



AGRICULTURE TROPICALE &
DEVELOPPEMENT DURABLE

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

AGRICULTURE TROPICALE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Parcours : AGRICULTURE TROPICALE

Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du Diplôme de Master II

**« INTERACTION ENTRE MATIERES
ORGANIQUES, VERS DE TERRE ET
MYCORHIZES SUR LA CROISSANCE DU RIZ
PLUVIAL »**

Soutenu le 06 Décembre 2019

Par HERINASANDRATRA Volatantely

Promotion : VAHINALA (2014-2019)

Président du Jury : Docteur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA
Examineur : Tiana Herimanana RANDRIAMIHANTA
Maître de stage : Docteur Eric BLANCHART
Tuteur : Professeur Jaona Harilala ANDRIAMANIRAKA
Co-encadrant : Docteur Hasinahary Onja RATSIATOSIKA





AGRICULTURE TROPICALE &
DEVELOPPEMENT DURABLE

**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

AGRICULTURE TROPICALE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Parcours : AGRICULTURE TROPICALE

Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du Diplôme de Master II

**« INTERACTION ENTRE MATIERES
ORGANIQUES, VERS DE TERRE ET
MYCORHIZES SUR LA CROISSANCE DU RIZ
PLUVIAL »**

Soutenu le 06 Décembre 2019

Par HERINASANDRATRA Volatantely

Promotion : VAHINALA (2014-2019)

Président du Jury : Docteur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA
Examineur : Tiana Herimanana RANDRIAMIHANTA
Maître de stage : Docteur Eric BLANCHART
Tuteur : Professeur Jaona Harilala ANDRIAMANIRAKA
Co-encadrant : Docteur Hasinahary Onja RATSIATOSIKA



REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à Dieu pour son amour qui nous a permis de mener à terme la bonne réussite de notre stage et le bon déroulement du présent rapport.

Ainsi, nous adressons notre profonde gratitude et nos vifs remerciements à :

✚ Monsieur **Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA**, Docteur en sciences agronomiques, Enseignant chercheur et Responsable de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D) de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), de faire l'honneur de présider la soutenance de ce mémoire malgré ses nombreuses occupations ;

✚ Monsieur **Tiana Herimanana RANDRIAMIHANTA**, Enseignant chercheur à la mention AT2D, notre examinateur, qui a bien voulu apporter des critiques constructives pour améliorer la qualité de ce mémoire ;

✚ Monsieur **Jaona Harilala ANDRIAMANIRAKA**, Professeur en sciences agronomiques, Enseignant chercheur à la mention AT2D, Directeur du cabinet de la Présidence de l'Université d'Antananarivo, notre tuteur, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a bien voulu prodiguer de précieuses conseils et aides tout au long de l'élaboration de ce mémoire ;

✚ Monsieur **Eric BLANCHART**, Docteur/HdR Directeur de recherche à l'UMR ECO&SOLS notre maître de stage, qui malgré ses tâches multiples, nous a fait l'honneur de nous consacrer une partie de son temps pour apporter son conseil et son aide durant le stage ;

✚ Madame **Hasinahary Onja RATSIATOSIKA**, Docteur en sciences agronomiques, post-doctorante au Laboratoire des Radio-Isotopes et enseignante à la Mention AT2D, notre co-encadreur, pour les efforts que vous avez déployé pour le bon déroulement de ce stage ainsi que de précieuses recommandations.

Nous tenons à remercier infiniment aussi :

✚ La fondation Agropolis sous la référence ID 1605-007 à travers le programme « Investissements d'avenir » (Labex Agro: ANR-10-LABX-0001-01), qui a supporté financièrement la réalisation du stage de fin d'études ;

✚ Madame Tantely RAZAFIMBELO, Professeur titulaire, Directrice du Laboratoire des Radio Isotopes (LRI), qui a bien voulu m'accueillir en stage au sein de son laboratoire ;

- ✚ Tous les chercheurs, les personnels technique et administratif du LRI pour leur chaleureux accueil et leur aide pour la réalisation de ce travail, particulièrement Monsieur Modeste RAKOTONDRAMANANA et Monsieur RAKOTONIRINA Mamimbola Elysé;
- ✚ Tout le personnel administratif et pédagogique de l'ESSA, notamment de la Mention AT2D sans lequel nous ne serions pas arrivés à ce mémoire de fin d'études ;
- ✚ Les doctorants et les stagiaires du LRI particulièrement Nancia, Koloïna, Miora, Jeriniaina, Amédia, Anja, Solofo, Anne Lys, Jerry et Vonjy pour leurs aides et les inoubliables moments passés ensemble durant notre stage ;
- ✚ Nos chers parents et toute notre famille qui n'ont pas ménagé leurs efforts, pour nous soutenir, nous encourager et nous donner la force et la volonté de réussir ;
- ✚ Nous avons à la fois le devoir et le plaisir de nous porter garant de nos sincères reconnaissances envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet ouvrage.

Encore une fois, un GRAND MERCI A TOUS !

Volatantely

FINTINA

Amin'izao fotoana izao, ny fambolena dia miompana mankany amin'ny fambolena maharitra toy ny famokarana mananja ny rindrandamina ara-bojanahary. Amin'ny akapobeny, ny fomba fambolena agroekolojika dia mifantoka indrindra amin'ny fikirakirana ny zavamaniry ety ambony eo anivon'ny « agrosystème ». Etsy andaniny kosa dia vitsy ireo izay mifantoka amin'ny fikirakirana ny tany ho fampitomboana ny asa ekolojika ao anatin'ny. Manana anjara asa lehibe anefa ny tany eo amin'ny famatsiana ny asa ekosisitemika. Eo anatrehan'izany indrindra no nanaovana ity asa fikarohana ity mba hijerena ny vokatry ny fifandraisan'ny zezika organika, kankana sy « mycorhize » amin'ny fitomboan'ny vary an-tanety, eo amin'ny sehatra fambolena famokarana mananja ny rindrandamina ara-bojanahary. Araka izany, fanandramana tamin'ny “mesocosme” no natao tao amin'ny laboratoara Radio Isotopes nandritra ny valo herinandro. Karazana zezika maro no nampiasaina toy ny zezi-pahitra nentim-paharazana, zezi-pahitra nohatsaraina, kaompositra, zezika avy amin'ny vovoka tandrok'omby, zezik'omby miaro tany, taroka, zezi-pako avy any Andralanitra, kaompositra kankana, zezi-kisoa ary zezik'akoho. Isaky ny tavim-panandramana dia nampidirina tany 1 kg avy any Imerintsiasosika ary nitondrana kankana (*Pontoscolex corethrurus*) telo. Ny voam-bary dia nampifangarona tamin'ny vovoka “mycorhize” talohan'ny nambolena azy. Taorian'ny valo herinandro nanaovana ny andrana dia hita fa ny karazana zezika organika rehetra nampiasaina dia nisy fiantraikany tsara tamin'ny fitomboan'ny vary (halavany, biomasy), indrindra ny zezik'akoho sy ny zezi-kisoa. Avo roa heny ny fitomboan'ny vary rehefa nitondrana zezik'akoho na zezi-kisoa raha ampitahana amin'ireo vary tsy nasiana zezika mihitsy. Tsy dia nisy fiantraikany tsara loatra teo amin'ny vary kosa ny fampidirana miaraka ny kankana sy ny “mycorhize”. Na izany na tsy izany anefa, ny fampidirana kankana fotsiny dia nisy fiantraikany tsara sady nisongadina teo amin'ny fitombon'ny vary raha mitaha amin'ny fifandraisan'ny zezika organika, kankana ary « mycorhize ».

Teny manan-danja: famokarana mananja ny rindrandamina ara-bojanahary, « mycorhize », zezika organika, *Pontoscolex corethrurus*, “Ferralsol”, sakafo.

RESUME

Actuellement, l'agriculture s'oriente vers des systèmes plus durables comme l'agroécologie. Généralement, la plupart des pratiques agroécologiques se focalisent sur la manipulation de la biodiversité aérienne au sein de l'agrosystème. Rares sont les pratiques axées sur l'intensification des processus écologiques du sol. Cependant, le sol joue un rôle primordial dans la fourniture des services écosystémiques. Notre étude a donc pour objectif de tester, dans une démarche agroécologique, l'effet de l'interaction des matières organiques, vers de terre et mycorhizes sur la croissance du riz pluvial. Une expérimentation en mésocosmes a été effectuée pour tester l'effet des matières organiques et des organismes du sol sur le riz. Cet essai s'est déroulé dans l'enceinte du Laboratoire des Radio Isotopes pendant huit semaines. Différents types de matières organiques sont utilisés comme le fumier traditionnel, le fumier amélioré, le compost, la corne de zébus, la poudrette de parc, le taroka, le terreau d'Andralanitra, le vermicompost, le lisier de porc et la fiente de volaille. Trois individus de vers de terre (*Pontoscolex corethrurus*) par pot sont introduits dans 1 kg de sol natif venant d'Imerintsiatosika. Les grains de riz sont inoculés avec une poudre de mycorhize avant le semis. Après huit semaines de croissance, notre étude a montré que les différents types de matières organiques ont une influence positive sur la croissance du riz (hauteur et biomasse) surtout la fiente de volaille et le lisier de porc. Les traitements avec fiente de volaille et lisier de porc offrent une augmentation en hauteur et en biomasse deux fois plus important que le témoin. L'interaction entre vers de terre et mycorhizes n'a pas d'effet remarquable sur le riz. Par contre, la présence de vers de terre seul a un effet plus important sur la croissance du riz comparé à l'interaction des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes.

Mots clés : Agroécologie, mycorhizes, matières organiques, *Pontoscolex corethrurus*, Ferralsol, nutrition.

ABSTRACT

Currently, agriculture is moving towards more sustainable systems such as agroecology. Generally, most agroecological practice focuses on the manipulation of aerial biodiversity within the agrosystem. There are few practices that focus on intensifying soil ecological processes. However, soil plays a key role in providing ecosystem services. Our study therefore aims to test, in an agroecological approach, the effect of the interaction of organic matter, earthworms and mycorrhizal on the growth of rainfed rice. Mesocosm experiments were conducted to test the effect of organic matter and soil organisms on rice. This test took place in the enceinte of the Radio Isotopes Laboratory during eight weeks. Different types of organic matter are used as traditional manure, improved manure, madacompost, zebu horn, park crumble, taroka, Andralanitra potting mix, vermicompost, pork slurry and poultry manure. Three individuals of *Pontoscolex corethrurus* per pot are introduced into 1 kg of native soil from Imerintsiatosika. The grains of rice are inoculated with a strain of mycorrhizal. After eight weeks of growth, our study showed that the different types of organic matter have a positive influence on the growth of rice (height and biomass), especially poultry manure and pig manure. The treatment with poultry manure and pig manure offers an increase in height and biomass twice more than the control. The presence of earthworms has a greater effect on the growth of rice compared to the interaction of organic matter, earthworms and mycorrhizal.

Key words: Agroecology, mycorrhizal, organic matter, *Pontoscolex corethrurus*, Ferralsol, nutrition.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : MATERIELS ET METHODES	3
1.1. Site d'échantillonnage du sol.....	3
1.1.1. Localisation du site de prélèvement du sol	3
1.1.2. Types de sol.....	3
1.2. Echantillonnage du sol.....	4
1.3. Variété	4
1.4. Matières organiques.....	4
1.5. Organismes du sol	6
1.5.1. Vers de terre	6
1.5.2. Mycorhizes	6
1.6. Dispositif expérimental.....	6
1.6.1. Mise en place des mésocosmes	7
1.6.2. Variables mesurées.....	8
1.7. Analyse Statistique	11
Chapitre 2 : RESULTATS	13
2.1. Taux de survie des vers de terre	13
2.2. Taux de mycorhization dans les racines du riz.....	14
2.3. Hauteur du riz	15
2.4. Quantité de phosphore dans la biomasse aérienne	19
2.5. Quantité d'azote dans la biomasse aérienne	21
2.6. Quantité de carbone dans la biomasse aérienne	22
2.7. Indices de la végétation et SPAD	24
2.8. Fréquence de mycorhization.....	26
Chapitre 3 : DISCUSSIONS	29
3.1. Effet des différents amendements organiques	29

3.1.1. Effet des matières organiques sur la croissance du riz	29
3.1.2. Effet des matières organiques sur la nutrition phosphatée et azotée	29
3.1.3. Effet des matières organiques sur l'indice de végétation	30
3.1.4. Effet des matières organiques sur le taux de mycorhization	30
3.2. Effets seules et synergiques des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz	31
3.2.1. Effet des vers de terre seuls	31
3.2.2. Effet des mycorhizes seuls	31
3.2.3. Effet synergiques entre vers de terre et mycorhize	33
3.3. Effet interactif des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz	33
CONCLUSION	35

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du site de prélèvement du sol.....	3
Figure 2: Vésicule et hyphe.....	9
Figure 3 : Echelle du taux de mycorhization dans 1 cm de racine.....	9
Figure 4 : Taux de survie de vers de terre à la fin de manipulation.	13
Figure 5 : Taux de mycorhization en fonction des trois facteurs.....	14
Figure 6 : Hauteur du riz à la fin de l'expérience.....	16
Figure 7 : Biomasse aérienne du riz à la fin de l'expérience.....	18
Figure 8: Biomasse racinaire du riz à la fin de l'expérience.....	19
Figure 9 : Biomasse totale du riz à la fin de l'expérience.....	20
Figure 10: Quantité de phosphore du riz à la fin de l'expérience.....	21
Figure 11 : Quantité d'azote du riz à la fin de l'expérience.....	23
Figure 12 : Quantité de carbone du riz à la fin de l'expérience.....	24
Figure 13 : Indice de réflectance photochimique.....	25
Figure 14 : Indice différentiel normalisé de la végétation.....	25
Figure 15 : Valeur SPAD en fonction des trois facteurs.....	26
Figure 16: Fréquence de mycorhization.....	28

LISTES DES CLICHES

Cliché 1 : Prélèvement du sol.....	4
Cliché 2 : <i>Pontoscolex corethrurus</i>	6
Cliché 3 : Essai en mésocosmes	8
Cliché 4 : Mesure PRI (à droite) et NDVI (à gauche).....	10
Cliché 5 : Mesure SPAD	11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Constituants des matières organiques	5
Tableau 2 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la hauteur du riz.....	15
Tableau 3 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la production de biomasse	17
Tableau 4 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité de phosphore dans la biomasse aérienne	20
Tableau 5 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité d'azote dans la biomasse aérienne	21
Tableau 6 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité de carbone dans la biomasse aérienne.....	23
Tableau 7 : P-value de l'analyse de Kruskal-Wallis montrant l'effet des facteurs sur PRI, NDVI, SPAD.....	24
Tableau 8 : P-value de l'analyse de Kruskal-Wallis montrant l'effet des facteurs sur la fréquence de mycorhization (F%)	28

LISTE DES ABREVIATIONS

ANOVA	: Analysis Of Variance
BD FTM	: Base de Données du Foiben-Tsaritanin'i Madagasikara
BA	: Biomasse aérienne
BR	: Biomasse racinaire
BT	: Biomasse totale
CMA	: Champignon mycorhizien à arbuscules et vésicules
CZ	: Corne de Zébu
ESSA	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
FAO	: Food and Agriculture Organization
FOFIFA	: Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiharina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
FuA	: Fumier Amélioré
FuT	: Fumier Traditionnel
FV	: Fiente de volaille
INSTAT	: Institut National de Statistique
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LP	: Lisier de porc
LRI	: Laboratoire des Radio Isotopes
MC	: Madacompost
MO	: Matières organiques
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
PP	: Poudrette de parc
PRI	: Photochemical Reflectance Index
SECURE	: Soil ECological fUNCTION Restoration
SPAD	: Single Photon Avalanche Diode
TK	: Taroka
TATA	: Vermicompost TATA
TA	: Terreau d'Andralanitra

GLOSSAIRE

- Arbuscule** : Structure typique des endomycorhizes à vésicules et arbuscules formée à l'intérieur des cellules végétales par ramification des hyphes fongiques. Les arbuscules sont le lieu d'échange entre la plante et le champignon.
- Biomasse** : Dans le domaine de l'écologie, la biomasse se définit comme la masse totale des organismes vivants présents à un moment donné dans un biotope bien défini. Souvent, elle est estimée en unité de surface, de masse ou de volume. La biomasse aérienne et racinaire des plantes se réfèrent à la masse totale sèche de la partie aérienne et racinaire des plantes.
- Hyphe** : Filament de champignon.
- Mésocosme** : Lieu confiné et semi-contrôlé où un expérimentateur peut faire varier certains paramètres du milieu.
- Mycélium** : Ensemble de fins filaments constituant la formation morphologique de base du champignon (un agrégat des hyphes).
- Mycorhize** : Association symbiotique entre un champignon et la racine d'une plante.
- Symbiose** : Association entre plusieurs organismes vivants qui s'apportent des bénéfices mutuels
- Tanety** : Appellation Malagasy des terres sur les versants de collines.
- Turricules** : Rejets des vers de terre. Leur taille varie de quelques millimètres à quelques centimètres et dépend de la taille des espèces.
- Vésicule** : Structure typique des endomycorhizes à vésicules et arbuscules formée à l'intérieur des cellules végétales. Ce sont des organes de stockage pour le champignon.



INTRODUCTION

INTRODUCTION

Face aux défis de plus en plus écrasants auxquels est confronté le monde: sécurité alimentaire et nutritionnelle, dégradation de la biodiversité et de l'intégrité des écosystèmes, changement climatique, etc., la durabilité devient une nécessité absolue. L'agriculture mondiale, au même titre que toutes les autres activités de l'homme, doit s'interroger sur les moyens d'arriver à une véritable amélioration de sa durabilité. L'agroécologie représente une approche concrète de la transformation de l'agriculture mondiale, prise dans son immense diversité, en systèmes et en formes plus durables.

En effet, la base de l'agroécologie est l'intensification des processus écologiques au niveau de l'agrosystème. Généralement, les pratiques agroécologiques se focalisent sur la manipulation de la biodiversité aérienne au sein de l'agrosystème, entre autres, l'association et la rotation culturale, l'utilisation de fertilisants organiques au niveau des sols, l'agroforesterie ou encore l'intégration agriculture-élevage (Dufumier, 2009 ; Dufumier, 2010). Très peu de pratiques considèrent l'intensification des processus écologiques du sol. Cependant, le sol tient une place primordiale dans la fourniture de services écosystémiques. En effet, le sol abrite une grande diversité fonctionnelle d'organismes (décomposeurs, fragmenteurs, microrégulateurs et ingénieurs du sol) qui jouent un rôle majeur dans le fonctionnement écologique du sol. Les interactions entre ces groupes fonctionnels sont fondamentales pour assurer les principales fonctions écologiques à la base de la production végétale : maintien de la structure du sol, recyclage des nutriments, décomposition de la matière organique et contrôle des bioagresseurs (Kibblewhite *et al.*, 2010).

Parmi les organismes vivants dans le sol, les champignons mycorhiziens font partie des décomposeurs. Ils stimulent la croissance des plantes hôtes en particulier lorsque les éléments minéraux dans le sol sont en faible quantité. Quant aux vers de terre qui sont qualifiés d'ingénieurs du sol, ils améliorent la structure du sol, dégradent les matières organiques, et mettent à la disposition les nutriments dont la plante a besoin (Bhadoria et Saxena, 2010 ; Blanchart et Jouquet, 2012). Ces organismes du sol rendent ainsi des services écologiques et contribuent à la croissance des plantes, à l'amélioration de la fertilité des sols, ainsi qu'à la production végétale. Pour favoriser les activités de la biodiversité du sol, l'apport de matières organiques est indispensable. Dans l'optique d'optimiser les fonctions écologiques des sols via l'intensification des processus écologiques du sol, une piste intéressante serait d'apporter des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes pour intégrer la durabilité dans les

agrosystèmes. C'est dans ce cadre que l'objectif principal de cette étude est de tester, dans une démarche agroécologique, l'effet de l'interaction des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz pluvial. La question de recherche qui se pose est « **L'introduction d'organismes du sol améliore-t-elle l'effet des matières organiques sur la croissance du riz ?** ».

Ainsi, les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- **OS1** : Identifier l'effet des différents amendements organiques sur la croissance du riz ;
- **OS2** : Evaluer les effets seuls et synergiques des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz ;
- **OS3** : Evaluer l'effet interactif des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz.

Trois hypothèses sont émises pour répondre à ces objectifs :

- **Hypothèse 1** : Les amendements organiques auront des effets différents sur la croissance du riz en fonction de leur qualité.
- **Hypothèse 2** : Les vers de terre et les mycorhizes, seuls ou ensemble, vont impacter positivement la croissance du riz.
- **Hypothèse 3** : L'effet mutuel des vers de terre et des mycorhizes va augmenter l'effet fertilisant des matières organiques de moindre qualité en augmentant la croissance du riz.

Dans cet ouvrage seront exposés, en premier lieu, les matériels et méthodes pour les expérimentations, ensuite les résultats montrant les effets des matières organiques et des organismes du sol sur la croissance du riz et en dernier lieu, les discussions sur les résultats obtenus.



MATERIELS ET METHODES

Chapitre 1 : MATERIELS ET METHODES

1.1. Site d'échantillonnage du sol

1.1.1. Localisation du site de prélèvement du sol

Le sol a été prélevé à Bekitapo, fokontany Alatsinainy Loharano, Commune rurale d'Imerintsiatosika, District d'Arivonimamo, Région Itasy. L'étude est cadrée dans le projet Secure (Fondation Agropolis) et le sol a été prélevé à côté du dispositif expérimental.

Géographiquement, Imerintsiatosika est localisé sur une latitude : 18°59'00'' Sud ; longitude : 47°19'00'' Est et à une altitude de 1301 m.

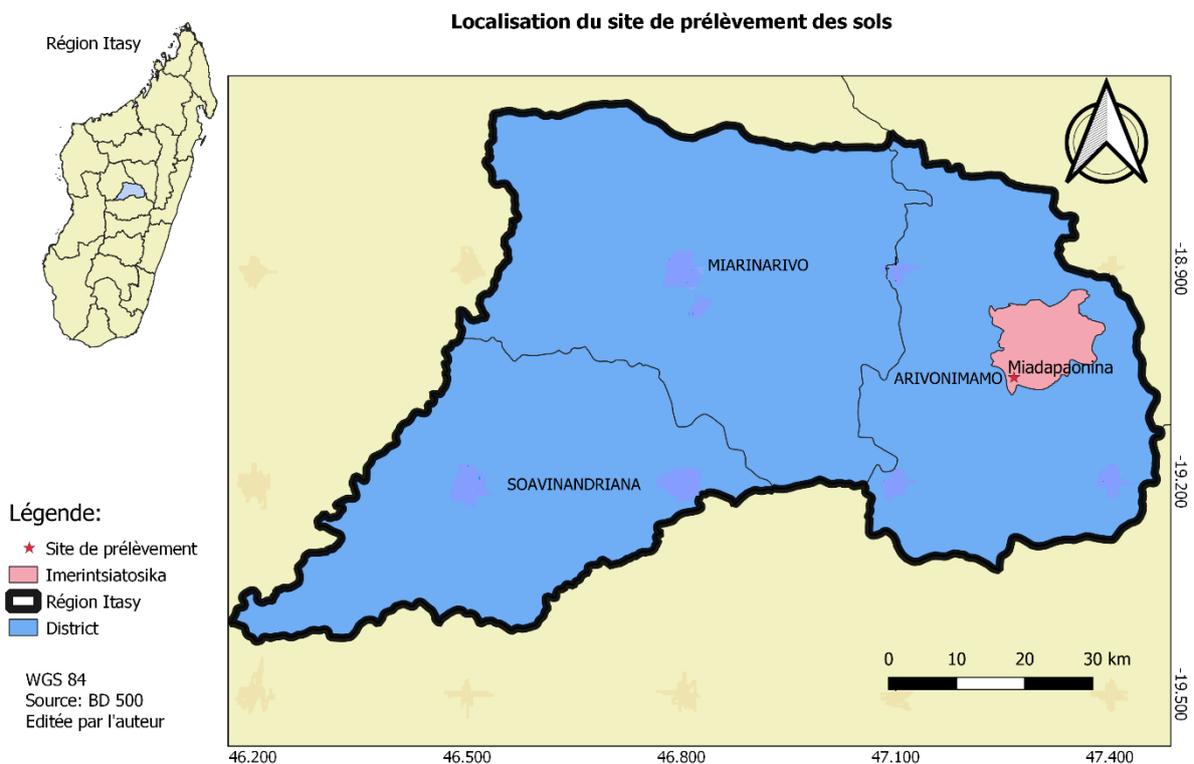


Figure 1: Carte de localisation du site de prélèvement du sol

1.1.2. Types de sol

Les sols d'expérimentation proviennent d'Imerintsiatosika, il s'agit des Ferrasols. Le site de prélèvement est caractérisé par un sol de défriche non cultivé pendant plus de 25 ans. Les analyses physico-chimiques issues des études antérieures ont montré des carences en N et P (N total = 1,6 g kg⁻¹ et P total = 1,31 g kg⁻¹) avec un pH fortement acide (pH eau = 4,7). Les teneurs en carbone sont également faibles (C total = 29,2 g kg⁻¹). Les analyses granulométriques ont montré une forte composition en argiles + limons fins puisque ce sont des sols cuirassés. Les teneurs en oxyde de fer et d'aluminium sont aussi très élevées (31,4% de Fe₂O₃ et 28,2%

d' Al_2O_3) alors que celles de la silice sont faibles (10% de SiO_2). Des expérimentations soustractives sur ce sol ont montré des carences dans les biomasses végétales suivant l'ordre $\text{P} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{N}$ (Raminoarison *et al.*, 2019).

1.2. Echantillonnage du sol

Le sol a été prélevé sur « tanety » sur un horizon de 0-10 cm à l'aide d'une *angady* et a été ramené au laboratoire.

A leur arrivée au laboratoire, les sols ont été homogénéisés puis séchés à l'air libre. Après le séchage, les sols ont été tamisés à 5 mm pour se débarrasser des débris végétaux et des pierres et casser les grosses mottes.



Cliché 1 : Prélèvement du sol

1.3. Variété

La variété de riz pluvial nommée Chhomrong Dhan (*Oryza sativa japonica*) a été utilisée pour la présente étude. Le choix de cette variété a été fait en se référant à l'essai au champ à Imerintsiatosika dans le cadre du projet SECuRE. Cette variété représente actuellement 80% du riz pluvial cultivé sur les Hautes-Terres. Elle est originaire du Népal. L'avantage de cette variété est son adaptation à la haute altitude et son cycle semi-précoce, elle est également très productive. De plus elle a une bonne résistance à la maladie et au froid. Mais en raison de sa taille atteignant jusqu'à 125cm de haut, elle est sensible à la verse et au stress hydrique entraînant le blanchissement des panicules.

1.4. Matières organiques

Les matières organiques dérivent principalement des sous-produits végétaux et animaux. Des matières organiques de qualité différente ont été utilisées pendant notre expérimentation comme

le fumier traditionnel, le fumier amélioré, le compost fourni par la société Madacompost, la corne de zébus, la poudrette de parc, le taroka, le terreau d'Andralanitra, le vermicompost de la société TATA Ambohimambola, le lisier de porc et la fiente de volaille. Ces différents types de matières organiques ont été choisis en se référant à l'expérimentation réalisée au champ à Imerintsiatosika dans le cadre du projet SECuRE qui utilise les mêmes types de matières organiques et les mêmes organismes du sol (vers de terre et mycorhize). Une dose équivalente à 6 tonnes de matières organiques à l'hectare a été apportée dans la présente expérience. Cette quantité correspond à des pratiques scientifiques testées dans le projet SECuRE. Le poids exact de matières apporté par pot se trouve dans l'annexe 4.

Tableau 1 : Constituants des matières organiques

Matières organiques	Composition
Fumier traditionnel (FuT)	Fèces de bovin mélangées avec de la litière végétale ou des résidus alimentaires, stocké à l'extérieur de l'étable, sans soins particuliers pour sa conservation.
Fumier amélioré (FuA)	Fèces et urine des bovins mélangés avec la litière végétale en grande quantité et stocké sous abri pour éviter les pertes de nutriments par volatilisation, lessivage et/ou lixiviation.
Madacompost (MC)	Mélange fermenté de débris organique obtenu par compostage.
Corne de zébus (CZ)	Corne broyée.
Poudrette de parc (PP)	Fèces de bovin produites et stockées au niveau des parcs de rétention des bovins pendant la nuit et contient généralement une proportion importante de terre au moment du raclage.
Terreau d'Andralanitra (TA)	Produit issu d'un criblage de déchets urbains, ayant subi un processus de compostage naturel.
Vermicompost de TATA (TATA)	Déjections animales et résidus végétaux décomposés par des vers de terre tels qu' <i>Eisenia fetida</i> .
Taroka (TK)	Mélange de bagasse, de terreau d'Andralanitra, de phosphore naturel et de poudre d'os.
Lisier de porc (LP)	Fèces et urine de porc en grande quantité et stocké sous abri pour éviter les pertes de nutriments par volatilisation, lessivage et/ou lixiviation.
Fiente de volailles (FV)	Fèces de volailles mélangées avec des copeaux stockés sous abri.

1.5. Organismes du sol

Deux types d'organismes du sol ont été inoculés avant l'expérimentation : les vers de terre et les mycorhizes.

1.5.1. Vers de terre

L'espèce de vers de terre utilisée pour cette étude est *Pontoscolex corethrurus*. Le choix de cette espèce vient du fait qu'il s'agit d'une espèce exotique ubiquiste parfaitement adaptée à Madagascar et présentant une grande capacité d'adaptation (Lavelle et Pashanasi, 1989). Elle s'adapte également à divers types de végétation et ne présente pas d'exigence particulière quant à la qualité du sol. Elle est d'ailleurs répertoriée dans différents types de sol, qu'il soit sableux ou argileux (Razafindrakoto, 2012) (Annexe 1).

La collecte des vers de terre s'est fait dans l'enceinte du LRI dans un milieu d'élevage de vers de terre. Une centaine d'individus ont été prélevés, et mis dans une cuvette contenant du sol assez humide pour ne pas les perturber. Les vers de terre collectés ont alors été, par la suite, séparés du sol et mis en place dans une autre cuvette rempli d'eau avant leur introduction dans le mésocosme.



Cliché 2 : *Pontoscolex corethrurus*

1.5.2. Mycorhizes

Les mycorhizes sont des associations symbiotiques entre des champignons et des plantes qui confèrent à ces dernières plusieurs avantages, dont une meilleure nutrition minérale (Laurence J., 2014). Dans notre étude, la poudre de mycorhize (endomycorhizes à arbuscules et vésicules) appelé AGTIV a été utilisée pour l'enrobage des graines de riz. C'est un produit fabriqué par la société Premier Tech Biotechnologies.

1.6. Dispositif expérimental

L'expérience a été menée au Laboratoire des Radio-Isotopes. Il s'agit d'un essai en mésocosmes pour une durée de 8 semaines.

Trois facteurs ont été identifiés : « matières organiques », « vers de terre » et « mycorhize ». Le facteur « matières organiques » inclut onze modalités : Témoin (O), Fumier traditionnel (FuT), Fumier amélioré (FuA), Madacompost (MC), Corne de zébus (CZ), Poudrette de parc (PP), Taroka (TK), Terreau d'Andralanitra (TA), Vermicompost (TATA), Lisier de porc (LP), Fiente de volaille (FV). Le facteur « vers de terre » présente deux modalités : sans vers de terre (V-) et avec vers de terre (V+). Enfin, le facteur « mycorhizes » indique aussi deux modalités : sans mycorhizes (M-) et avec mycorhizes (M+).

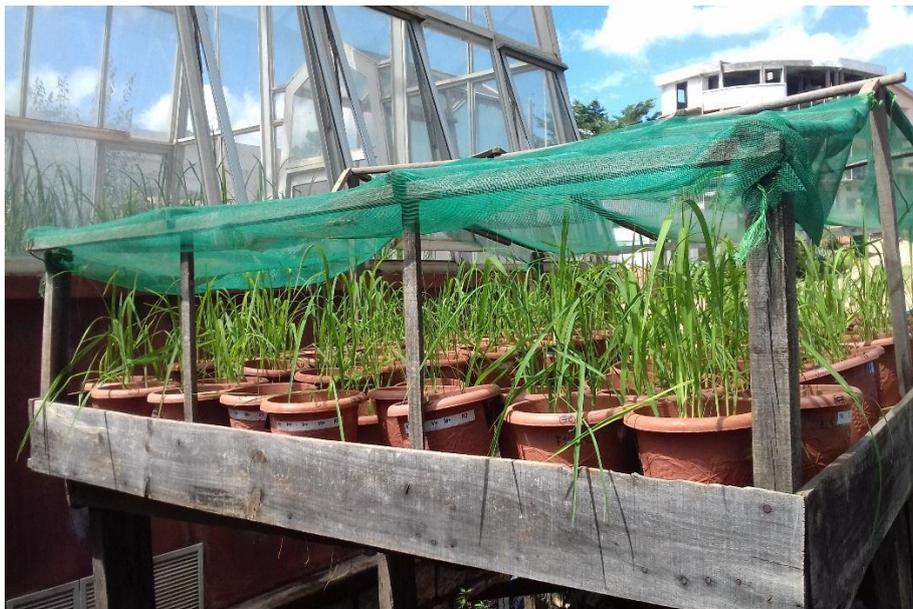
A l'issue de la combinaison de ces facteurs, 44 traitements ont été étudiés, avec 3 répétitions. Au total, 132 mésocosmes ont été mis en place dans cette expérience.

1.6.1. Mise en place des mésocosmes

Le semis a été réalisé le 29 janvier 2019. L'expérience a été effectuée sur table d'expérimentation.

Des travaux de préparation de sols et des pots ont été effectués avant la mise en place de l'essai, comme la pesée du sol et des matières organiques. Chaque pot contient 1 kg de sol sec tamisé et ré-humecté à la capacité de rétention. L'enrobage des grains de riz avec la poudre de mycorhize est effectué 8 heures avant le semis à raison de 12g de poudre de mycorhize pour 1kg de semence. Il faut donc mouiller les graines de riz avec une petite quantité d'eau juste à permettre les graines d'être enrobées de la poudre. Lors du semis, les graines enrobées ne doivent pas être exposées au soleil.

Au moment du semis, trois graines ont été semées à 1 cm de profondeur du sol dans chaque pot. En outre, trois individus adultes de *Pontoscolex corethrurus* ont été introduits par pot. La manipulation a duré 8 semaines (fin janvier au fin mars). Tout au long de cette durée, des contrôles journaliers sur l'humidité dans le pot ont été effectués pour maintenir en vie les vers de terre et s'assurer de la bonne croissance des plantes. Pour cela, les pots ont été arrosés tous les jours.



Cliché 3 : Essai en mésocosmes

1.6.2. Variables mesurées

Certains paramètres pédologiques et agronomiques ont été mesurés durant l'expérience pour évaluer l'effet des traitements étudiés.

➤ **Taux de survie de vers de terre**

Les vers de terre ont été comptés à la fin de l'expérimentation. Le nombre de cocons observés dans chaque pot a été également noté.

➤ **Taux de mycorhization**

Le taux de mycorhization est évalué à la fin de l'expérimentation en utilisant la méthode de Trouvelot et *al.*, (1986). Celle-ci consiste à couper 1 cm de racines colorées et de les monter entre lame et lamelle.

L'examen microscopique de l'infection mycorhizienne a été effectué sur 30 fragments de racines (d'environ 1 cm) établis entre lame et lamelle dans une goutte de glycérol à grossissement $\times 40$ (Brundett et *al.*, 1985).

La présence des vésicules et des hyphes (figure 2) indique que les racines de la plante sont colonisées par les champignons endomycorhiziens. Les vésicules et les mycéliums de champignons mycorhiziens à vésicules et à arbuscules présents dans le cytoplasme sont colorés en bleu par l'Encre de chine Schaeffer. Dans ce manuscrit, le taux de mycorhization est évalué à partir de la fréquence de mycorhization qui est calculée selon la formule suivante :

$$\mathbf{F\%} = (\text{Nombre de fragments mycorhizé} / \text{Nombre total}) * 100$$

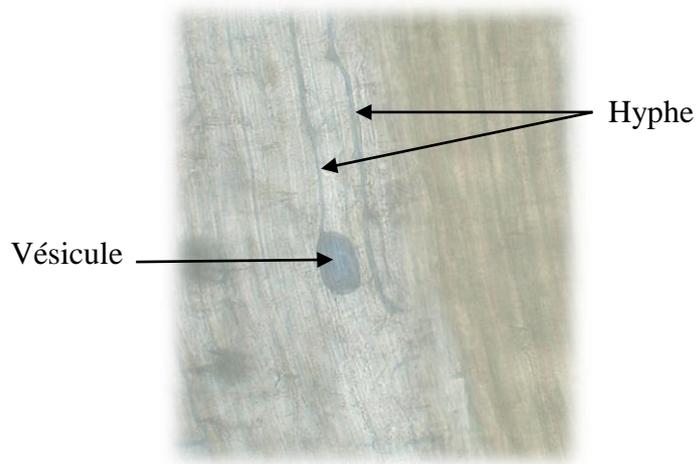


Figure 2 : Vésicule et hyphe

Trouvelot *et al.*, ont établi un système basé sur six classes d'infections de racines de 1 cm pour estimer la colonisation par les champignons mycorhiziens. Ce système est représenté dans la figure 3 ci-après.

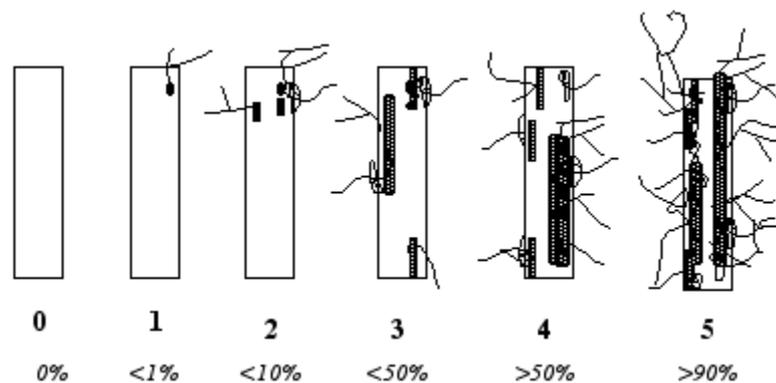


Figure 3 : Echelle du taux de mycorhization dans 1 cm de racine (Trouvelot et al., 1986)

➤ Hauteur de la plante

Tout au long de l'expérience, la croissance de chaque plante a été évaluée par la mesure de la hauteur toutes les semaines jusqu'à la fin de l'expérimentation. La plante est mesurée à l'aide d'une règle graduée. Au total, sept mesures de la hauteur ont été effectuées dont la première mesure a été réalisée 11 jours après semis (11 JAS), puis suivant les dates ci-après : 18 JAS, 25 JAS, 32 JAS, 39 JAS, 46 JAS et 54 JAS.

➤ PRI et NDVI

Avant le démontage des mésocosmes, deux indices de végétation les plus couramment interprétés pour la détermination de la capacité de production des plantes ont été mesurés : l'indice différentiel normalisé de la végétation ou Normalized Difference Vegetation Index

(NDVI) et l'indice de réflectance photochimique ou Photochemical Reflectance Index (PRI). Le NDVI est égal à la différence de réflectance de la chlorophylle dans le visible et des structures cellulaires dans le proche infrarouge. Il permet d'apprécier la capacité photosynthétique des plantes. Quant au PRI, il est influencé par les caroténoïdes, le taux d'absorption de carbone et le régime hydrique. Il peut donc caractériser la productivité des plantes et les éventuels stress.

Les valeurs de NDVI et PRI ont été obtenus par les mesures directes sur les feuilles à l'aide de deux appareils de mesures respectivement PlantPen NDVI300, Photon Systems Instruments, Germany et PlantPen PRI200, Photon Systems Instruments, Germany.



Cliché 4 : Mesure PRI (à droite) et NDVI (à gauche)

➤ SPAD

Le SPAD ou chlorophyll meter (Soil Plant Analyses Development) est un outil de diagnostic simple, qui est utilisé pour estimer la teneur en chlorophylle in situ d'un végétal, en mesurant la quantité de lumière transmise à travers la feuille. Cette teneur peut être mise en relation avec le statut azoté de la plante.

C'est un appareil portable et facile d'emploi, les mesures sont réalisées de préférence pendant la matinée et s'effectue un jour avant le démontage de l'expérimentation.

La mesure se fait en pinçant la dernière feuille ligulée car ce dernier est la plus jeune et renseigne le mieux sur le niveau de satisfaction des besoins azotés de la plante avec une moyenne de 10 prises.



Cliché 5 : Mesure SPAD

➤ **Biomasses aérienne et racinaire**

A la fin de l'expérimentation, la biomasse aérienne a été séparée de la partie racinaire dans chaque pot. La biomasse racinaire a été lavée. Ces biomasses ont ensuite été séchées à 60°C à l'étuve pendant 48 heures, puis pesées à l'aide d'une balance de précision pour obtenir les biomasses sèches aériennes et racinaires. A partir de ces variables, on a pu déduire le rapport entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire (Ratio Shoot/Root) et la biomasse totale de la plante.

➤ **Teneur en N et P total de la plante**

A la fin de l'expérimentation, les teneurs en azote et phosphore total dans les biomasses aériennes du riz ont été analysées. Pour l'azote, l'analyse a été effectuée à Montpellier en utilisant le microanalyseur CHNS/O (Flash 2000 Series, CHNS/O 122 Analysers Thermo Scientific, IRCOF). Pour le phosphore, l'extraction a été réalisée au LRI en minéralisant un échantillon de 0,5 g de la partie aérienne de chaque traitement. Deux réactifs ont été utilisés : réactif A (Molybdate d'ammonium) et réactif B préparé à partir du réactif A (1.056 g d'acide ascorbique dans 200 ml du réactif A). Puis, le dosage a été fait au spectrophotomètre par la méthode au bleu. Le calcul de la quantité de phosphore dans chaque plante est obtenu en multipliant les teneurs en phosphore total de la plante par la quantité de biomasse aérienne.

1.7. Analyse Statistique

Les données brutes ont été saisies et enregistrées sous Microsoft Excel. Un tableau croisé dynamique a été établi pour faciliter les analyses. A partir de la manipulation de ce tableau, la moyenne et l'écart-type des valeurs des variables de chaque traitement ont été exprimés.

Ensuite, la normalité des données a été testée. Pour les variables qui suivent une loi normale, l'analyse de variance (ANOVA) à 3 facteurs « matières organiques », « vers de terre » et « mycorhizes » a été utilisée pour effectuer la comparaison des moyennes entre les traitements. Par contre, lorsque les données ne suivent pas une loi normale, elles sont soumises au test non-paramétrique de Kruskal-Wallis. Le seuil de significativité est fixé à une p-value inférieure à 0,05.



RESULTATS

Chapitre 2 : RESULTATS

2.1. Taux de survie des vers de terre

La figure 4 suivante montre le taux de survie de vers de terre à la fin de l'expérience.

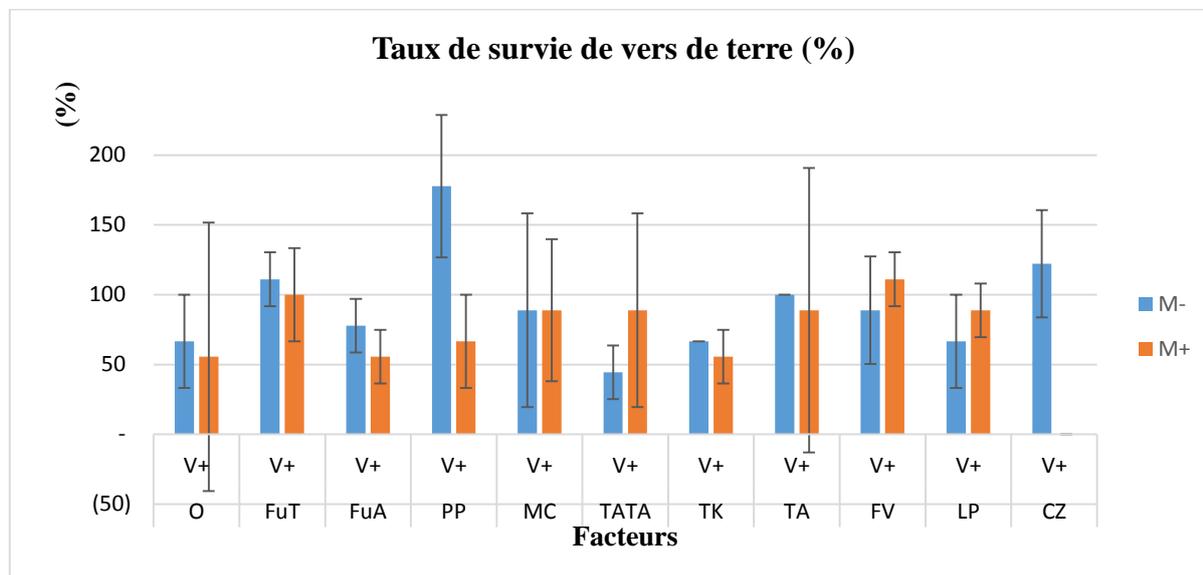


Figure 4 : Taux de survie de vers de terre à la fin de manipulation (O : Témoin, FuT : Fumier traditionnel, FuA : Fumier amélioré, PP: Poudrette de parc, MC : Madacompost, TATA : Vermicompost, TK : Taroka, TA : Terreau d'Andralanitra, FV : Fiente de volaille, LP : Lisier de porc, CZ : Corne de zébus. M- : sans inoculation de mycorrhize ; M+ : avec inoculation de mycorrhize, V+ : avec vers de terre).

En général, la plupart des vers de terre introduits ont presque survécu à la fin de l'expérience avec une moyenne de 82%. Toutefois, il est remarqué que le taux de survie des vers varie selon l'inoculation des mycorrhizes. En absence d'inoculation de mycorrhizes, le taux de survie moyen est de 92% tandis qu'en présence de mycorrhize, le taux est de 73%. Une diminution de 19% du taux de survie des vers de terre a été donc observée dans les traitements où l'on a inoculé des mycorrhizes. Néanmoins, le type de matière organique a une influence sur la survie des vers de terre. Dans les traitements en absence d'inoculation de mycorrhizes, le taux de survie le plus élevé 178% a été noté dans les pots où l'on apporté de la poudrette de parc tandis que le taux le plus faible 44% a été observé dans les pots avec apport de vermicompost. Pour les traitements où les mycorrhizes ont été inoculés, la matière organique la plus favorable à la survie des vers de terre est la fiente de volailles avec un taux de survie moyen de 111%. En revanche, une absence totale de vers est remarquée dans le traitement avec apport de corne de zébus en

présence de mycorhizes. Néanmoins, l'apparition des turricules en surface ainsi que la présence des cocons prouvent leur activité durant l'expérience.

2.2. Taux de mycorhization dans les racines du riz

Le taux de mycorhization dans les racines est présenté dans la figure 5 ci-dessous.

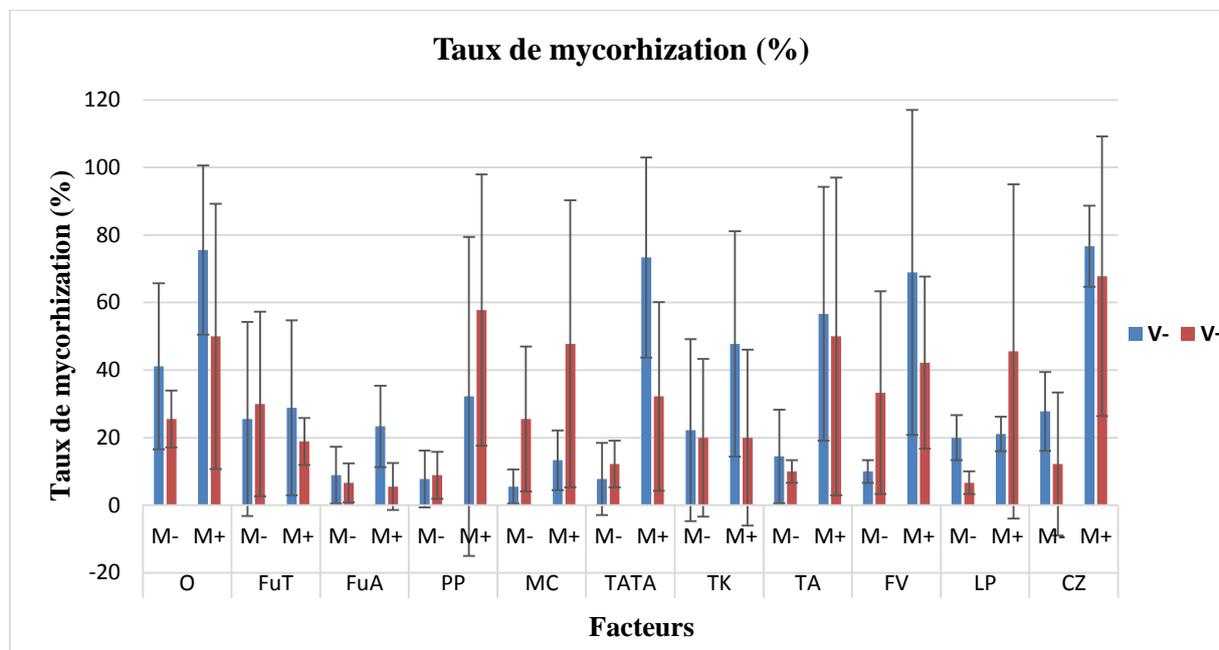


Figure 5 : Taux de mycorhization en fonction des trois facteurs (V-: sans vers de terre V+ : avec vers de terre M- : sans mycorhize M+ : avec mycorhize)

Selon le résultat, la présence de mycorhizes a été observée dans tous les traitements que ce soit en présence ou en absence d'inoculation de mycorhizes. Pour ce dernier, le taux de mycorhization varie en moyenne entre 5% à 41%. Cela indique la présence naturelle de mycorhizes associés aux racines du riz. Pour les traitements avec inoculation des mycorhizes, le taux de mycorhization présente une variation moyenne de 5% à 77%. En ce qui concerne les matières organiques, le résultat montre que les mycorhizes sont présents indépendamment de l'apport de MO. Tel est le cas pour le traitement témoin absolu (sans MO, sans vers de terre, sans mycorhize) où le taux de mycorhization le plus élevé (41%) dans les traitements sans inoculation de mycorhizes a été observé. Néanmoins, on peut remarquer que le taux de mycorhization varie suivant le type de matières organiques et la présence de vers de terre.

- Pour les traitements sans inoculation de mycorhizes, des valeurs plus faibles du taux de mycorhization ont été observées pour tous les types de matières organiques en l'absence des vers de terre comparés au traitement témoin. Par contre, la présence des vers de terre permet

d'augmenter le taux de mycorhization dans les traitements avec apport de fumier traditionnel, des fientes de volailles et du madacompost.

- Pour les traitements avec inoculation de mycorhize et sans vers de terre, le taux de mycorhization est supérieur à 70%, dans les traitements avec corne de zébus 77%, témoin sans MO 76% et vermicompost 73%. En présence de vers de terre, malgré le fait que le taux de mycorhization demeure faible comparé à celui observé pour le traitement témoin sans apport de MO, on remarque que les vers de terre augmentent le taux de mycorhization dans les traitements avec de la poudrette de parc, de madacompost et de lisier de porc.

2.3. Hauteur du riz

Le tableau 2 montre le résultat de l'analyse des variances à trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorhize) des variables hauteurs.

Tableau 2 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la hauteur du riz

Facteurs	Variables						
	H11	H18	H25	H32	H39	H46	H54
	p-value						
MO	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
VDT	0,10	0,11	0,65	0,92	0,98	0,57	0,43
MYC	0,005	0,09	0,20	0,51	0,77	0,40	0,80
MO*VDT	0,45	0,19	0,15	0,07	0,29	0,21	0,37
MO*MYC	0,02	0,05	0,08	0,08	0,25	0,23	0,18
VDT*MYC	0,54	0,11	0,34	0,57	0,60	0,35	0,58
MO*VDT*MYC	0,37	0,28	0,43	0,31	0,44	0,40	0,38

Selon le résultat statistique, les matières organiques ont un effet fortement significatif sur la hauteur du riz, quelque soit la date de mesure. Par contre, la présence de vers de terre n'a pas d'influence significative. Similairement, les mycorhizes n'ont pas d'effet significatif sauf au début de l'expérience (H11) (p-value=0,005).

Un effet significatif de la combinaison de matières organiques et des mycorhizes a été observé pour la hauteur H11 (p-value = 0,023) et pour la hauteur H18 (p-value = 0,05).

En revanche, la combinaison de trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorhize) ne présente aucun effet significatif sur la hauteur.

La figure 6 illustrant la hauteur de la plante mesurée à 54 JAS montre que l'apport de MO permet d'augmenter la croissance en hauteur du riz indépendamment du type de MO. Toutefois,

l'amplitude de l'augmentation varie suivant le type de MO. Parmi les traitements, la fiente de volaille et le lisier de porc sont les principaux traitements qui offrent la meilleure croissance en hauteur du riz. L'apport de fiente de volaille sans mycorhizes en présence de vers de terre présente la hauteur de riz la plus élevée ($61,3 \pm 5,9$ cm). Par contre, la hauteur la plus faible est observée pour le traitement témoin en présence de mycorhize avec vers de terre ($25,3 \pm 3,9$ cm).

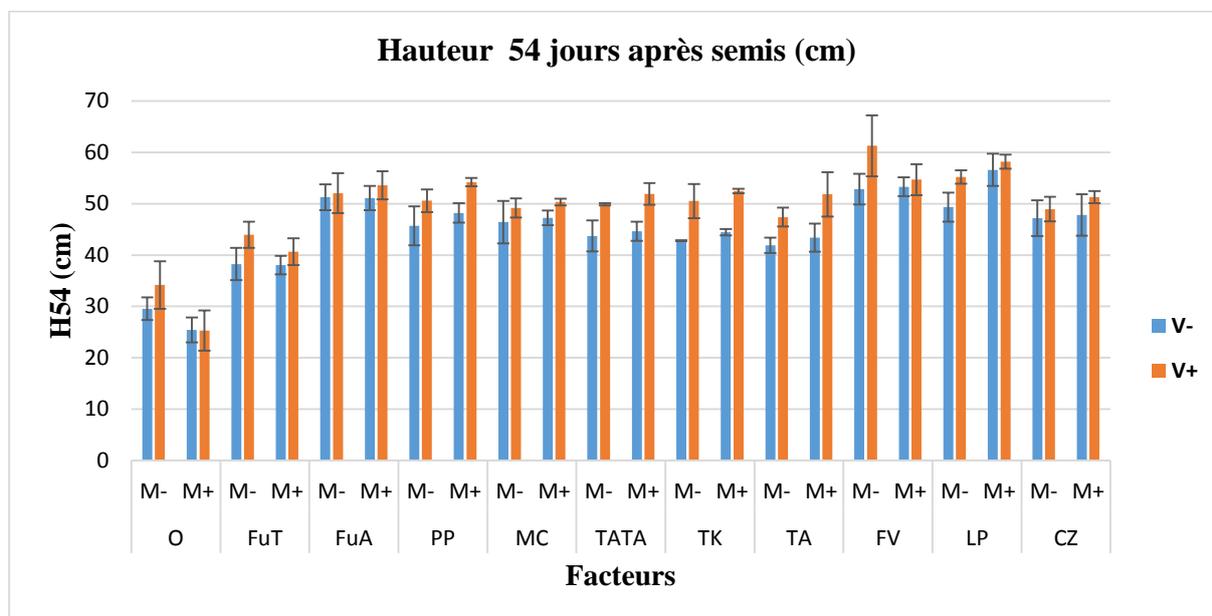


Figure 6 : Hauteur du riz à la fin de l'expérience

✚ Production de biomasse

L'effet des différents facteurs sur la production de biomasse est présenté dans le tableau 3 ci-dessous. D'après le résultat de l'ANOVA, les matières organiques ont une influence fortement significative sur la production de biomasse. Par contre, les facteurs vers de terre et mycorhizes n'ont aucun effet significatif. Similairement, l'interaction entre matières organiques et vers de terre ne présente aucun effet significatif sauf au début de l'essai (p -value = 0,05).

Un effet significatif a été marqué avec la combinaison de matières organiques et mycorhizes, pour la biomasse racinaire (p -value = 0,01) et pour la biomasse totale (p -value = 0,05). Toutefois, l'interaction entre vers de terre et mycorhize ainsi que la combinaison entre les trois facteurs ne montrent pas un effet significatif.

Tableau 3 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la production de biomasse

Facteurs	Variables			
	BA	BR	BT	SR
p-value				
MO	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
VDT	0,36	0,11	0,25	0,25
MYC	0,94	0,70	0,85	0,74
MO*VDT	0,05	0,14	0,08	0,81
MO*MYC	0,13	0,01	0,05	0,58
VDT*MYC	0,17	0,42	0,21	0,26
MO*VDT*MYC	0,29	0,35	0,20	0,80

(BA : biomasse aérienne, BR : biomasse racinaire, BT : biomasse totale, SR : rapport shoot-root)

La production de biomasses présente généralement la même tendance pour les matières organiques. En effet, que ce soit pour la biomasse aérienne, racinaire ou totale, le traitement avec fiente de volaille montre une biomasse élevée parmi tous les autres traitements (Figure 7, Figure 8, Figure 9).

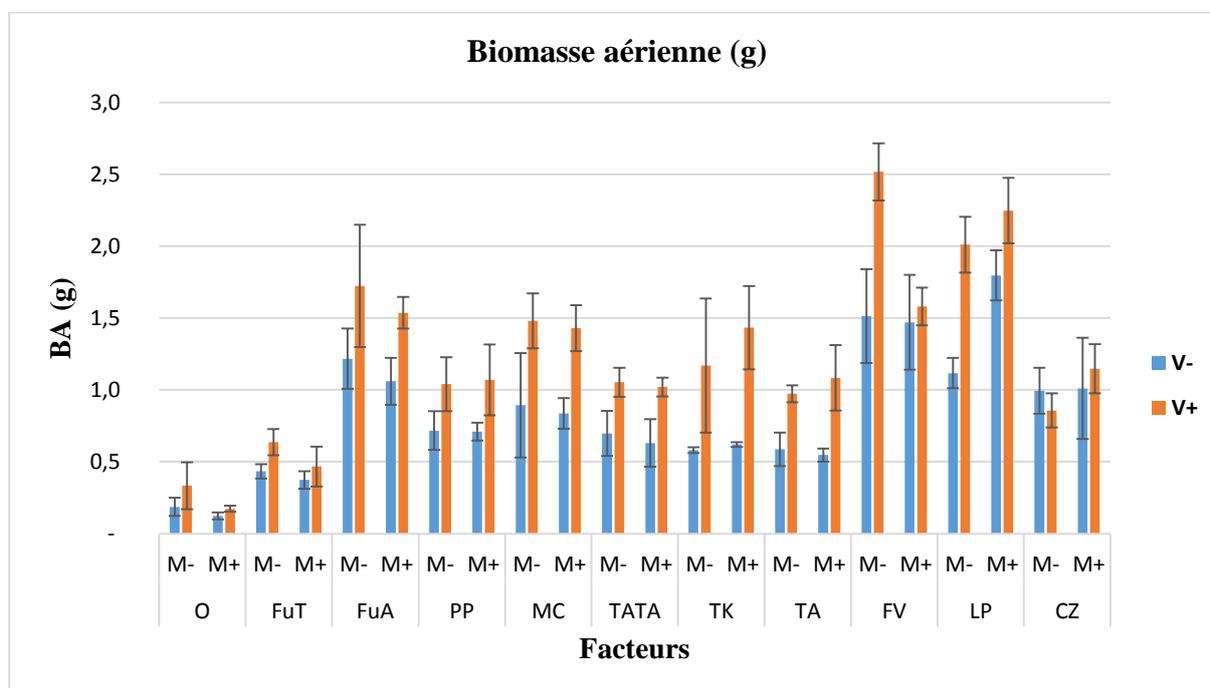


Figure 7 : Biomasse aérienne du riz à la fin de l'expérience

D'un point de vue global, la plupart des traitements donnent un meilleur résultat par rapport aux fumiers traditionnels et aux témoins. De plus, la présence de vers de terre augmente toujours

la biomasse aérienne de la plante par rapport au traitement sans vers de terre pour chaque traitement.

Les traitements présentant une biomasse aérienne élevée sont le traitement avec fiente de volaille sans mycorhizes en présence de vers de terre ($2,52 \pm 0,20$ g) et le traitement avec lisier de porc avec mycorhizes et vers de terre ($2,25 \pm 0,23$ g). Par contre, la biomasse aérienne la plus faible est donnée par le traitement témoin en présence de mycorhizes sans vers de terre ($0,12 \pm 0,03$ g).

Aucune grande différence significative n'est aperçue entre le traitement avec vers de terre et sans vers de terre.

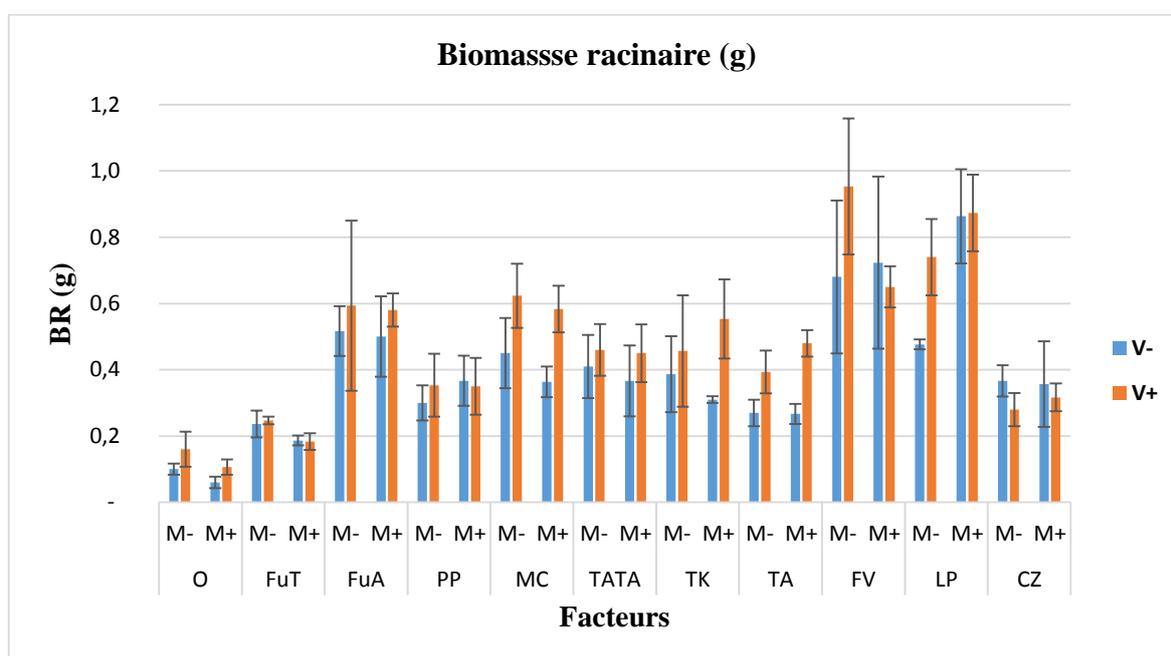


Figure 8: Biomasse racinaire du riz à la fin de l'expérience

Le traitement avec fiente de volaille sans mycorhize en présence de vers de terre ($0,95 \pm 0,21$ g) donne la biomasse racinaire la plus élevée (Figure 8). La biomasse racinaire la plus faible est présentée par le traitement témoin en présence de mycorhize sans vers de terre ($0,06 \pm 0,02$ g). Cependant, il n'existe pas de différence significative entre les différents traitements. La valeur minimale de biomasse aérienne est enregistrée au niveau du traitement témoin et fumier traditionnel, alors que la valeur la plus élevée est obtenue avec le traitement fiente de volaille, lisier de porc et fumier amélioré. Pourtant, la présence de vers de terre a eu plus d'influence sur la biomasse racinaire que le traitement sans vers.

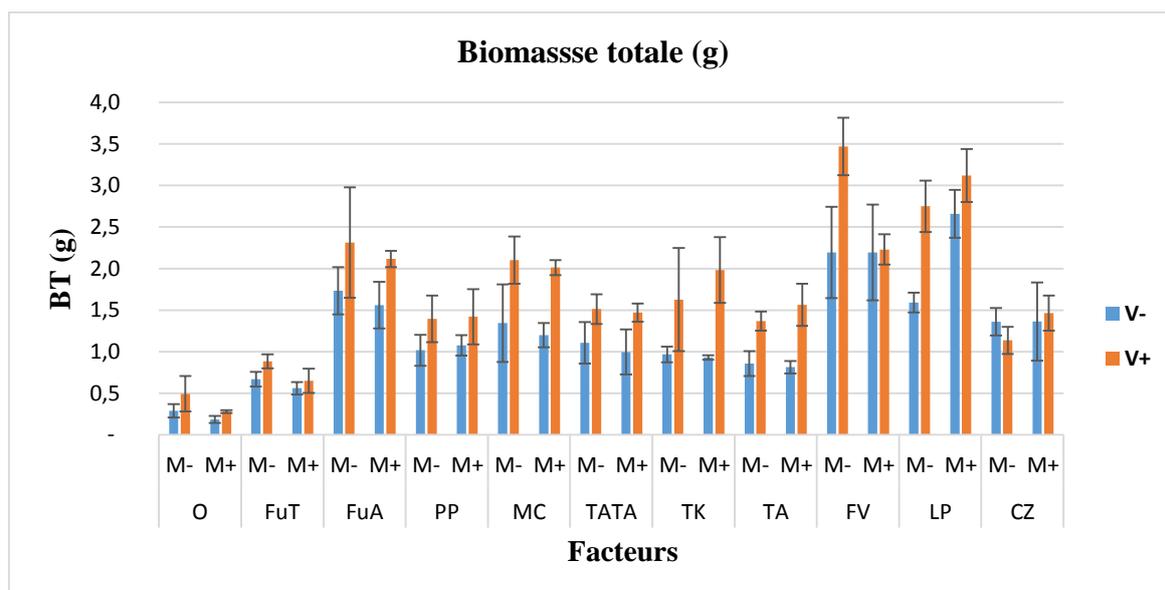


Figure 9 : Biomasse totale du riz à la fin de l'expérience

Le traitement avec fiente de volaille sans mycorhizes en présence de vers de terre ($3,47 \pm 0,35$ g) présente la biomasse totale le plus élevé (Figure 9). Le traitement qui démontre la biomasse totale le plus faible est le traitement témoin en présence de mycorhizes sans vers de terre ($0,18 \pm 0,04$ g). Cependant, il n'existe pas une grande différence significative entre les témoins (O.M-.V- ; O.M-.V+ ; O.M+.V- ; O.M+.V+) et les autres traitements. Les traitements avec lisier de porc, fiente de volaille et fumier amélioré sont les plus performant en terme de biomasse totale alors que les moins performants sont le fumier traditionnel et les témoins. En plus, la présence de vers a eu plus d'effet sur la biomasse totale que l'absence de vers de terre.

2.4. Quantité de phosphore dans la biomasse aérienne

Le tableau 4 ci-dessous montre le résultat de l'analyse des variances à trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorhize) des variables nutrition phosphatée.

Tableau 4 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité de phosphore dans la biomasse aérienne

Facteurs	Variable
	p-value
MO	<0,001
VDT	0,74
MYC	0,77
MO*VDT	<0,001
MO*MYC	<0,001
VDT*MYC	0,15
MO*VDT*MYC	0,05

D'après l'analyse de variance, seul l'effet des matières organiques a un effet significatif sur la nutrition phosphatée.

Les facteurs vers de terre et mycorhizes ne présentent pas d'effet significatif. On note une interaction significative entre matière organique et vers de terre ainsi qu'entre matière organique et mycorhizes sur la quantité de phosphore dans la biomasse aérienne.

Le lisier de porc et la fiente de volaille ont toujours permis une augmentation maximale de la quantité de phosphore. La figure 10 ci-dessous illustre la quantité de phosphore dans la biomasse aérienne.

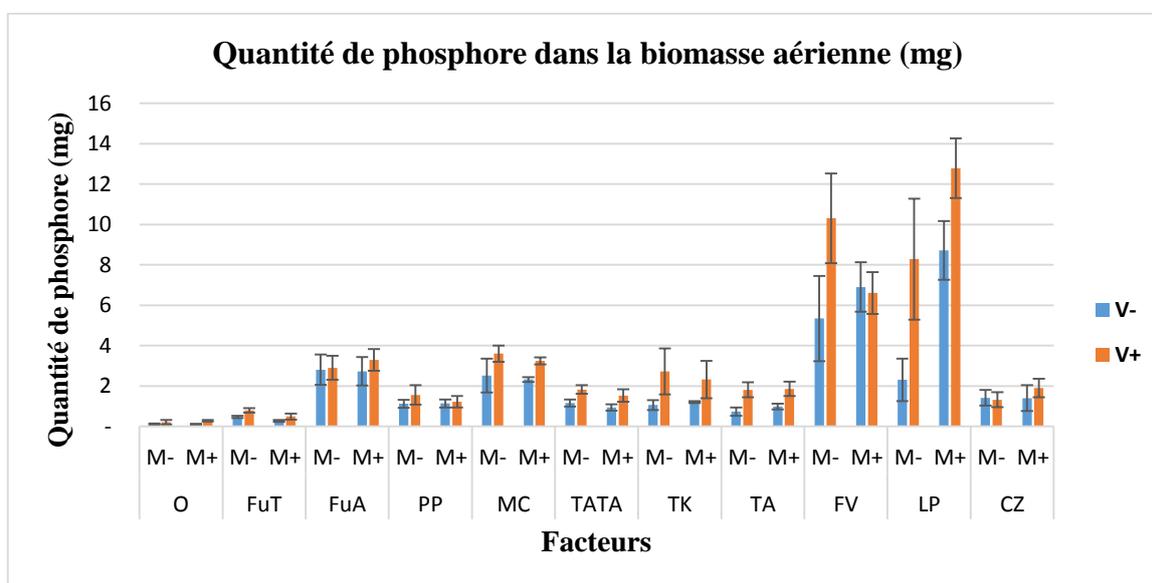


Figure 10: Quantité de phosphore du riz à la fin de l'expérience

Du point de vue global, la quantité de phosphore dans la biomasse aérienne est très faible surtout pour le traitement témoin et le fumier traditionnel.

C'est surtout avec les traitements avec apport de lisier de porc et fiente de volaille qu'on observe une quantité de phosphore élevée.

Les traitements qui montrent une quantité de phosphore élevé sont les traitements avec la combinaison de lisier de porc avec inoculation de vers et mycorhizes ($12,8 \pm 1,47$ mg) ainsi que la combinaison de fiente de volaille sans mycorhizes en présence de vers de terre ($10,3 \pm 2,22$ mg). Par contre, la quantité de phosphore la plus faible est observée au niveau de traitement témoin négatif ($0,11 \pm 0,03$ mg).

D'après la figure 10, il n'existe aucune grande différence significative entre les traitements. La présence de vers de terre augmente toujours la quantité de phosphore total de la plante par rapport au traitement sans vers de terre pour chaque traitement.

2.5. Quantité d'azote dans la biomasse aérienne

Le résultat de l'analyse des variances à trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorhize) des variables nutrition azotée est présenté dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité d'azote dans la biomasse aérienne

Facteurs	Variable
	p-value
MO	<0,001
VDT	<0,001
MYC	0,688
MO*VDT	<0,001
MO*MYC	<0,001
VDT*MYC	0,596
MO*VDT*MYC	0,035

Il ressort de l'analyse des résultats de ce tableau que les différents facteurs ont une influence significative sur la quantité d'azote dans la biomasse aérienne à l'exception du facteur mycorhize ainsi que l'interaction entre vers de terre et mycorhizes.

C'est avec le traitement en présence de fiente de volaille, de corne de zébus et de lisier de porc qu'on obtient la quantité d'azote la plus élevée. La figure 11 suivante montre la quantité d'azote dans la biomasse aérienne.

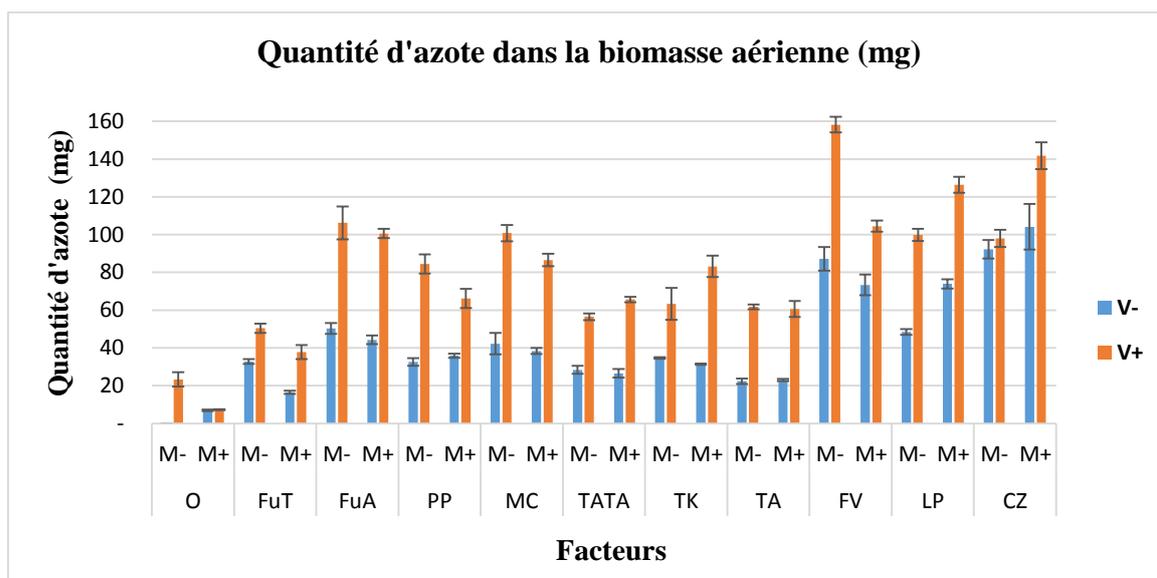


Figure 11 : Quantité d'azote dans la biomasse aérienne du riz à la fin de l'expérience

D'après la figure 11, les traitements avec fiente de volaille, corne de zébus et lisier de porc présentent une quantité d'azote la plus haute. En plus, la présence de vers de terre augmente toujours la quantité d'azote total de la plante.

La quantité d'azote la plus élevée est 158,2 mg, correspondant au traitement à base de fiente de volaille sans mycorrhize en présence de vers de terre. Par contre, la quantité la plus faible a été donnée par le traitement témoin absolu (sans vers ni mycorrhize).

Globalement, les traitements en présence de vers de terre sont plus performants par rapport aux traitements sans vers.

2.6. Quantité de carbone dans la biomasse aérienne

Le tableau 6 ci-dessous illustre le résultat de l'analyse des variances à trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorrhize) sur la quantité de carbone dans la biomasse aérienne.

Le résultat statistique montre un effet fortement significatif sur la quantité de carbone dans la biomasse aérienne. Par contre la présence de mycorrhizes ainsi que l'interaction entre vers de terre et mycorrhizes ne présente aucun effet significatif sur la quantité de carbone.

Tableau 6 : P-value de l'ANOVA montrant l'effet des facteurs sur la quantité de carbone dans la biomasse aérienne

Facteurs	Variable
	p-value
MO	<0,001
VDT	<0,001
MYC	0,879
MO*VDT	0,000
MO*MYC	<0,001
VDT*MYC	0,187
MO*VDT*MYC	0,010

Le lisier de porc et la fiente de volaille ont toujours permis une augmentation maximale de la quantité de carbone. La figure 12 suivante illustre cette tendance.

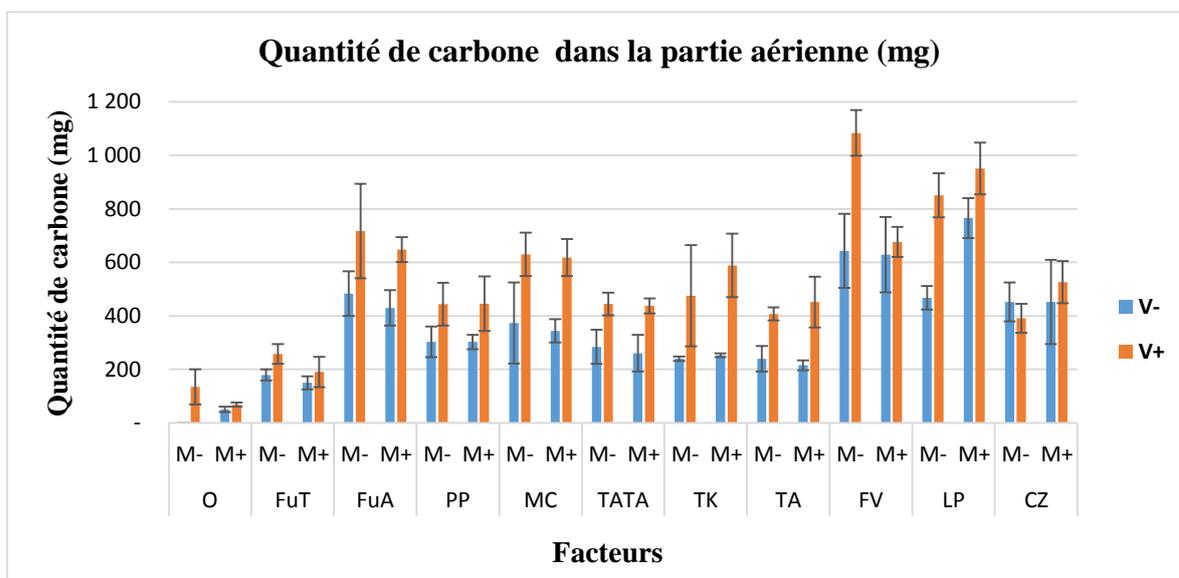


Figure 12 : Quantité de carbone du riz à la fin de l'expérience

Du point de vue global, tous les traitements en présence de vers de terre ont permis une augmentation élevée de la quantité de carbone dans la biomasse aérienne. De plus, la présence de vers de terre a eu plus d'influence sur la quantité de carbone total.

La quantité de carbone la plus performante est observée avec le traitement fiente de volaille, lisier de porc et fumier amélioré. Les traitements moins performants sont les fumiers traditionnels et les témoins. La valeur maximale de la quantité de carbone est de 951,19 mg, correspondant au traitement à base de fiente de volaille en présence de vers de terre sans

mycorhize (Figure 12). La valeur minimale est observée au niveau du traitement témoin sans vers de terre en absence de mycorhize.

2.7. Indices de la végétation et SPAD

Le tableau 7 ci-dessous présente le résultat de Kruskal-Wallis des variables PRI, NDVI et SPAD en fonction des différents facteurs.

Tableau 7 : P-value de l'analyse de Kruskal-Wallis montrant l'effet des facteurs sur PRI, NDVI, SPAD

Facteurs	PRI	NDVI	SPAD
p-value			
MO	0,000	< 0,001	< 0,001
VDT	< 0,001	< 0,001	< 0,001
MYC	0.58	0.43	0.72
MO*VDT	< 0,001	< 0,001	< 0,001
MO*MYC	0.01	< 0,001	0,005
VDT*MYC	< 0,001	< 0,001	< 0,001
MO*VDT*MYC	0,000	< 0,001	< 0,001

D'après les résultats statistiques, les différents facteurs ont une influence fortement significative sur les indices de végétation et le SPAD. C'est seulement le facteur mycorhizes qui ne présente pas d'effet significatif.

La corne de zébus a permis une augmentation maximale de l'indice de végétation et SPAD. Les résultats détaillés sont illustrés dans les figures suivantes.

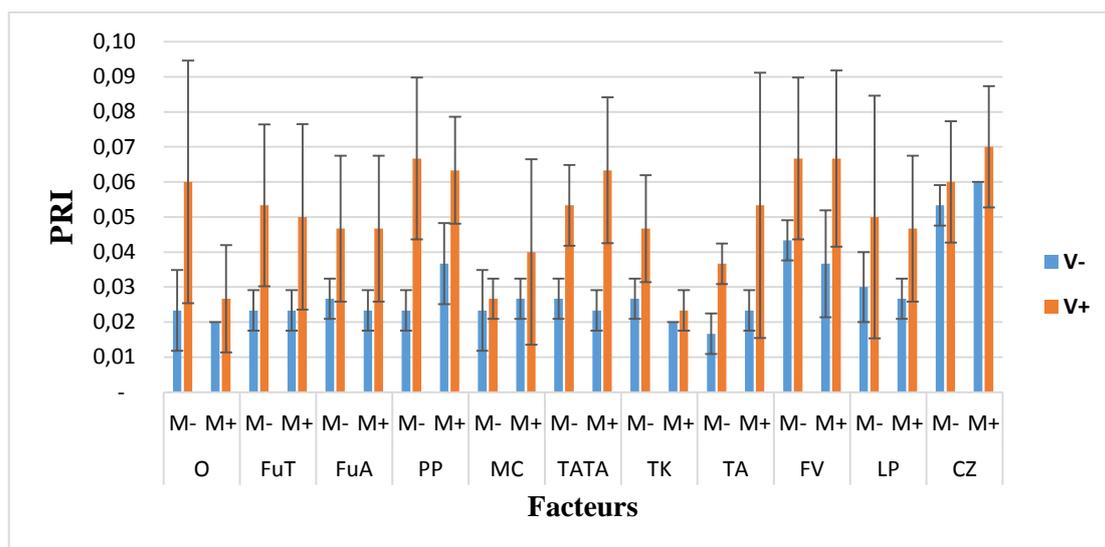


Figure 13 : Indice de réflectance photochimique

Il n'existe pas une grande différence significative entre les traitements (Figure 13). Les traitements en présence de vers de terre ont toujours permis une augmentation plus élevée de la valeur du PRI par rapport aux traitements sans vers.

Le traitement avec corne de zébus en présence de vers de terre et de mycorhizes présente le PRI la plus élevée ($0,07 \pm 0,02$). La valeur PRI la plus faible est enregistrée au niveau du traitement terreau d'Andralanitra sans organismes du sol ($0,02 \pm 0,01$).

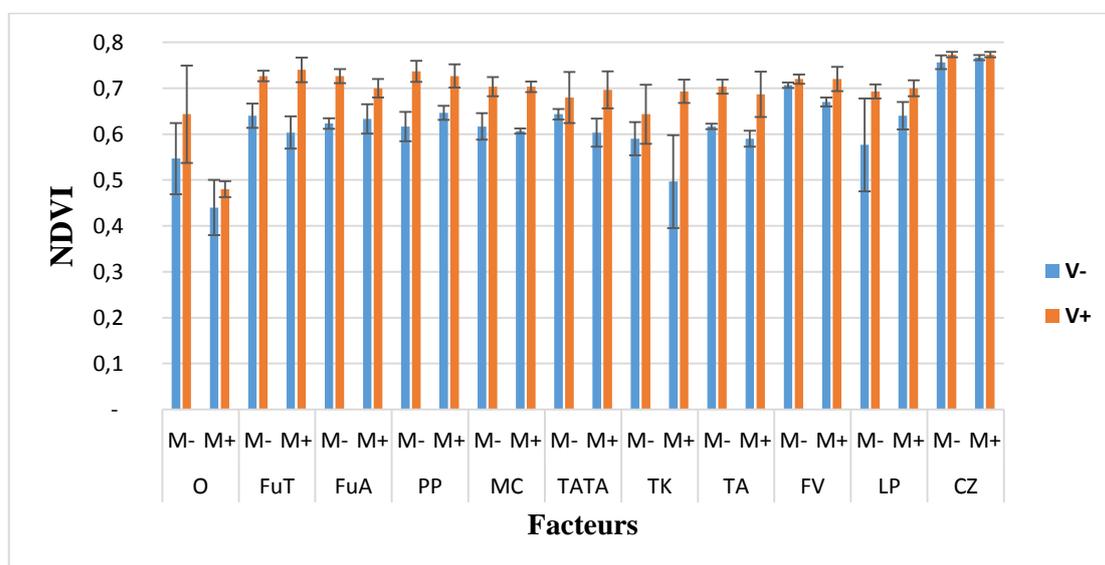


Figure 14 : Indice différentiel normalisé de la végétation

L'Indice différentiel normalisé de la végétation varie de 0,45 à 0,77. La plus forte valeur de NDVI est enregistré avec le traitement corne de zébus ($0,77 \pm 0,01$). Par contre, la valeur de

NDVI le plus faible est observé au niveau du traitement témoin sans vers de terre en présence de mycorhize ($0,45 \pm 0,06$).

Du point de vue global, les différents traitements ne présentent pas de différence significative.

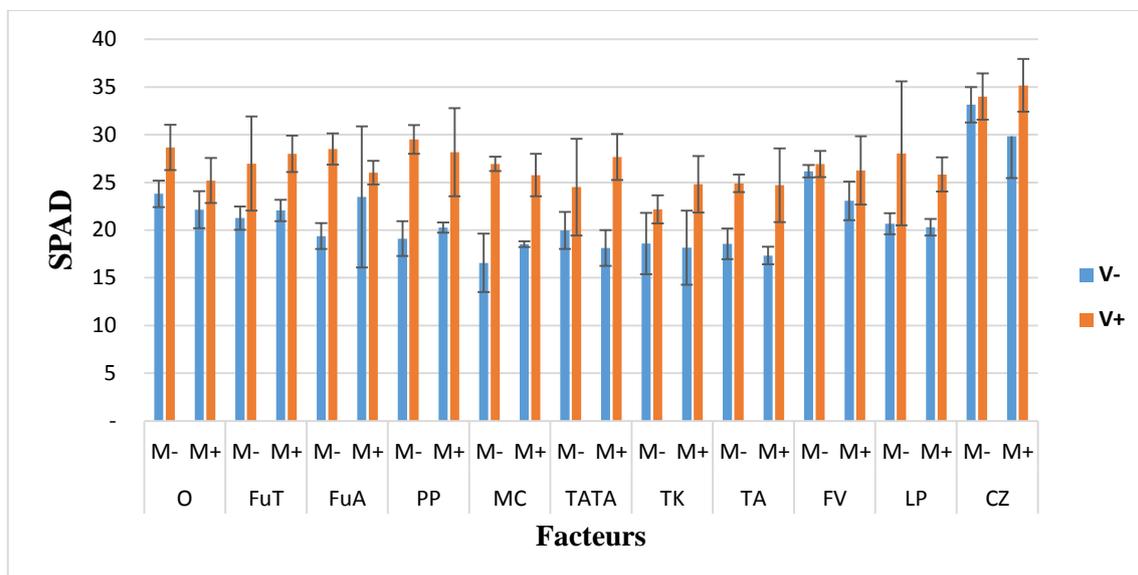


Figure 15 : Valeur SPAD en fonction des trois facteurs

En général, les traitements en présence de vers de terre sont plus performants. Les traitements avec corne de zébus présentent la valeur SPAD le plus élevé (figure 15).

La valeur maximale observée pour le SPAD est de ($35,17 \pm 2,75$) correspondant à la combinaison de corne de zébus avec inoculation de vers et mycorhize. Par contre, la valeur du SPAD la plus faible est celle du madacompost sans organisme du sol ($16,57 \pm 3,07$).

2.8. Fréquence de mycorhization

Le tableau 8 ci-dessous présente le résultat de Kruskal-wallis du variable F%.

Tableau 8 : P-value de l'analyse de Kruskal-Wallis montrant l'effet des facteurs sur la fréquence de mycorhization (F%)

Facteurs	Variable
	p-value
MO	0.11
VDT	0.44
MYC	< 0,001
MO*VDT	0.16
MO*MYC	0.00
VDT*MYC	< 0,001
MO*VDT*MYC	0.02

Suivant le résultat statistique, la présence de mycorhize a une forte influence significative sur le taux de mycorhization. Similairement, l'interaction entre matières organiques et mycorhizes, l'interaction entre vers de terre et mycorhize ainsi que l'interaction entre les trois facteurs présentent un effet significatif. C'est seulement, le facteur matières organiques, vers de terre et interaction entre matières organiques et vers de terre qui ne montrent aucun effet significatif sur la fréquence de mycorhization

La fréquence de mycorhization en fonction des trois facteurs est présentée dans la Figure 16.

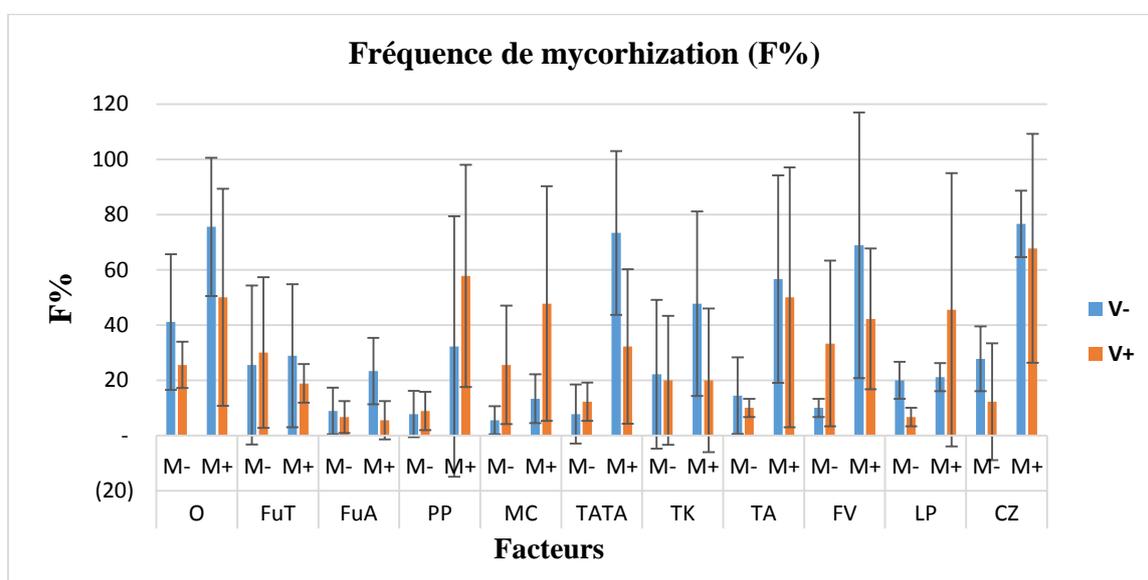


Figure 16: Fréquence de mycorhization

Du point de vue global, presque les traitements sans vers de terre ont permis une fréquence de mycorhization plus élevée. On constate aussi la présence naturelle de mycorhize avec les traitements sans inoculation de mycorhize. Celle-ci est très marquée dans le traitement témoin. Les traitements avec corne de zébus suivis par le traitement témoin et vermicompost présentent la fréquence de mycorhization le plus élevé. Le taux de mycorhization est très faible surtout dans les traitements fumier traditionnel et fumier amélioré.



DISCUSSION

Chapitre 3 : DISCUSSIONS

3.1. Effet des différents amendements organiques

3.1.1. Effet des matières organiques sur la croissance du riz

Après huit semaines d'expérience, les résultats ont montré que les matières organiques ont un effet fortement significatif sur les paramètres de croissance du riz (hauteurs et biomasses). Par rapport au témoin absolu, l'ajout de matières organiques a permis une augmentation significative de la hauteur du riz et de la production de biomasse. Les amendements organiques le plus performants sont la fiente de volaille et le lisier de porc, avec une augmentation respective de 26,93 cm et de 26,24 cm comparé aux traitements sans matières organiques. Ces résultats s'expliquent par la forte teneur en éléments minéraux de ces fumures organiques. En plus, la fiente de volaille et le fumier de porc sont plus riches en éléments minéraux que le fumier. Ainsi les plantes ont pu absorber les éléments minéraux que ces matières organiques contiennent (Naika *et al.*, 2010). Ces résultats sont aussi conformes à ceux de Ouedraogo (2016). Zamil *et al.*, (2004) démontrent dans leurs études que la fiente de poule et le lisier de porc améliorent la disponibilité de l'azote, du phosphore et du potassium ce qui conduit à une meilleure croissance de la plante. Sengar *et al.*, ont démontré aussi que l'absorption des éléments majeurs est significativement augmentée par l'application de fiente de poule sur la culture du riz. Le rapport C/N de la fiente de volaille et du lisier est faible, ce qui explique la richesse en élément nutritif des deux matières organiques. Pourtant, le vermicompost présente le rapport C/N le plus faible parmi les différents amendements organiques mais il n'est pas riche en élément nutritif comme le lisier de porc et la fiente de volaille.

3.1.2. Effet des matières organiques sur la nutrition phosphatée et azotée

L'efficacité de prélèvement de phosphore par les plantes est significativement plus élevée pour la fiente de volaille et le lisier de porc parmi les différentes matières organiques.

L'absorption de phosphore par les plantes avec les fumiers traditionnels et à peu près le même qu'avec le témoin, cette absorption est faible car le fumier traditionnel est appauvri et c'est un fumier de qualité médiocre. La quantité de phosphore disponible dans les sols ferralitiques de Madagascar est très faible (Rabeharisoa, 2004) ce qui fait l'élément le plus limitant de la croissance du riz (Raminoarison *et al.*, 2019). C'est pourquoi son absorption par les plantes est faible dans le sol sans fertilisant ou de moindre qualité. C'est seulement dans la fiente de volaille et le lisier de porc que les plantes peuvent prélever une quantité importante de phosphore. En effet, ces deux matières organiques sont riches en phosphore alors que le phosphore est absorbé pendant la phase végétative et accélère la croissance (Zapats & Roy, 2004).

En ce qui concerne l'azote, il est un des principaux facteurs de la croissance des plantes (FAO, 1980). Il peut être absorbé sous forme de nitrate NO_3^- ou d'ammonium NH_4^+ par la plante (Layzell, 1990). Les résultats ont montré que la fiente de volaille et la corne de zébus ont les quantités d'azote les plus élevées. En plus, ces deux matières organiques sont riches en azote et c'est pourquoi l'efficacité de prélèvement d'azote est élevée. L'azote étant un élément constitutif de la chlorophylle, il est un facteur déterminant dans la croissance et la détermination du rendement des plantes (Sikora et Szmidt, 2001; Douglas *et al.*, 2003; Magnan, 2006). De plus, Sengar *et al.*, (2000) ont démontré que l'absorption des éléments majeurs est significativement augmentée par l'application de fiente de poule sur la culture du riz.

3.1.3. Effet des matières organiques sur l'indice de végétation

Les valeurs de PRI sont très variables selon les différentes matières organiques. Cette variabilité est due à divers facteurs durant l'expérimentation comme l'attaque des insectes. D'après le résultat, la teneur en PRI de la corne de zébus est le plus élevé par rapport aux autres matières organiques. De plus, la corne de zébus a une quantité d'azote plus élevée après la fiente de volaille. Alors qu'une étude effectuée par Shrestha (2012) a montré que le PRI est lié avec la teneur en azote parce que l'azote favorise une activité du cycle du pigment xanthophylle. La valeur minimale du PRI est observée au niveau du traitement terreau d'Andralanitra.

Pour tous les différents traitements, les valeurs du NDVI sont supérieures à 0,5. Ceci indique que les plantes ont eu une teneur en chlorophylle élevée et une forte activité photosynthétique. Ravimycin en 2016 a montré dans son étude que l'augmentation de la chlorophylle dans les plantes fertilisées est due à l'optimisation du prélèvement de l'azote, molécule constitutive des structures photosynthétiques. La valeur du NDVI le plus élevé est observé avec la corne de zébus alors que la teneur la plus faible est donnée par le traitement témoin.

3.1.4. Effet des matières organiques sur le taux de mycorhization

L'effet de matières organiques sur le taux de mycorhization est variable en fonction des différents traitements. Les résultats ont montré un taux de mycorhization élevé au niveau de traitement témoin et corne de zébus.

Les mycorhizes stimulent généralement la croissance des plantes, en particulier dans des sols où la disponibilité en éléments minéraux est faible. Ceci est confirmé par l'écologie des mycorhizes qui montre que la colonisation des systèmes racinaires par les champignons mycorhiziens ainsi que la production des spores et de mycélium augmentent lorsque la fertilisation est faible ou nulle.

Une étude montre que les associations mycorhiziennes pouvaient jouer un rôle significatif dans la décomposition et la minéralisation des matières organiques végétales et mobiliser les nutriments au bénéfice de la plante hôte (Gobat *et al.*, 2003 ; Larnbers *et al.*, 2008).

Le champignon mycorhizien à arbuscules peut également accélérer la dégradation de la matière organique afin d'en augmenter la biodisponibilité pour les plantes (Hodge *et al.*, 2001) en facilitant la nutrition des plantes et l'amélioration de leur résistance envers les stress biotiques et abiotiques.

3.2. Effets seules et synergiques des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz

3.2.1. Effet des vers de terre seuls

Les résultats obtenus montrent que la présence de vers de terre a une influence positive sur la croissance du riz.

La disponibilité en nutriments dans le sol est indispensable à la croissance des plantes. Souvent, la limitation en nutriments concerne le phosphore, l'azote et le potassium (Raminoarison *et al.*, 2019). La disponibilité de ces nutriments essentiels a déjà été montrée comme étant accrue dans les structures produites par de nombreuses espèces de vers de terre. Les turricules de ces vers de terre présentent une teneur élevée en nutriments pour NH_4^{4+} , NO_3^{-3} , Mg^2 , K^+ et HPO_4^{2-} en comparaison avec un sol non ingéré (Tiwari *et al.*, 1989 ; James, 1991).

La présence de vers de terre a donc un impact particulièrement important sur la croissance car ils permettent de libérer des nutriments et des phytohormones, bénéfiques pour la plante (Barot *et al.*, 2007, Chapuis-Lardy *et al.*, 2011 ; Bernard *et al.*, 2012 in Blanchart et Jouquet, 2015). En plus, une étude effectuée par Brown *et al.*, (2004) met en évidence l'effet positif des vers de terre sur la croissance des plantes avec un effet positif sur la biomasse aérienne dans 75% des cas pour les vers de terres tropicaux parmi les 246 expériences faites.

En résumé, la présence des vers de terre conduit à une meilleure croissance et nutrition de la plante.

3.2.2. Effet des mycorhizes seuls

La mycorhization est un phénomène naturel présent dans tous les types de sols et de climats (Plenchette *et al.*, 2005). D'après les résultats obtenus, la présence de mycorhizes a une influence significative sur le taux de mycorhization et la croissance du riz.

Nos résultats ont montré qu'il y a présence naturelle de mycorhize dans les traitements non inoculés et on observe un pourcentage élevé avec le traitement témoin. Ceci est similaire aux études effectuées par Gnamkoulamba *et al.*, (2018) qui montrent que les plants témoin non

inoculés en pépinière ont été mycorhizés en champ après repiquage. Cette mycorhization naturelle confirme bien la relation symbiotique naturelle entre les champignons mycorhiziens à arbuscules et vésicules (CMA) et le riz (Sivaprasad *et al.*, 1990 ; Solaiman et Hirata, 1995). Toutefois cette symbiose naturelle n'a pu renforcer au tant les capacités des plants à croître et à produire comme cela a été avec les plants préinoculés. Les études antérieures ont montré que l'inoculation artificielle des plants rend les CMA très compétitifs et résistants parfois à la concurrence des mycorhizes naturels. D'autre part, plus le plant est mycorhizé au départ par le CMA, moins les racines sont ensuite mycorhizées par d'autres champignons et meilleure est sa croissance (Chen *et al.*, 2006, Rincón *et al.*, 2007).

L'observation de la croissance des plants de riz inoculés par des souches de champignons mycorhiziens dans notre étude a révélé que, par rapport aux plants non inoculés, les plants inoculés avaient une augmentation significativement plus élevée pour toutes les variables analysées (hauteur des plants, production de biomasse, quantité de phosphore, ...). Ces résultats viennent confirmer ceux de Gnamkoulamba *et al.*, (2018) qui a rapporté en condition du champ, une augmentation significative des paramètres de croissance du riz à savoir la hauteur des plants, la longueur de la racine, la biomasse sèche totale, le nombre de talles produites, le nombre de panicules fertiles par plant et le nombre de grains par panicule lorsque le riz est en association avec les CMA. Dès le début de XXe siècle, des effets bénéfiques de la symbiose mycorhizienne sont déjà signalés et cela se traduit par une croissance plus importante et par une production de biomasse plus élevée (Boullard, 1968). De plus, les effets bénéfiques de la symbiose du riz avec les champignons mycorhiziens sur la croissance et la production du riz est bien connu et documenté (Sivaprasad *et al.*, 1990; Solaiman et Hirata, 1995). Plusieurs auteurs ont rapporté l'effet bénéfique de la symbiose entre les CMA et les plantes dans leur développement, la croissance et la production (El-yazeid *et al.*, 2007 ; Laminou *et al.*, 2009 ; Leye *et al.*, 2015). Smith et Read (1997) confirment dans leurs études la forte stimulation de la croissance des plantes mycorhizées. Selon Hamza (2014), les mycorhizes en s'associant aux racines des plantes, facilitent un meilleur développement des racines permettant ainsi aux plantes de mieux se nourrir. Des études de Cardenas (2010), il ressort que les plants ayant subi une inoculation aux CMA seraient plus efficaces dans l'utilisation des nutriments du sol. Dans leurs travaux au Niger, Laminou *et al.* (2009) ont montré que l'inoculation des CMA (surtout *G. intraradices*) aux plantes permettait à ces dernières d'augmenter leur rendement en biomasse totale.

La symbiose mycorhizienne fournit à la plante principalement du phosphore (Ezawa *et al.*, 2005) qui est un nutriment peu disponible pour les plantes en raison de sa mobilité réduite dans

le sol et sa solubilité partielle mais aussi favorise l'accès à des formes complexes d'azote (Govindarajulu *et al.*, 2005 ; Cruz *et al.*, 2007), un nutriment essentiel et limitant à la production du riz. En plus de mettre à la disposition des plants des éléments nutritifs, les CMA sont connus pour leur capacité à conférer aux plantes une meilleure capacité d'acquisition de l'eau, comparé à une plante non mycorhizée (Bárzana *et al.*, 2012), entraînant une meilleure croissance des plants mycorhizés. De plus, les mycorhizes jouent un rôle majeur dans la mobilisation d'éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le phosphore (Duponnois *et al.*, 2003).

3.2.3. Effets synergiques entre vers de terre et mycorhizes

Les résultats ont révélé que l'interaction entre vers de terre et mycorhize ne présente aucun effet significatif sur la hauteur du riz, la production de biomasse et la nutrition phosphatée et azotée. C'est seulement avec les indices de végétation et le taux de mycorhization qu'on observe une différence significative.

Plusieurs études ont démontrés que l'interaction entre vers de terre et mycorhizes augmentent de manière significative la teneur en biomasse et en élément nutritifs des plantes. Mais ce n'est pas le cas pour notre étude. L'interaction des deux organismes du sol ne conduit pas à une meilleure croissance du riz. Une étude a montré que suite à l'ingestion de sol par les vers de terre, ces derniers favorisent l'activité et l'abondance des microorganismes dans le sol ingéré : augmentation de la biomasse des bactéries (Kumari et Sinha, 2012), de la biomasse et du nombre des champignons (Marhan, 2004). Ces microorganismes interviennent activement dans la disponibilité du phosphore qui est un élément indispensable à la croissance des plantes mais ceci n'est pas le cas pour notre essai.

3.3. Effet interactif des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz

Les résultats obtenus ont montré que l'interaction entre les trois facteurs (matières organiques, vers de terre et mycorhizes) ne présentent aucun effet significatif sauf sur les indices de végétation et le taux de mycorhization.

L'effet des trois facteurs sur la croissance du riz dépend de plusieurs facteurs, par exemple si les matières organiques sont riches en élément nutritif comme le lisier de porc et la fiente de volaille, les organismes du sol diminuent son activité. De plus, la réponse des plantes à la mycorhization est non seulement fonction de l'espèce de champignon mycorhizien (Plenchette *et al.*, 1982) mais aussi de l'espèce de plante hôte dont la dépendance mycorhizienne (Plenchette *et al.*, 1983) est liée principalement, à la fertilité du sol et à la morphologie du

système racinaire (Baylis, 1975). Ainsi, les plantes qui possèdent des poils absorbants courts et peu nombreux ont généralement une forte dépendance mycorhizienne comparativement à celles dont les poils absorbants sont longs, fins et ramifiés (Fortin et *al.*, 2015). D'après Plenchette et *al.*, (1991) les racines des *poaceae* sont faiblement mycorhizées. Le riz a donc une faible dépendance en colonisation mycorhizienne ce qui explique la variation de la colonisation des champignons endomycorhiziens dans le système racinaire.



CONCLUSION

CONCLUSION

Les pratiques agroécologiques se focalisent sur la manipulation de la biodiversité aérienne au sein de l'agrosystème. L'introduction des organismes du sol assemblés à des matières organiques fait partie de ces pratiques agroécologiques. Notre étude a consisté à tester, dans une démarche agroécologique, l'effet de l'interaction des matières organiques, des vers de terre et des mycorhizes sur la croissance du riz pluvial.

Notre étude a montré que l'utilisation des différents types de matières organiques a une influence positive sur la croissances du riz représentée par les différentes variables étudiées, à savoir la hauteur, les biomasses aériennes et racinaires, la quantité de phosphore, d'azote et de carbone dans la biomasse aérienne, les indices de végétation ainsi que le taux de mycorhization. La première hypothèse, stipulant que «les amendements organiques auront des effets différents sur la croissance du riz en fonction de leur qualité » est donc validée. La fiente de volaille et le lisier de porc donnent la meilleure croissance des plantes par rapport aux autres matières organiques.

L'effet de vers de terre seules et mycorhizes seuls ont des impacts positifs sur la croissance des plantes. La présence des vers de terre augmente toujours la hauteur et la biomasse. Par contre, la combinaison des deux organismes du sol n'a pas d'influence. D'où, la deuxième hypothèse relatant que « les vers de terre et les mycorhizes, seuls ou ensemble, vont impacter positivement la croissance du riz. » est partiellement vérifiée.

L'interaction entre matières organiques, vers de terre et mycorhize n'offre pas une meilleure croissance du riz. La troisième hypothèse relevant que « les vers de terre et les mycorhizes vont augmenter l'effet fertilisant des matières organiques de moindre qualité en augmentant la croissance du riz. » n'est donc pas vérifiée.

Comme perspectives, afin de mieux percevoir les effets de nos trois facteurs sur la production de biomasse, la nutrition phosphatée et azotée ainsi que le taux de mycorhization il faudrait rallonger la durée de l'expérimentation. A cause de la durée de l'essai qui est très courte (huit semaines), l'analyse des biomasses racinaires n'est pas effectué, les biomasses sont très faibles alors qu'une quantité de 0,5 g de biomasse est nécessaire pour l'analyse de phosphore total. En plus, c'est peut-être dû à la courte durée de l'expérimentation que le taux de mycorhization obtenu est variable. Du coup, les effets des mycorhizes utilisés n'ont pas encore très connus.

Malheureusement, les études effectuées n'étant en mésocosmes que des tests préliminaires, il faudrait mettre en place plusieurs expériences à plus grandes échelles pour

apprécier la réalité de ces résultats. Maîtriser les paramètres clés de l'association des matières organiques, vers de terre et mycorhize serait un atout pour diminuer l'utilisation des engrais minéraux et augmenter la production rizicole à Madagascar.

BIBLIOGRAPHIE

- Bernard**, L. et al. 2012. Endogeic earthworms shape bacterial functional communities and affect organic matter mineralization in a tropical soil. *The ISME journal* 6, 213-222.
- Bhadoria** T. et Saxena K., 2010. Role of Earthworms in Soil Fertility Maintenance through the Production of Biogenic Structures. *Applied and Environmental Soil Science*, 2010, 7 p.
- Blanchart** E., et Jouquet P., 2012. Rôle des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux.
- Boullard** B. Les mycorhizes. Monographie 2. Paris : Masson et Cie, 1968.
- Brown** G.G., Edwards C.A. et Brussaard L., 2004. How earthworms affect plant Growth: burrowing into the mechanisms. In Edwards, C.A. (ed) *Earthworm ecology*. CRC Press, Boca Raton, USA, 13-49.
- Brundrett** M.C., Y. Piché, R.L. Peterson. 1984. A new method for observing the morphology of vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Canadian Journal of Botany*, 62:2128-2134.
- Chapuis-Lardy**, Brossard, M., Lavelle, P., Schouller, E., 1998. Phosphorus transformations in a ferralsol through ingestion by *Pontoscolex corethrurus*, a geophagous earthworm. *European Journal of Soil Biology* 34, 61–67.
- Chapuis-Lardy et al.**, 2011. Role of soil macrofauna in P cycling. In “Phosphorus in Action – Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling”, Bünemann E.K., Oberson A. and Frossard E. (Eds). Springer Soil Biology Series 26, Springer, NY, pp. 199-213. DOI 10.1007/978-3-642-15271-9-8.
- Douglas** JT, Aitken MN, Smith CA. 2003. Effects of five non-agricultural organic wastes on soil composition and on the yield and nitrogen recovery on Italian ryegrass. *Soil Use Man.*, 19: 135-138.
- Duponnois** R, Plenchette C. 2003. A mycorrhiza helper bacterium (MHB) enhances ectomycorrhizal and endomycorrhizal symbiosis of Australian Acacia species. *Mycorrhiza* 13: 85-91
- El-Yazeid** A.A., Abou-Aly H.A., Mady M.A. and Moussa S.A.M. 2007. Enhancing growth, productivity and quality of squash plants using phosphate dissolving microorganisms (bio phosphor) combined with boron foliar spray. *Research Journal Agriculture Biology Sciences* 3 (4): 274-286.
- FAO**, 1980.- les engrais et leur application. FAO, Rome, Italie, 51 p.
- James** S.W., 1991. Soil, nitrogen, phosphorus, and organic-matter processing by earthworms in tallgrass prairie. *Ecology*, 72, 2101-2109.

-
- Laurence J.**, 2014. Les inoculants mycorhiziens pour une agriculture Québécoise plus productive et moins dépendante aux engrais minéraux phosphatés. Maîtrise en Environnement. Université de Sherbrooke 99p.
- Layzell D. B.**, 1990.- N₂ fixation NO₃⁻ reduction and NH₄⁺ assimilation, In : Plant physiology, biochemistry and molecular biology. D.T. Denis and D.H. Teurpin (Eds), Longman scientific & Technical, Singapore, pp 389-413.
- Magnan J.** 2006. Epandage post récolte des engrais organiques et risques environnementaux reliés aux pertes d'azote. Ordre des Agronomes du Québec., p.75.
- Naika S.**, Joep VAN Udt de Jeude, Marja de Goffau, Martin H., Barbara V D., 2005. La culture de la tomate: production, transformation et commercialisation. Ed Fondation Agromisa et CTA, Wageningen, 106p.
- Ouedraogo R.**, Evaluation des effets de la fiente de volaille, du fumier de vache et du fumier de porc sur le flétrissement bactérien de la tomate. Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur du développement rural, juin 2016, 63p
- Plenchette, C.** and Clermont-Dauphin, C., Meynard, J.M., Fortin J. A. 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 65, p. 31-40.
- Plenchette C.** Strullu, D.G., Perrin, R. et Garbaye, J., 1991. « Utilisation des mycorhizes en agriculture et horticulture ». In: *Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées*, 131-179p.
- Rabeharisoa L.** 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences naturelles. 199p.
- Ratsiatosika O.**, 2014. Effets de l'introduction de vers de terre sur la croissance et le rendement du riz et du maïs associé à la dolique sur les Hautes-terres de Madagascar (cas de Lazaina). Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture. 101p.
- Razafindrakoto M.**, 2012. Etude des Oligochètes de Madagascar : Taxonomies, écologies et distributions. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, spécialité : Biologie Animale, 151p.
- Scheu S.**, 2003. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiol*, 47, 846–856.

Sengar S.S., Wade I.J., Baghel S.S., Singh R.K. & Singh G., 2000, Effect of nutrient management on rice in rainfed low land of Southeast Madhya Pradesh. *Indian J. Agron.*, 45, 2, 315-322.

Shrestha S., Brueck H., Asch F. 2012. Chlorophyll index, Photochemical Reflectance Index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. *Journal of Photochemistry and Photobiology Biology* 113: 7-13pp.

Sikora LJ, Szmidt AK, 2001. Nitrogen sources, mineralization rates, and nitrogen nutrition benefits to plants from composts. In *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, Stoffella PJ, Kahn BA (eds). Lewis Publishers: New York, USA; 287-305.

Smith S. E., et Read, D.J. 1997. Mycorrhizal Symbiosis. 2nd edition. San Diego, London: Academic press, 605pp.

Tiwari S.C., Tiwari B.K. et Mishra R.R., 1989. Microbial populations, enzyme activities and nitrogen-phosphorus-potassium enrichment in earthworm casts and in the surrounding soil of a pineapple plantation. *Biol. Fertil. Soils*, 8, 178-182.

Trouvelot A., Kough J. L., et Gianinazzi-Pearson V., 1986. « Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherches et méthode d'estimation ayant une signification fonctionnelle ». In : *Aspects physiologiques et génétiques des mycorhizes*, Dijon, 1985. INRA (éd.), 217-221p.

Tyler G., Olsson T. (2001). Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant & Soil*. 230(2):307-321. *vulgaris L.*) at different levels of phosphorus availability. *Plant Soil* 104, 79-84.

Zamil S.S., Quadir F.Q., Chowdhury M.A.H. & Al Wahid A., 2004, Effects of different animal manures on yield quality and nutrient uptake by mustard cv. Agrani. *BRAC Univ. J.*, 1,2.

Zapats F., Roy R.N. 2004. Le phosphore dans le système sol-plante. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. *Bulletin FAO Engrais et nutrition végétale*.

ANNEXES

LISTES DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Cadre de l'étude.....	I
ANNEXE 2 : Description du <i>Pontoscolex corethrurus</i>	III
ANNEXE 3 : Détermination du taux de mycorhization	IV
ANNEXE 4 : Les cinq paramètres pour déterminer le taux de mycorhization.....	V
ANNEXE 5 : Quantités de matières organiques apportées dans chacun de mésocosme.....	VII
ANNEXE 6 : Compositions chimiques des matières organiques	VIII
ANNEXE 7 : Moyenne et écart-type des variables mesurées en fonction des trois facteurs	VIII

ANNEXE 1 : Cadre de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet **SECURE** (Soil ECological fUnction REstoration) ou « Restauration des fonctions écologiques du sol pour augmenter les services agrosystémiques dans les systèmes rizicoles pluviaux en transition agroécologique ». Ce projet est financé par Agropolis Fondation et a une durée de deux ans et demie (juin 2017- décembre 2019). L'objectif du projet est de fournir des pratiques de restauration des fonctions du sol (SFR) basées sur les connaissances locales et scientifiques, de façon à accroître la performance agronomique, socio-économique et écologique des systèmes agroécologiques, en contexte tropical. Le projet est basé sur un consortium multidisciplinaire localisé à Madagascar. Les participants au projet SECURE sont rattachés à des institutions françaises et malgaches à savoir : l'Université d'Antananarivo (représentée par le LRI et l'ESSA), le FOFIFA, le CIRAD et l'IRD. Deux sites d'étude se différenciant par leur type de sol, leur climat et leurs pratiques agricoles sont considérés: la région d'Imerintsiatosika près d'Antananarivo et le Moyen-Ouest du Vakinankaratra. Les travaux sont divisés en cinq tâches de travail ou Work Package (WP) selon les participants:

WP1: Connaissances des agriculteurs locaux sur la restauration des fonctions des sols (FOFIFA &, Cirad Aida)

WP2 : Connaissances scientifiques sur la restauration des fonctions des sols (FOFIFA, IRD et LRI)

WP3 : Essais sur le terrain de restauration de la fonction des sols (LRI &, Cirad Selmet)

WP4 : Evaluation de la restauration des fonctions des sols (IRD & FOFIFA)

WP5 : Mise en réseau, co-apprentissage et diffusion des connaissances sur la restauration des fonctions des sols (Cirad & Montpellier SupAgro). La présente étude est située dans le WP2, ayant comme site de référence celui d'Imerintsiatosika. Des travaux d'analyses de sols ainsi que des expérimentations soustractives d'éléments nutritifs dans le sol ont été déjà réalisés dans ce WP avant cette expérimentation sur les matières fertilisantes organo-minérales.

ANNEXE 2 : Description du *Pontoscolex corethrurus*

1. Classification

- Phylum : Annelida
- Classe : Clitellata
- Sous-classe : Oligochaeta
- Ordre : Haplotaxida
- Sous-ordre : Lumbricina
- Superfamille : Lumbricoidea
- Famille : Glossoscolecidae
- Genre/espèce : *Pontoscolex corethrurus*

1. Anatomie (d'après Razafindrakoto, 2012)

• **Description** : La longueur varie de 60 mm à 80 mm, mais selon Blakemore (2002), elle peut atteindre jusqu'à 142 mm et même 360 mm selon Stephenson (1931). Le diamètre est de 4 à 6 mm. Le nombre de segments varie entre 166 et 210 et peut présenter des annulations secondaires. Sans pigmentation, les glandes calcifères sont visibles à travers le tégument car elles sont entourées de capillaires sanguins de couleur jaunâtre ou orangé. Le clitellum en forme de selle présente une coloration jaune orangé qui s'étale du segment 15 jusqu'au segment 22. Le vaisseau dorsal est très bien visible.

• **Diagnose** : Soie de type lombricienne, alternée sur la partie postérieure. Système digestif avec gésier sphérique et musculaire sur le segment 6 ; l'intestin débute sur le segment 16, présence de typhosole. Le port mâle se trouve sur l'inter-segment 19/20 mais selon Gates (1972) celui-ci s'observe sur 20/21. Un petit port de spermathèque se trouve sur les intersegments 6/7, 7/8 et 8/9. Le dernier coeur sur le segment 12. Néphridies holoïques. On observe trois paires de spermathèques sur le segment 7 - 9, clitellum en forme de selle sur le segment 15-22, 23.

• **Caractère interne** : Le gésier est musculaire et sphérique ; il s'observe sur le segment 6. Il y a trois paires de glandes calcifères sur les segments 7-9 en position latérale au niveau de l'oesophage. Les dissépiments commencent sur les inter-segments 3/4 jusqu'à 8/9, ceux de 9/10 et 10/11 sont absents. Des bulbes pharyngiens s'observent entre les épais dissépiments 4/5 et 5/6 et 4/5 qui contiennent aussi une touffe de néphridies. Le gésier débute sur celui de 6/7. L'intestin commence sur le segment 16. Le testicule et le canal déférent s'observent sur le segment 11, présence de vésicule séminale en forme de sac sur le segment 12. Prostate absente. On rencontre trois paires de glandes calcifères sur les segments 7-9, en forme de disques aplatis qui s'aplatissent sur un tube transparent sans diverticule.

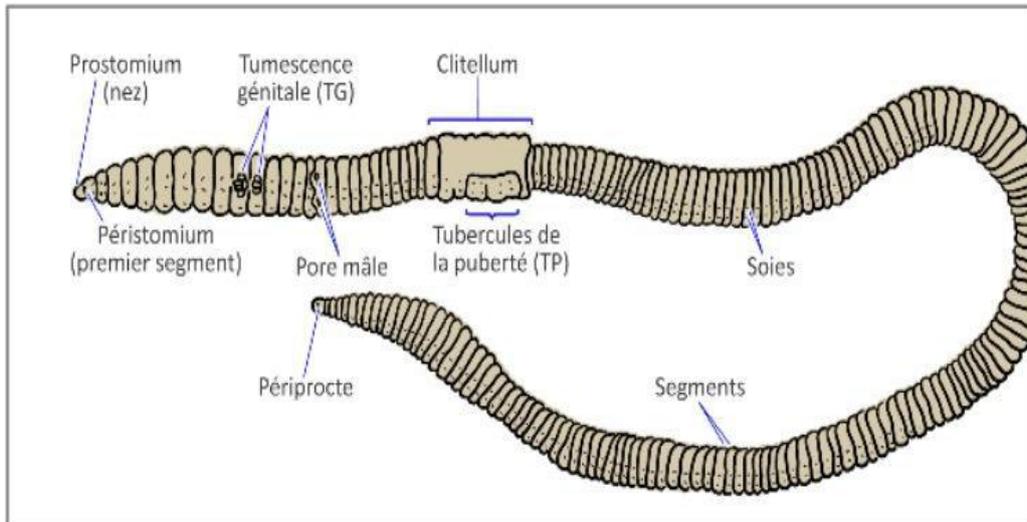


Figure : Morphologie générale des vers de terre

(Source : <https://www.naturewatch.ca/wormwatch/fr/comment-surveiller/anatomie/>)

ANNEXE 3 : Détermination du taux de mycorhization

Mode opératoire

- 1- Egoutter les racines sur un passoir
- 2- Recouvrir les racines avec du KOH 10% et incuber pendant une nuit à température ambiante
- 3- Laver 2 à 3 fois à l'eau courante
- 4- Ajouter l'encre Schaeffer noire 8% et incuber pendant 30 minutes dans un bain marie de 70°C.
- 5- Laisser 2 minutes 2 fois à l'eau vinaigrée (préparée au début)
- 6- Ajouter la solution de décoloration d'acétoglycérol (préparé au début) et laisser agir pendant 30 minutes.
- 7- Laisser 3 fois 5 minutes à l'eau vinaigrée
- 8- Stocker les racines dans un peu d'eau vinaigrée
- 9- Découper des fragments de racines de 1cm et monter parallèlement 10 fragments par lame dans une goutte de glycérol.
- 10- Observer les racines une nuit ou un jour après le montage pour l'amélioration de la lecture
- 11- Estimer le taux de mycorhization selon la notation de l'infection mycorhizienne et la notation de la richesse en arbuscules.

Les réactifs nécessaires pour la coloration des mycorhizes à arbuscules et à vésicules

- KOH 10% (KOH 10 g pour 100 mL d'eau distillée)
- Acétiglycérol (500 mL Glycérol + 50 mL de vinaigre)
- Vinaigre ordinaire (40 mL de vinaigre blanc + 1L d'eau distillée)
- Encre de chine Schaeffer noire 8% (8 mL d'encre + 83 mL de vinaigre + 17mL d'eau distillée)

ANNEXE 4 : Les cinq paramètres pour déterminer le taux de mycorhization

1) Fréquence de la mycorhization (F%)

$$F\% = (\text{Nombre de fragments mycorhizé} / \text{Nombre total}) * 100$$

2) Intensité globale de mycorhization (M%)

$$M\% = (95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / (\text{Nombre total})$$

Où n_5 = Nombre de fragments notés 5

n_4 = Nombre de fragments notés 4

etc ...

3) Intensité de mycorhization des fragments mycorhizés (m%)

$$m\% = M * 100 / F$$

4) Intensité arbusculaire de la partie mycorhizée (a%)

$$a\% = (100m_{A3} + 50m_{A2} + 10m_{A1}) / 100$$

Où m_{A3} , m_{A2} , m_{A1} sont les % de m respectivement affectés des notes A3, A2, A1

Avec, $m_{A3} = ((95n_5A_3 + 70n_4A_3 + 30n_3A_3 + 5n_2A_3 + n_1A_3) / \text{Nb mycorhizé}) * 100 / m$

De même pour A2 et A1.

5) Intensité arbusculaire dans le système racinaire (A%)

$$A\% = a * (M / 100)$$

ANNEXE 5 : Quantités de matières organiques apportées dans chacun de mésocosme

Matières organiques	Quantités (g)
Fumier traditionnel	14,50
Fumier amélioré	14,86
Madacompost	14,43
Corne de zébus	15,46
Poudrette de parc	14,70
Taroka	17,88
Terreau d'Andralanitra	14,14
Vermicompost	18,01
Lisier de porc	20,70
Fiente de volaille	17,49

ANNEXE 6 : Compositions chimiques des matières organiques

Matières organiques	C%	N%	P%	K%	C/N
FuT	19,51	1,46	0,35	3,68	13,36
FuA	21,97	1,69	0,29	1,99	13,02
PP	14,05	1,03	0,16	0,69	13,61
MC	16,62	1,36	0,47	0,53	12,25
TATA	23,13	2,00	0,37	1,71	0,30
TK	7,15	0,41	0,38	0,48	17,45
TA	11,29	0,60	0,37	0,26	18,88
FV	18,72	4,75	3,46	2,75	3,94
LP	29,05	4,64	2,98	1,64	6,26
CZ	46,04	15,50	0,12	0,05	2,97

ANNEXE 7 : Moyenne et écart-type des variables mesurées en fonction des trois facteurs
(matières organiques, vers de terre et mycorhizes)

7.1. Interaction entre les trois facteurs sur la hauteur 54 jours après semis (cm)

Facteurs			
MO*M-*V-	MO*M-*V+	MO*M+*V-	MO*M+*V+
O.M-.V- 29.53 (2,21)	O.M-.V+ 34.16 (4,63)	O.M+.V- 25.42 (2,41)	O.M+.V+ 25,29 (3,94)
FuT.M-.V- 38.25 (3.12)	FuT.M-.V+ 43.96 (2,55)	FuT.M+.V- 38.02 (1,80)	FuT.M+.V+ 40.65 (2,60)
FuA.M-.V- 51.26 (2,54)	FuA.M-.V+ 52.07 (3,91)	FuA.M+.V- 51.10 (2,34)	FuA.M+.V+ 53.61 (2,74)
PP.M-.V- 45.67 (3,79)	PP.M-.V+ 50.60 (2,21)	PP.M+.V- 48.21 (1,93)	PP.M+.V+ 54.23 (0,80)
MC.M-.V- 46.41 (4,15)	MC.M-.V+ 49.17 (1,88)	MC.M+.V- 47.25 (1,44)	MC.M+.V+ 50.33 (0,64)
TATA.M-.V- 43.73 (2,99)	TATA.M-.V+ 49.89 (0,22)	TATA.M+.V- 44.63 (1,87)	TATA.M+.V+ 51.91 (2,09)
TK.M-.V- 42.80 (0,07)	TK.M-.V+ 50.53 (3,32)	TK.M+.V- 44.45 (0,65)	TK.M+.V+ 52.50 (0,43)
TA.M-.V- 41.89 (1,49)	TA.M-.V+ 47.39 (1,84)	TA.M+.V- 43.41 (2,75)	TA.M+.V+ 51.82 (4,34)
FV.M-.V- 52.87 (2,98)	FV.M-.V+ 61.27 (5,95)	FV.M+.V- 53.30 (1,85)	FV.M+.V+ 54.68 (3,01)
LP.M-.V- 49.35 (2,82)	LP.M-.V+ 55.22 (1,31)	LP.M+.V- 56.60 (3,13)	LP.M+.V+ 58.20 (1,38)
CZ.M-.V- 47.19 (3,47)	CZ.M-.V+ 48.96 (2,42)	CZ.M+.V- 47.79 (4,05)	CZ.M+.V+ 51.30 (1,19)

7.2. Interaction entre les trois facteurs sur la nutrition phosphatée (mg)

Facteurs			
MO*M-*V-	MO*M-*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+
O.M-.V- 0.11 (0.03)	O.M-.V+ 0.22 (0.11)	O.M+.V- 0.11 (0.03)	O.M+.V+ 0.28 (0.04)
FuT.M-.V- 0.47 (0.06)	FuT.M-.V+ 0.80 (0.11)	FuT.M+.V- 0.28 (0.05)	FuT.M+.V+ 0.49 (0.14)
FuA.M-.V- 2.81 (0.75)	FuA.M-.V+ 2.90 (0.59)	FuA.M+.V- 2.73 (0.70)	FuA.M+.V+ 3.30 (0.54)
PP.M-.V- 1.12 (0.20)	PP.M-.V+ 1.56 (0.48)	PP.M+.V- 1.14 (0.19)	PP.M+.V+ 1.22 (0.29)
MC.M-.V- 2.52 (0.84)	MC.M-.V+ 3.60 (0.40)	MC.M+.V- 2.33 (0.12)	MC.M+.V+ 3.25 (0.17)
TATA.M-.V- 1.16 (0.18)	TATA.M-.V+ 1.83 (0.21)	TATA.M+.V- 0.94 (0.15)	TATA.M+.V+ 1.53 (0.31)
TK.M-.V- 1.06 (0.25)	TK.M-.V+ 2.72 (1.14)	TK.M+.V- 1.21 (0.05)	TK.M+.V+ 2.32 (0.92)
TA.M-.V- 0.73 (0.21)	TA.M-.V+ 1.82 (0.37)	TA.M+.V- 0.99 (0.14)	TA.M+.V+ 1.86 (0.36)
FV.M-.V- 5.34 (2.12)	FV.M-.V+ 10.31 (2.22)	FV.M+.V- 6.91 (1.22)	FV.M+.V+ 6.61 (1.04)
LP.M-.V- 2.31 (1.06)	LP.M-.V+ 8.29 (3.00)	LP.M+.V- 8.72 (1.46)	LP.M+.V+ 12.79 (1.47)
CZ.M-.V- 1.42 (0.38)	CZ.M-.V+ 1.33 (0.37)	CZ.M+.V- 1.40 (0.64)	CZ.M+.V+ 1.90 (0.46)

7. 3. Interaction entre les trois facteurs sur la nutrition azotée (mg)

Facteurs			
MO*M-*V-	MO*M-*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+
O.M-.V- 0.00 (0.00)	O.M-.V+ 23.34 (3.80)	O.M+.V- 6.97 (0.47)	O.M+.V+ 7.25 (0.29)
FuT.M-.V- 32.76 (1.24)	FuT.M-.V+ 50.41 (2.39)	FuT.M+.V- 16.50 (0.90)	FuT.M+.V+ 37.78 (3.74)
FuA.M-.V- 50.29 (2.89)	FuA.M-.V+ 106.20 (8.73)	FuA.M+.V- 44.27 (2.28)	FuA.M+.V+ 100.61 (2.40)
PP.M-.V- 32.50 (2.03)	PP.M-.V+ 84.50 (5.07)	PP.M+.V- 35.88 (1.05)	PP.M+.V+ 66.23 (5.08)
MC.M-.V- 42.27 (5.72)	MC.M-.V+ 100.79 (4.33)	MC.M+.V- 38.34 (1.62)	MC.M+.V+ 86.57 (3.23)
TATA.M-.V- 28.36 (2.12)	TATA.M-.V+ 56.53 (1.81)	TATA.M+.V- 26.54 (2.32)	TATA.M+.V+ 65.61 (1.41)
TK.M-.V- 34.72 (0.40)	TK.M-.V+ 63.33 (8.41)	TK.M+.V- 31.38 (0.29)	TK.M+.V+ 83.18 (5.61)
TA.M-.V- 22.34 (1.47)	TA.M-.V+ 61.78 (1.24)	TA.M+.V- 22.98 (0.65)	TA.M+.V+ 60.61 (4.24)
FV.M-.V- 87.21 (6.26)	FV.M-.V+ 158.22 (4.16)	FV.M+.V- 73.37 (5.49)	FV.M+.V+ 104.49 (2.88)
LP.M-.V- 48.52 (1.52)	LP.M-.V+ 99.81 (3.23)	LP.M+.V- 73.93 (2.40)	LP.M+.V+ 126.43 (4.27)
CZ.M-.V- 92.23 (4.94)	CZ.M-.V+ 98.02 (4.52)	CZ.M+.V- 104.13 (12.09)	CZ.M+.V+ 141.75 (7.07)

7.4. Interaction entre les trois facteurs sur la production de biomasse (g)

Biomasse aérienne (BA)				Biomasse racinaire (BR)				Biomasse totale (BT)			
MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+	MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+	MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+
O.M.-V-	O.M.-V+	O.M+.V-	O.M+.V+	O.M.-V-	O.M.-V+	O.M+.V-	O.M+.V+	O.M.-V-	O.M.-V+	O.M+.V-	O.M+.V+
0.19 (0.06)	0.33 (0.16)	0.12 (0.03)	0.17 (0.02)	0.10 (0.02)	0.16 (0.05)	0.06 (0.02)	0.11 (0.02)	0.29 (0.08)	0.49 (0.21)	0.18 (0.04)	0.28 (0.02)
FuT.M.-V-	FuT.M.-V+	FuT.M+.V-	FuT.M+.V+	FuT.M.-V-	FuT.M.-V+	FuT.M+.V-	FuT.M+.V+	FuT.M.-V-	FuT.M.-V+	FuT.M+.V-	FuT.M+.V+
0.43 (0.05)	0.64 (0.09)	0.37 (0.06)	0.47 (0.14)	0.24 (0.04)	0.25 (0.01)	0.19 (0.02)	0.18 (0.03)	0.67 (0.09)	0.88 (0.08)	0.56 (0.08)	0.65 (0.15)
FuA.M.-V-	FuA.M.-V+	FuA.M+.V-	FuA.M+.V+	FuA.M.-V-	FuA.M.-V+	FuA.M+.V-	FuA.M+.V+	FuA.M.-V-	FuA.M.-V+	FuA.M+.V-	FuA.M+.V+
1.22 (0.21)	1.72 (0.42)	1.06 (0.16)	1.54 (0.11)	0.52 (0.08)	0.59 (0.26)	0.50 (0.12)	0.58 (0.05)	1.73 (0.28)	2.31 (0.67)	1.56 (0.28)	2.12 (0.10)
PP.M.-V-	PP.M.-V+	PP.M+.V-	PP.M+.V+	PP.M.-V-	PP.M.-V+	PP.M+.V-	PP.M+.V+	PP.M.-V-	PP.M.-V+	PP.M+.V-	PP.M+.V+
0.72 (0.13)	1.04 (0.19)	0.71 (0.06)	1.07 (0.25)	0.30 (0.05)	0.35 (0.10)	0.37 (0.08)	0.35 (0.09)	1.02 (0.19)	1.39 (0.28)	1.08 (0.12)	1.42 (0.33)
MC.M.-V-	MC.M.-V+	MC.M+.V-	MC.M+.V+	MC.M.-V-	MC.M.-V+	MC.M+.V-	MC.M+.V+	MC.M.-V-	MC.M.-V+	MC.M+.V-	MC.M+.V+
0.89 (0.36)	1.48 (0.19)	0.84 (0.11)	1.43 (0.16)	0.45 (0.11)	0.62 (0.10)	0.36 (0.05)	0.58 (0.07)	1.34 (0.47)	2.10 (0.28)	1.20 (0.15)	2.01 (0.09)
TATA.M.-V-	TATA.M.-V+	TATA.M+.V-	TATA.M+.V+	TATA.M.-V-	TATA.M.-V+	TATA.M+.V-	TATA.M+.V+	TATA.M.-V-	TATA.M.-V+	TATA.M+.V-	TATA.M+.V+
0.70 (0.16)	1.05 (0.10)	0.63 (0.17)	1.02 (0.07)	0.41 (0.10)	0.46 (0.08)	0.37 (0.11)	0.45 (0.09)	1.11 (0.25)	1.51 (0.18)	1.00 (0.27)	1.47 (0.11)
TK.M.-V-	TK.M.-V+	TK.M+.V-	TK.M+.V+	TK.M.-V-	TK.M.-V+	TK.M+.V-	TK.M+.V+	TK.M.-V-	TK.M.-V+	TK.M+.V-	TK.M+.V+
0.58 (0.02)	1.17 (0.47)	0.62 (0.02)	1.43 (0.29)	0.39 (0.12)	0.46 (0.17)	0.31 (0.01)	0.55 (0.12)	0.97 (0.10)	1.63 (0.62)	0.93 (0.03)	1.98 (0.39)
TA.M.-V-	TA.M.-V+	TA.M+.V-	TA.M+.V+	TA.M.-V-	TA.M.-V+	TA.M+.V-	TA.M+.V+	TA.M.-V-	TA.M.-V+	TA.M+.V-	TA.M+.V+
0.59 (0.12)	0.97 (0.06)	0.55 (0.05)	1.08 (0.23)	0.27 (0.04)	0.39 (0.06)	0.27 (0.03)	0.48 (0.04)	0.86 (0.15)	1.37 (0.12)	0.81 (0.08)	1.56 (0.25)
FV.M.-V-	FV.M.-V+	FV.M+.V-	FV.M+.V+	FV.M.-V-	FV.M.-V+	FV.M+.V-	FV.M+.V+	FV.M.-V-	FV.M.-V+	FV.M+.V-	FV.M+.V+
1.51 (0.33)	2.52 (0.20)	1.47 (0.33)	1.58 (0.13)	0.68 (0.23)	0.95 (0.21)	0.72 (0.26)	0.65 (0.06)	2.19 (0.55)	3.47 (0.35)	2.19 (0.58)	2.23 (0.18)
LP.M.-V-	LP.M.-V+	LP.M+.V-	LP.M+.V+	LP.M.-V-	LP.M.-V+	LP.M+.V-	LP.M+.V+	LP.M.-V-	LP.M.-V+	LP.M+.V-	LP.M+.V+
1.12 (0.11)	2.01 (0.20)	1.80 (0.17)	2.25 (0.23)	0.48 (0.02)	0.74 (0.12)	0.86 (0.14)	0.87 (0.12)	1.59 (0.12)	2.75 (0.31)	2.66 (0.29)	3.12 (0.32)
CZ.M.-V-	CZ.M.-V+	CZ.M+.V-	CZ.M+.V+	CZ.M.-V-	CZ.M.-V+	CZ.M+.V-	CZ.M+.V+	CZ.M.-V-	CZ.M.-V+	CZ.M+.V-	CZ.M+.V+
0.99 (0.16)	0.86 (0.12)	1.01 (0.35)	1.15 (0.17)	0.37 (0.05)	0.28 (0.05)	0.36 (0.13)	0.32 (0.04)	1.36 (0.17)	1.14 (0.16)	1.36 (0.47)	1.46 (0.21)

7.5. Indice de végétation et SPAD en fonction des trois facteurs

PRI				NDVI				SPAD			
MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+	MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+	MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+
O.M.-V- 0.02 (0.01)	O.M.-V+ 0.06 (0.03)	O.M+.V- 0.02 (0.00)	O.M+.V+ 0.03 (0.02)	O.M.-V- 0.55 (0.08)	O.M.-V+ 0.64 (0.11)	O.M+.V- 0.44 (0.06)	O.M+.V+ 0.48 (0.02)	O.M.-V- 23.80 (1.39)	O.M.-V+ 28.67 (2.37)	O.M+.V- 22.13 (1.95)	O.M+.V+ 25.20 (2.36)
FuT.M.-V- 0.02 (0.01)	FuT.M.-V+ 0.05 (0.02)	FuT.M+.V- 0.02 (0.01)	FuT.M+.V+ 0.05 (0.03)	FuT.M.-V- 0.64 (0.03)	FuT.M.-V+ 0.73 (0.01)	FuT.M+.V- 0.60 (0.04)	FuT.M+.V+ 0.74 (0.03)	FuT.M.-V- 21.27 (1.22)	FuT.M.-V+ 26.97 (4.94)	FuT.M+.V- 22.07 (1.12)	FuT.M+.V+ 28.00 (1.90)
FuA.M.-V- 0.03 (0.01)	FuA.M.-V+ 0.05 (0.02)	FuA.M+.V- 0.02 (0.01)	FuA.M+.V+ 0.05 (0.02)	FuA.M.-V- 0.62 (0.01)	FuA.M.-V+ 0.73 (0.02)	FuA.M+.V- 0.63 (0.03)	FuA.M+.V+ 0.70 (0.02)	FuA.M.-V- 19.37 (1.36)	FuA.M.-V+ 28.50 (1.65)	FuA.M+.V- 23.47 (7.39)	FuA.M+.V+ 26.03 (1.24)
PP.M.-V- 0.02 (0.01)	PP.M.-V+ 0.07 (0.02)	PP.M+.V- 0.04 (0.01)	PP.M+.V+ 0.06 (0.02)	PP.M.-V- 0.62 (0.03)	PP.M.-V+ 0.74 (0.02)	PP.M+.V- 0.65 (0.02)	PP.M+.V+ 0.73 (0.03)	PP.M.-V- 19.10 (1.82)	PP.M.-V+ 29.50 (1.51)	PP.M+.V- 20.27 (0.55)	PP.M+.V+ 28.17 (4.61)
MC.M.-V- 0.02 (0.01)	MC.M.-V+ 0.03 (0.01)	MC.M+.V- 0.03 (0.01)	MC.M+.V+ 0.04 (0.03)	MC.M.-V- 0.62 (0.03)	MC.M.-V+ 0.70 (0.02)	MC.M+.V- 0.61 (0.01)	MC.M+.V+ 0.70 (0.01))	MC.M.-V- 16.57 (3.07)	MC.M.-V+ 26.93 (0.75)	MC.M+.V- 18.53 (0.31)	MC.M+.V+ 25.77 (2.22)
TATA.M- .V- 0.03 (0.01)	TATA.M- .V+ 0.05 (0.01)	TATA.M+ .V- 0.02 (0.01)	TATA.M+ .V+ 0.06 (0.02)	TATA.M- .V- 0.64 (0.01)	TATA.M- .V+ 0.68 (0.06)	TATA.M+ .V- 0.60 (0.03)	TATA.M+ .V+ 0.70 (0.04)	TATA.M- .V- 19.97 (1.93)	TATA.M- .V+ 24.50 (5.06)	TATA.M+ .V- 18.13 (1.87)	TATA.M+ .V+ 27.67 (2.40)
TK.M.-V- 0.03 (0.01)	TK.M.-V+ 0.05 (0.02)	TK.M+.V- 0.02 (0.00)	TK.M+.V+ 0.02 (0.01)	TK.M.-V- 0.59 (0.04)	TK.M.-V+ 0.64 (0.06)	TK.M+.V- 0.50 (0.10)	TK.M+.V+ 0.69 (0.03)	TK.M.-V- 18.60 (3.21)	TK.M.-V+ 22.17 (1.47)	TK.M+.V- 18.17 (3.88)	TK.M+.V+ 24.80 (2.95)
TA.M.-V- 0.02 (0.01)	TA.M.-V+ 0.04 (0.01)	TA.M+.V- 0.02 (0.01)	TA.M+.V+ 0.05 (0.04)	TA.M.-V- 0.62 (0.01)	TA.M.-V+ 0.70 (0.02)	TA.M+.V- 0.59 (0.02)	TA.M+.V+ 0.69 (0.05)	TA.M.-V- 18.57 (1.60)	TA.M.-V+ 24.90 (0.92)	TA.M+.V- 17.33 (0.92)	TA.M+.V+ 24.70 (3.87)
FV.M.-V- 0.04 (0.01)	FV.M.-V+ 0.07 (0.02)	FV.M+.V- 0.04 (0.02)	FV.M+.V+ 0.07 (0.03)	FV.M.-V- 0.71 (0.01)	FV.M.-V+ 0.72 (0.01)	FV.M+.V- 0.67 (0.01)	FV.M+.V+ 0.72 (0.03)	FV.M.-V- 26.17 (0.65)	FV.M.-V+ 26.93 (1.37)	FV.M+.V- 23.07 (2.02)	FV.M+.V+ 26.27 (3.58)
LP.M.-V- 0.03 (0.01)	LP.M.-V+ 0.05 (0.03)	LP.M+.V- 0.03 (0.01)	LP.M+.V+ 0.05 (0.02)	LP.M.-V- 0.58 (0.10)	LP.M.-V+ 0.69 (0.02)	LP.M+.V- 0.64 (0.03)	LP.M+.V+ 0.70 (0.02)	LP.M.-V- 20.67 (1.12)	LP.M.-V+ 28.03 (7.54)	LP.M+.V- 20.30 (0.87)	LP.M+.V+ 25.83 (1.79)
CZ.M.-V- 0.05 (0.01)	CZ.M.-V+ 0.06 (0.02)	CZ.M+.V- 0.06 (0.00)	CZ.M+.V+ 0.07 (0.02)	CZ.M.-V- 0.76 (0.02)	CZ.M.-V+ 0.77 (0.01)	CZ.M+.V- 0.77 (0.01)	CZ.M+.V+ 0.77 (0.01)	CZ.M.-V- 33.13 (1.85)	CZ.M.-V+ 34.00 (2.43)	CZ.M+.V- 29.83 (4.37)	CZ.M+.V+ 35.17 (2.75)

7.6. Taux de mycorhization en fonction des trois facteurs (%)

F%				A%			
MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+	MO*M*V-	MO*M*V+	MO*M+*V-	MO*M*V+
O.M-.V- 41.11 (24.57)	O.M-.V+ 25.56 (8.39)	O.M+.V- 75.56 (25.02)	O.M+.V+ 50.00 (39.30)	O.M-.V- 0.02 (0.02)	O.M-.V+ 0.08 (0.07)	O.M+.V- 1.20 (1.11)	O.M+.V+ 0.25 (0.32)
FuT.M-.V- 25.56 (28.74)	FuT.M-.V+ 30.00 (27.28)	FuT.M+.V- 28.89 (25.89)	FuT.M+.V+ 18.89 (6.94)	FuT.M-.V- 0.18 (0.31)	FuT.M-.V+ 0.10 (0.17)	FuT.M+.V- 0.01 (0.01)	FuT.M+.V+ 0.03 (0.03)
FuA.M-.V- 8.89 (8.39)	FuA.M-.V+ 6.67 (5.77)	FuA.M+.V- 23.33 (12.02)	FuA.M+.V+ 5.55 (6.94)	FuA.M-.V- 0.00 (0.00)	FuA.M-.V+ 0.00 (0.00))	FuA.M+.V- 0.00 (0.01)	FuA.M+.V+ 0.00 (0.00)
PP.M-.V- 7.78 (8.39)	PP.M-.V+ 8.89 (6.94)	PP.M+.V- 32.22 (47.18)	PP.M+.V+ 57.78 (40.18)	PP.M-.V- 0.00 (0.00)	PP.M-.V+ 0.00 (0.00)	PP.M+.V- 0.29 (0.49)	PP.M+.V+ 0.39 (0.39)
MC.M-.V- 5.56 (5.09)	MC.M-.V+ 25.56 (21.43)	MC.M+.V- 13.33 (8.82)	MC.M+.V+ 47.78 (42.47)	MC.M-.V- 0.00 (0.00)	MC.M-.V+ 0.02 (0.03)	MC.M+.V- 0.01 (0.01)	MC.M+.V+ 0.42 (0.72)
TATA.M-.V- 7.78 (10.72)	TATA.M-.V+ 12.22 (6.94)	TATA.M+.V- 73.33 (29.63)	TATA.M+.V+ 32.22 (27.96)	TATA.M-.V- 0.05 (0.08)	TATA.M-.V+ 0.01 (0.01)	TATA.M+.V- 1.80 (2.39)	TATA.M+.V+ 0.02 (0.02)
TK.M-.V- 22.22 (26.94)	TK.M-.V+ 20.00 (23.34)	TK.M+.V- 47.78 (33.39)	TK.M+.V+ 20.00 (26.03)	TK.M-.V- 0.03 (0.06)	TK.M-.V+ 0.00 (0.01)	TK.M+.V- 1.14 (1.16)	TK.M+.V+ 0.03 (0.05)
TA.M-.V- 14.44 (13.88)	TA.M-.V+ 10.00 (3.33)	TA.M+.V- 56.67 (37.56)	TA.M+.V+ 50.00 (47.02)	TA.M-.V- 0.01 (0.02)	TA.M-.V+ 0.01 (0.01)	TA.M+.V- 0.91 (1.52)	TA.M+.V+ 0.29 (0.49)
FV.M-.V- 10.00 (3.33)	FV.M-.V+ 33.33 (30.00)	FV.M+.V- 68.89 (48.12)	FV.M+.V+ 42.22 (25.46)	FV.M-.V- 0.00 (0.00)	FV.M-.V+ 0.02 (0.02)	FV.M+.V- 1.37 (1.18)	FV.M+.V+ 0.00 (0.00)
LP.M-.V- 20.00 (6.67)	LP.M-.V+ 6.67 (3.34)	LP.M+.V- 21.11 (5.09)	LP.M+.V+ 45.55 (49.48)	LP.M-.V- 0.17 (0.29)	LP.M-.V+ 0.00 (0.00)	LP.M+.V- 0.01 (0.01)	LP.M+.V+ 0.22 (0.37)
CZ.M-.V- 27.78 (11.70)	CZ.M-.V+ 12.22 (21.17)	CZ.M+.V- 76.67 (12.02)	CZ.M+.V+ 67.78 (41.41)	CZ.M-.V- 0.02 (0.02)	CZ.M-.V+ 0.17 (0.29)	CZ.M+.V- 0.61 (0.52)	CZ.M+.V+ 0.27 (0.34)

Légende :



Valeur moyenne minimale de chaque variable mesurée



Valeur moyenne maximale de chaque variable mesurée