaux aux

---

1 "Sites Ateliers Français pour l'Innovation et la Recherche" (SAFIR) [<http://www.safir-network.com/>] ;

2 Site Industeel France ArcelorMittal [<http://www.arcelormittalinfrence.com/our-business/our-plant-and-products/industeel.aspx>] de Châteauneuf (Loire) ;

3 "Matériaux d'Intérêt Agronomique issus du Traitement des Eaux" (MIATE) ;

4 "Arbuscular Mycorrhizal Fungus" (AMF).

caractéristiques physico-chimiques différentes en fonction du procédé employé. Il s'agit généralement de matrices minérales essentiellement composées de silicates, d'aluminates et de chaux combinées avec divers métaux (spéciation sous forme métal, oxyde et/ou hydroxyde).

Le phytomanagement regroupe un ensemble de techniques faisant intervenir les végétaux dans des opérations de gestion des sols pollués afin d'en éliminer ou contrôler les contaminants. La phytostabilisation est une option recourant à des plantes pour réduire la migration des polluants du réservoir contaminé vers les milieux qui l'environnent, sans engendrer une concentration excessive dans les végétaux sélectionnés.

Plusieurs études récentes ont démontré tous les bénéfices de l'emploi de champignons AMF dans des projets de phytostabilisation dans des contextes de pollution métallique [(Firmin et al., 2015), (Lacercat-Didier et al., 2016)] et sur substrat basique [(Orłowska et al., 2010), (Giridhar Babu et Sudhakara Reddy, 2011)]. Ces micro-organismes sont capables d'interagir étroitement avec les racines des plantes : les mycorhizes représentent les résultats de cette symbiose. Les champignons AMF augmentent significativement le volume de sol explorable par les racines des plantes, ce qui améliore l'absorption des éléments nutritifs par la végétation ainsi que la structure du sol (Meier et al., 2012). Wu et al. (2016) ont également démontré la capacité des mycorhizes à immobiliser le chrome dans leurs hyphes tout en limitant sa translocation dans les parties aériennes.

Les expérimentations de PHYSAFIMM (Bourchardon et al., 2014) ont été réalisées sur des parcelles expérimentales. Il a été convenu de conserver certains des paramètres ayant fourni les meilleurs résultats en terme de couverture végétale. Ainsi, au vu de son fort potentiel dans PHYSAFIMM, l'amendement choisit pour débiter les essais est un MIATE. Les espèces végétales ont été préalablement sélectionnées à partir d'un inventaire floristique réalisé sur des crassiers métallurgiques de la région Auvergne-Rhône-Alpes (Remon et al., 2009) et en fonction des stocks de graines disponibles, étant donné la surface à traiter. Les résultats d'une culture *ex situ*, visant à confirmer le potentiel du MIATE (appliqué à trois niveaux d'amendement correspondant à 60T.ha<sup>-1</sup>, 120T.ha<sup>-1</sup> et 180T.ha<sup>-1</sup> notés M60, M120 et M180) et à évaluer les effets d'un AMF (*Rhizophagus irregularis*, avec ou sans inoculation notés Myc et Myc0) sur la végétation, sont ici présentés.

## 1. Effet du MIATE et de l'AMF sur la végétation

La teneur totale en chrome de ce laitier est d'approximativement 8 500 mg/kg (TAB. 1). Après le fer, il s'agit de l'élément métallique le plus abondant dans le matériau à stabiliser.

Cinq espèces végétales ont été étudiées : *Achillea millefolium*, *Bromus erectus*, *Festuca arundinacea*, *Melilotus officinalis*, *Medicago sativa*. Les espèces ayant produit le plus de biomasse sont la Fétuque et le Mélilot (Fig. 1), suggérant que ces dernières peuvent jouer un rôle pionnier sur ce substrat. L'Achillée est l'espèce qui s'est le moins développée au cours de cette culture. Bien que les Luzernes n'aient pas produit beaucoup de biomasse, la condition « M120 – Myc » est la plus propice à son installation. Le développement du Brome est le plus important en « M180 » et l'inoculat endomycorhizien ne favorise pas son développement dans les autres traitements. La production de biomasse des Fétuques suit le gradient d'apport en MIATE. Supplémenté d'un apport d'AMF, elle diminue en « M60 » et augmente en « M120 ». Les biomasses produites par les Mélilots sont très hétérogènes en « M60 – Myc0 », « M120 – Myc0 » et « M180 – Myc ». L'apport d'AMF n'est pas bénéfique à la production de biomasse en « M60 » mais améliore le développement du système aérien en « M120 ». Les figures suivantes ne représentent pas les résultats obtenus sur *M. sativa* et *A. millefolium* de par leurs faibles effectifs.

Les teneurs en phosphore mesurées sur les feuilles de Bromes et de Fétuques suivent le gradient d'apport en MIATE (Fig. 2A). L'effet de l'inoculat endomycorhizien est d'autant plus visible sur les teneurs en phosphore mesurées sur les feuilles de Mélilots. Pour cette espèce, apporter plus de 120T/ha de MIATE en condition « Myc » ne conduit pas à des différences significatives entre les teneurs en P des feuilles. Les teneurs en chrome foliaires des deux Poacées semblent principalement

gouvernées par le niveau d'apport en MIATE (Fig. 2B). En M60, l'accumulation du chrome dans les feuilles de ces deux espèces est très hétérogène. Elle est la plus élevée en condition « M60 – Myc » (toutes espèces confondues). L'effet négatif de l'AMF sur les biomasses produites à ce niveau d'apport en MIATE peut conduire à un effet de surconcentration dans les feuilles, avec l'hypothèse selon laquelle les plantes prélèvent la même quantité de chrome. Cela pourrait aussi s'expliquer par une meilleure captation et accumulation du chrome dans les feuilles induites par l'AMF en « M60 ». Cette hypothèse expliquerait alors la faible production de biomasses observées chez les plantes soumises à cette condition. Les teneurs en chrome mesurées dans les feuilles sont les plus faibles chez les plantes correspondant à la condition « M120 – Myc ».

Trois indicateurs ont été retenus pour évaluer la capacité de mycorhization de *Rhizophagus irregularis* dans le système racinaire de sa plante hôte : la fréquence de présence de mycorhizes (F%), l'intensité de la colonisation mycorhizienne (M%) et l'abondance des arbuscules (A%). La colonisation des trois espèces végétales par *Rhizophagus irregularis* est plus importante en « M120 », tant en termes de fréquence que d'intensité. La propagation de l'AMF dans les systèmes racinaires des plantes hôtes et son installation sont moindres en « M180 ». En « M60 », l'AMF est là aussi peu installé. Les abondances d'arbuscules les plus importantes sont issues des traitements « M120 » pour la Fétuque et le Mélilot. En « M60 » l'abondance d'arbuscules dans le système racinaire des Fétuques est comparable aux taux mesurés en « M120 » ( $a - a/b$  ;  $P < 0,05$ ). L'échange des photosynthétats et des éléments minéraux entre les deux organismes se fait par le biais des arbuscules (Pfeffer *et al.*, 1999). Bien que plus faiblement mycorhizés, la forte présence d'arbuscules suggère une bonne efficacité d'échange de sucres et de minéraux entre l'AMF et les Fétuques en « M60 ». En « M60 », la faible quantité de MIATE a possiblement entraîné une forte exposition à la toxicité du laitier. Il a de plus été remarqué que l'AMF était susceptible de prélever les sucres de la plante assez efficacement à ce niveau d'apport en MIATE. Ces deux effets combinés peuvent être responsables de la biomasse finale moindre dans la condition « M60 – Myc ».

## 2. Tableaux

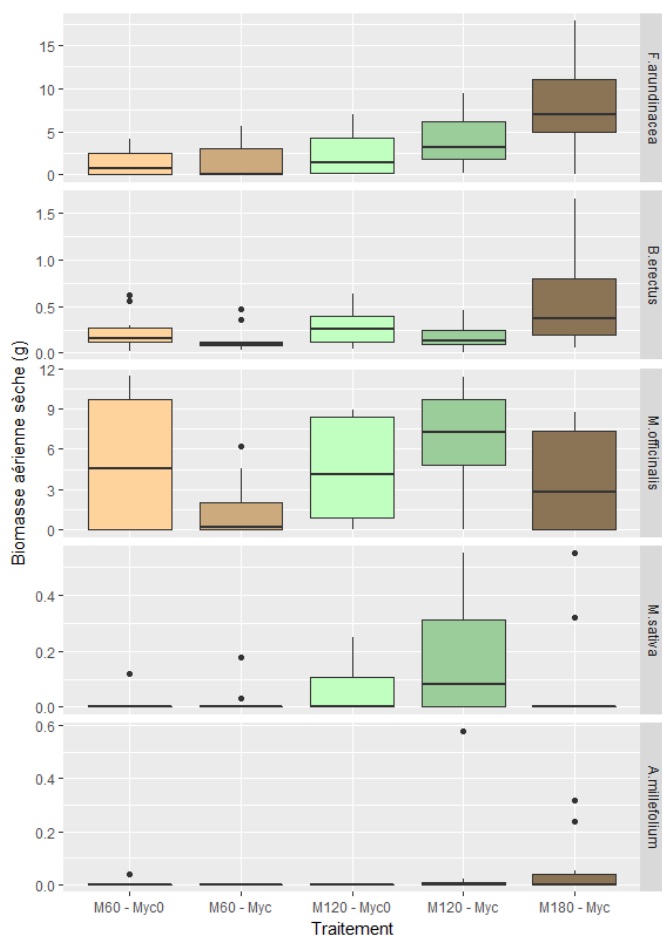
TABLEAU 1. Teneurs totales (mg/kg) en éléments analysés du laitier.

Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Y	Nb	Ba	La	Ce	Eu	Yb	Th
4,05	381	8507	13,4	270	412	522	483	10,2	82,3	146,7	14,0	24,5	2,41	3,13	4,0

TABLEAU 2. Indicateurs de mycorhization déterminés sur *B. erectus*, *F. arundinacea* et *M. officinalis* en fonction du gradient d'amendement en MIATE, les différences significatives sont illustrées par les lettres (Kruskal-Wallis,  $P < 0,05$ ).

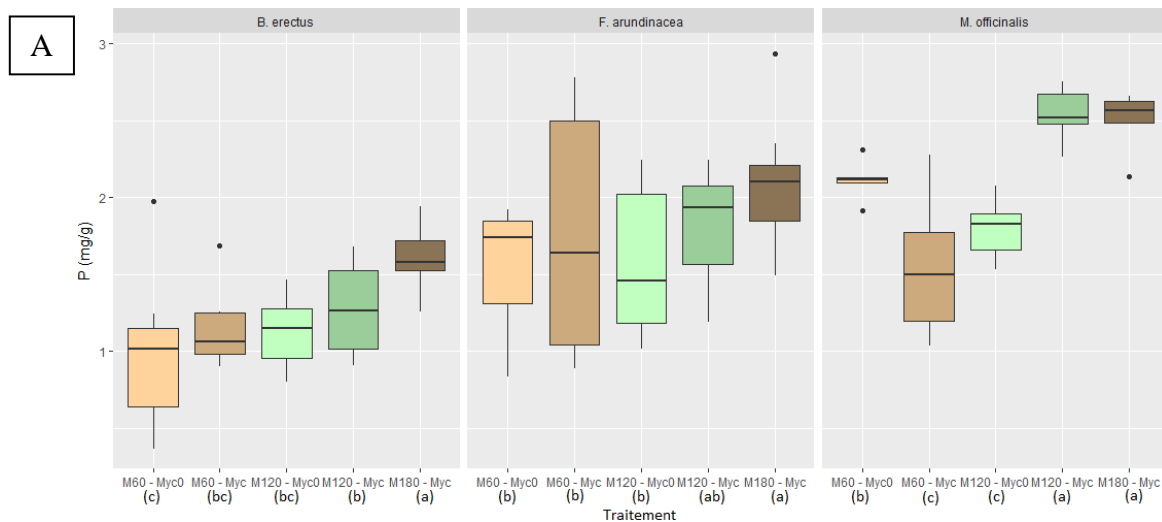
Espèce	Quantité de MIATE (T.ha <sup>-1</sup> )	F%	M%	A%
<i>B. erectus</i>	60	38 ± 34 (b)	5,8 ± 7,6 (b)	1,6 ± 1,9 (a)
	120	<b>91</b> ± 10 (a)	<b>14,0</b> ± 8,3 (a)	2,3 ± 1,8 (a)
	180	69 ± 24 (b)	7,7 ± 9,2 (ab)	1,3 ± 1,4 (a)
<i>F. arundinacea</i>	60	66 ± 27 (b)	7,3 ± 8,1 (ab)	<b>3,0</b> ± 3,7 (ab)
	120	<b>94</b> ± 10 (a)	<b>14,0</b> ± 10,2 (a)	<b>3,4</b> ± 3,9 (a)
	180	60 ± 37 (b)	5,9 ± 7,4 (b)	1,1 ± 1,5 (b)
<i>M. officinalis</i>	60	47 ± 30 (a)	1,8 ± 2,4 (a)	0,2 ± 0,3 (b)
	120	59 ± 23 (a)	<b>17,2</b> ± 15,8 (a)	<b>5,5</b> ± 6,4 (a)
	180	52 ± 34 (a)	7,0 ± 9,3 (a)	1,2 ± 11,1 (ab)

### 3. Figures



Kruskal-Wallis (P < 0,05)	Traitement	<i>A. millefolium</i>	<i>B. erectus</i>	<i>F. arundinacea</i>	<i>M. officinalis</i>	<i>M. sativa</i>
		M60 - Myc0	ab	ab	c	ab
M60 - Myc	b	b	c	b	b	
M120 - Myc0	b	ab	bc	ab	b	
M120 - Myc	a	b	ab	a	a	
M180 - Myc	a	a	a	ab	b	

Figure 1. Biomasses aériennes produites pour chaque traitement et différences significatives observées.



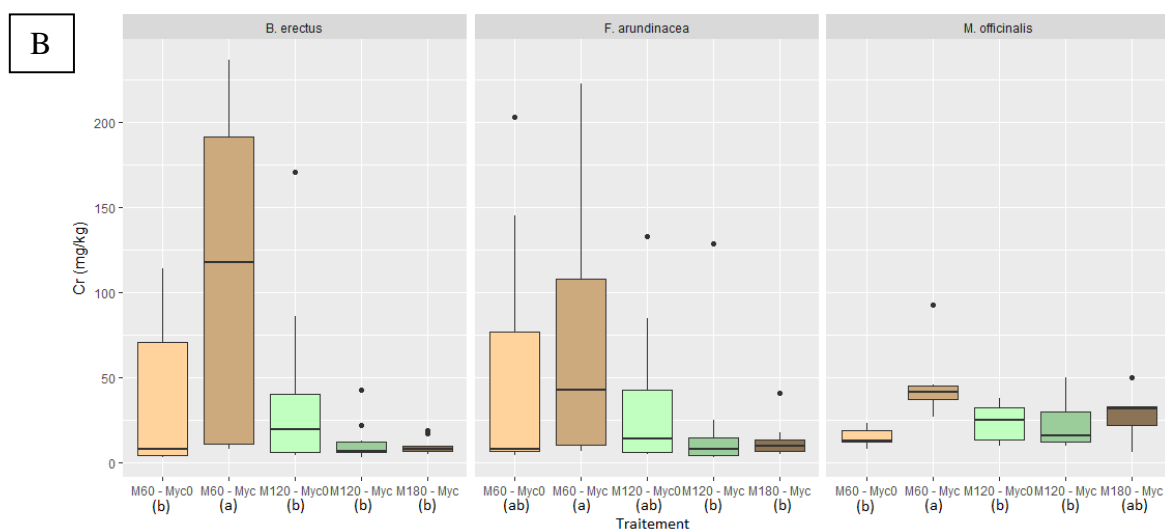


Figure 2. Teneurs en P et Cr des feuilles de Bromes, Fétuques et Mélilots, les différences significatives sont illustrées par les lettres en légende (Kruskal-Wallis,  $P < 0,05$ ).

## CONCLUSION

L'apport de MIATE favorise l'installation des espèces végétales semées et diminue la biodisponibilité du chrome. L'inoculum endomycorhizien tend à améliorer la nutrition des plantes en rendant le phosphore plus assimilable par le couvert. Avec une quantité de MIATE correspondant à un apport de  $120\text{T}\cdot\text{ha}^{-1}$ , il permet également une moins forte accumulation du chrome dans les organes aériens des plantes. L'apport d'AMF est profitable au développement du système aérien en « M120 ». Si ce résultat se confirme lors d'une culture *in situ* la biomasse aérienne ainsi produite pourrait améliorer la captation des eaux de pluies et limiter plus efficacement son infiltration dans le crassier.

## Références bibliographiques

- Mendez M. et Maier R., (2008). Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, n°116, pp.278-283.
- Vamerali T. et al., (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*, n°8, pp.1-17.
- Bouchardon J.L. et al., (2014). PHYSAFIMM : "la PHYtoStabilisation, méthodologie Applicable aux Friches Industrielles, Métallurgiques et Minières".
- Pandia O. et al., (2016). The management of steel industry in the context of durable development. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, n°14, pp.179-182.
- Firmin, S. et al., (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation protects *Miscanthus × giganteus* against trace element toxicity in a highly metal-contaminated site. *Science of The Total Environment*, n°527, pp. 91-99.
- Lacercat-Didier L. et al., (2016). New mutualistic fungal endophytes isolated from poplar roots display high metal tolerance. *Mycorrhiza*, n°26, pp. 657-671.
- Orłowska E. et al., (2010). Role of Mycorrhizal Colonization in Plant Establishment on an Alkaline Gold Mine Tailing. *International Journal of Phytoremediation*, n°13, pp. 185-205.
- GiridharBabu A., Sudhakara Reddy M., (2011). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nutrient status of bermudgrass grown in alkaline bauxite processing residue. *Environmental pollution*, n°159, pp. 25-29.
- Meier S. et al., (2011). Alleviation of Cu toxicity in *Oenothera biennis* by copper-adapted arbuscular mycorrhizal fungi and treated agrowaste residue, *Applied Soil Ecology*, n°48, pp.117-124.
- Wu S., Zhang X. et al., (2016). Chromium immobilization by extraradical mycelium of arbuscular mycorrhiza contributes to plant chromium tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, n°122, pp. 10-18.

Remon E., (2006). Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques: vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution, Biologie végétale, Université Jean Monnet de Saint-Étienne.

Pfeffer P. et *al.*, (1999). Carbon Uptake and the Metabolism and Transport of Lipids in an Arbuscular Mycorrhiza. Plant Physiology, n°120(2), pp. 587-598.