



AGRICULTURE TROPICALE &
DEVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES
AGRONOMIQUES

Mention : Agriculture Tropicale & Développement Durable
Parcours : Biofonctionnement du sol et environnement

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'Ingénieur Agronome au
grade de Master II

Essai sur les pratiques de restauration des
fonctions écologiques du sol sous riz pluvial
dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra

Présenté par **BEN NAAMANE Christina Kelly**

Promotion : **VAHINALA (2014-2019)**

Soutenu le 24/06/19 devant le jury composé de :

Président	: Docteur RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa
Examineur	: Monsieur RANDRIAMIHANTA Tiana Herimanana
Maître de stage	: Docteur SALGADO Paulo (HDR)
Encadrant professionnel	: Docteur AUTFRAY Patrice
Tuteur	: Docteur RAZAFINDRAMANANA Norosoa Christine
Co-encadrant	: Docteur RATSIATOSIKA Hasinahary Onja

***Je dédie ce mémoire à ma mère, la seule
qui a toujours été là.***

Remerciements

Ce mémoire représente l'aboutissement de ces cinq années d'études passées à l'ESSA. Néanmoins, je ne saurais m'attribuer tout le mérite de sa concrétisation. En effet, de nombreuses personnes ont témoigné leurs participations effectives et il me semble légitime de les mentionner. En premier lieu, la première reconnaissance vient à Dieu Tout Puissant sans qui rien n'aurait pu être réalisé. J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury, à l'encontre de :

- ✚ Docteur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA, qui nous a fait l'honneur de présider le jury au cours de la soutenance de mémoire, malgré toutes les charges qui lui incombent ;
- ✚ Monsieur Tiana Herimanana RANDRIAMIHANTA, l'examineur de ce mémoire, qui a accepté de mettre au service son expertise au cours de la soutenance de ce mémoire ;
- ✚ Docteur Paulo SALGADO (HDR), chercheur au sein du CIRAD, mon Maître de stage qui a su me guider et me transmettre son savoir tout au long du stage et de la rédaction du présent mémoire ;
- ✚ Docteur Patrice AUTFRAY, mon encadrant professionnel qui m'a apporté son expertise et son aide tout au long du stage ;
- ✚ Docteur Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA, mon tuteur au cours de ce stage de fin d'études qui a su me guider judicieusement jusqu'à la finalisation de mon mémoire ;
- ✚ Docteur Onja Hasinahary RATSIATOSIKA, mon co-encadrant durant ce stage, mais également un guide précieux dans les travaux et mesures effectués sur le terrain.

Bien qu'elles ne soient pas parmi les membres du jury, certaines personnes ont contribué considérablement à la réussite du stage ainsi qu'à la finalisation du mémoire. Mes profondes reconnaissances vont ainsi à l'endroit de :

- ✚ La fondation Agropolis, le premier partenaire financier du projet SECuRE, qui a permis la réalisation du stage de fin d'étude ;
- ✚ Professeur Bruno Ramamonjisoa, Directeur de l'Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques ;
- ✚ Professeur Tantely RAZAFIMBELO, Directrice du Laboratoire des RadioIsotopes dans lequel se sont réalisées de nombreuses analyses relatives à mon stage ;
- ✚ Docteur Malaladiana RAZAFINDRAKOTO, Chercheur au Laboratoire des RadioIsotopes, qui a été d'une aide précieuse dans les travaux de terrain et des analyses au laboratoire ;
- ✚ Docteur Richard RANDRIAMANANTSOA et Docteur Bodovololona RABARY, chercheurs au FOFIFA Antsirabe, pour leur collaboration fructueuse durant ce stage ;
- ✚ Docteur Bertrand MULLER, chercheur au sein du CIRAD Antsirabe, qui a dû faire face à mes nombreuses questions ;

- ✚ Mademoiselle Miora Naliharilala RAKOTOARIVELO NJARAMANANA, qui m'a beaucoup aidé surtout durant les premiers mois de mon stage ;
- ✚ Les techniciens et toute l'équipe sur le terrain qui ont été indispensables pour la réalisation des travaux de terrain ;
- ✚ Tous les enseignants et les PAT de l'AT2D ainsi que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Il est d'usage de les citer en dernier, sans toutefois les oublier, les personnes qui ont été présentes bien avant le stage, et qui m'ont épaulé pendant mon parcours académique. Il s'agit bien sûr de ma famille, que je ne saurais oublier de remercier. Particulièrement, mes remerciements vont à ma mère qui a toujours été présente et qui a cru en moi. Mon frère et ma sœur et mon père ne sont pas non plus à négliger. Je tiens aussi à citer ma grand-mère qui m'a toujours poussée à aller plus loin. La grande famille a été présente également pour me soutenir à un moment où j'étais loin de chez moi. À eux tous, j'adresse mes vifs remerciements.

Et bien sûr, il ne serait pas envisageable d'oublier toutes ces personnes qui ont rendu mes années à l'ESSA très agréables. Je parle de mes amis et camarades de la promotion VAHINALA, en particulier des étudiants de l'AT2D VAHINALA.

A tous, je vous fais part de mes sincères remerciements.

Christina Kelly BEN NAAMANE

Sommaire

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 : MATERIELS ET METHODES	3
1.1. Présentation de la zone d'étude	3
1.2. Dispositif expérimental.....	4
1.3. Opérations culturales	8
1.3.1 Préparation du sol.....	8
1.3.2 Semis	8
1.3.3 Entretien des cultures	9
1.4 Mesures effectuées.....	9
1.3 Traitements statistiques.....	12
Chapitre 2 : RESULTATS.....	13
2.1. Les descripteurs écologiques du sol.....	13
2.2. Les performances agronomiques du riz	17
2.3. Impacts de l'inoculation de vers de terre sur les performances écologiques et agronomiques des traitements SFR.....	22
2.4. Corrélation entre les performances écologiques et les performances agronomiques	25
Chapitre 3 : DISCUSSION ET RECOMMANDATION	29
3.1. Impacts des traitements SFR sur les descripteurs écologiques du sol	29
3.2. Impacts des traitements SFR sur les performances agronomiques du riz.....	31
3.3. Effet de l'introduction de mutualistes sur les performances écologiques et agronomiques des pratiques SFR	33
3.4. Corrélation des indicateurs des performances agronomiques avec les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol	36
3.5. Recommandations et perspectives	36
CONCLUSION	39

Liste des illustrations

Liste des figures

Figure 1. Localisation du site expérimental d'Ivory.....	3
Figure 2. Diagramme ombrothermique du Fokontany d'Ivory dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra.....	4
Figure 3. Plan du site expérimental	5
Figure 4. Taux d'humidité du sol au niveau de l'horizon 10-20 cm	14
Figure 5. Mesure de pH du sol en fonction des traitements	15
Figure 6. Densité de la macrofaune auxiliaire aux cultures en fonction des traitements	16
Figure 7. Hauteur moyenne des plants de riz en fonction des SFR, mesurée 73 jours après le semis	18
Figure 8. Poids des adventices en g de MS m ⁻² au cours du premier sarclage	19
Figure 9. Poids des adventices en g de MS m ⁻² au cours du second sarclage	19
Figure 10. Variations des mesures SPAD en fonction des traitements	20
Figure 11. Rendement grains en MS en fonction des traitements	21
Figure 12. Variations des rendements en paille en fonction des traitements	22
Figure 13. Densité de <i>P. corethrurus</i> en fonction des traitements	23
Figure 14. Évolution du pH durant les deux années d'expérimentation	24
Figure 15. Différence de rendements en grains entre les deux années d'expérimentation	24
Figure 16. Différence de rendement en paille entre les deux années d'expérimentation.....	25
Figure 17. Cercle de corrélation entre les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol avec les performances agronomiques (Figure 17a) et projection sur le plan factoriel 1-2 des traitements SFR testés (Figure 17b)	27
Figure 18. Comparaison des performances des SFR retenus, au niveau des performances agronomiques (Figure 18a) et au niveau des propriétés du sol (Figure 18b)..	37

Liste des tableaux

Tableau 1. Constituants des matières organiques et minérales utilisées	7
Tableau 2. Caractéristiques chimiques des matières organiques et minérales utilisées	7
Tableau 3. Densité apparente au niveau des horizons de sol pour chaque traitement.....	14
Tableau 4. Densité de <i>Pontoscolex corethrurus</i> en fonction des horizons de sols dans les parcelles inoculées.....	23
Tableau 5. Augmentation du rendement en grains de l'année 2 comparé à l'année 1	25
Tableau 6. Contributions des variables aux axes.....	26

Liste des clichés

Cliché 1. Enrobage des semences avec la poudre de spores mycorhiziens	8
Cliché 2. Inoculation de vers de terre	9
Cliché 3. Mesure de la densité apparente du sol par la méthode du cylindre.....	10
Cliché 4. Appareil SPAD	11

Liste des abréviations

- **A** : Argile
- **ACP** : Analyse en Composantes Principales
- **ADF** : *Acid Detergent Fiber*
- **ADL** : *Acid Detergent Lignin*
- **ANOVA** : Analyse de la variance
- **CB** : Cellulose Brute
- **CDR** : Composantes De Rendement
- **CEC** : Capacité d'Échange Cationique
- **CO** : Carbone Organique
- **CT** : Cellulose Totale
- **DA** : Densité Apparente
- **DMS** : Digestibilité de la Matière Sèche
- **dP SPAD** : Dispositif de recherche et d'enseignement en Partenariat sur les Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité
- **H** : Hauteur
- **LF** : Limon Fin
- **LG** : Limon Grossier
- **LRI** : Laboratoire des RadioIsotopes
- **MAT** : Matière Azotée Totale
- **N tot** : Azote total
- **NDF** : *Neutral Detergent Fiber*
- **ODD** : Objectifs de Développement Durable
- **P** : Phosphore
- **SECuRE** : *Soil ECological function REstoration to enhance agrosystem services in rainfed rice cropping systems in agroecological transition-*
- **SF** : Sable Fin
- **SFR** : *Soil Function Restoration*
- **SG** : Sable Grossier
- **SPAD** : *Soil and Plant Analysis Development*
- **VdT** : Vers de terre
- **WP** : *Work Package*

Glossaire

- **Biote** : désigne tous les êtres vivants (plantes, animaux, champignons et autres) qui font partie d'un biotope donnée (région donnée ou habitat spécifique).
- **Complexe argilo-humique** : structure formé d'argile et d'humus qui sont tous les deux chargés négativement, ce qui les permettent de retenir les cations essentiels à la plante. Des échanges de cations ont lieu entre le complexe argilo-humique et la solution du sol : il s'agit de la capacité d'échange cationique (CEC). Plus celle-ci est élevé, moins les cations seront lessivés.
- **Densité apparente** : masse par unité de volume apparent de sol (volume réel de terre + volume de l'espace poreux). Contrairement à la densité réelle, la densité apparente varie avec le tassement et l'état structural du sol.
- **Epirhize** : qui croit sur les racines et y vit en parasite
- **Humus** : partie stable de la matière organique, qui est donc peu sujette à la minéralisation mais participe surtout à la structuration du sol.
- **Lessivage** : transport d'éléments par l'eau en direction de la nappe phréatique.
- **Lixiviation** : perte de nutriments végétaux hydrosolubles du sol qui sont dissouts et entraînés par les eaux d'infiltration.
- **pH eau** : correspond au potentiel hydrogène du sol en ions H^+ en suspension dans la solution du sol. Il s'agit du pH réel, qui est différent du pH potentiel du sol qui correspond à la quantité d'ions H^+ qui sont liés au complexe argilo-humique.
- **Placette** : point prédéfini sur un plan qui correspondent à un endroit précis de la parcelle élémentaire.
- **Triangle de texture** : figure géométrique permettant de définir la texture d'un sol en fonction de sa proportion en limon, argile et en sable.

— **Volatilisation**

: perte d'éléments nutritifs ou d'autres substances dans l'atmosphère sous une forme gazeuse.

RESUME

Face à l'imminence d'assurer la sécurité alimentaire dans le cadre des Objectifs de Développement Durable (ODD), l'agroécologie se présente comme un moyen pour atteindre cet objectif. La restauration des fonctions écologiques des sols est ainsi devenue primordiale. C'est pourquoi l'essai qui a été effectué se focalise sur cette restauration des fonctions écologiques du sol en testant différentes pratiques afin de déterminer lesquelles sont les plus performantes d'un point de vue écologique mais aussi agronomique. Cet essai s'est déroulé dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra sur le dispositif expérimental d'Ivory avec le riz pluvial comme culture. Vingt-deux traitements ont été testés avec quatre répétitions. Le paramètre étudié a été le type et la quantité d'amendements apportés. D'autres paramètres ont également été pris en considération tels que l'introduction de mutualistes sur certains traitements et l'année de culture des parcelles. Des mesures ont été effectuées au cours du cycle cultural que ce soit au niveau des descripteurs écologiques ou des descripteurs agronomiques. L'étude a pu démontrer que le pH est le principal descripteur écologique affecté par les amendements apportés. Le fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ ainsi que les assemblages organiques à base de fumier traditionnel, compost et lombricompost avec apport d'engrais minéraux sont les pratiques qui ont permis la meilleure augmentation de pH du sol. Concernant les descripteurs agronomiques, la plupart de ces descripteurs tels que le rendement en grains et en paille, la hauteur, la colonisation par les adventices ont été affecté par les amendements organiques mais aussi par la modification du pH du sol et par l'introduction de mutualistes. Ainsi les traitements les plus performants d'un point de vue écologique sont également performants d'un point de vue agronomique. Pour le cas de l'inoculation de vers de terre qui a été effectuée, la survie de l'espèce au sein des parcelles a été vérifiée et la densité de *Pontoscolex corethrurus* au niveau des parcelles a permis d'influencer positivement les performances agronomiques et écologiques des traitements. En effet, les traitements qui se sont avérés les plus performants au cours de cet essai sont les traitements à base de fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ ainsi que les traitements à base d'assemblages organiques de fumier traditionnel, compost et lombricompost à 2 t MS ha⁻¹ chacun ; ce sont également des traitements qui ont bénéficié de l'introduction de mutualistes. Cependant, parmi ces traitements performants, la pratique à base de fumier amélioré est celle qui démontre de loin le meilleur rendement. Les recherches futures devraient donc s'orienter vers une plus grande valorisation de cet intrant.

Mots clés : amendements organiques, *Pontoscolex corethrurus*, pH, densité apparente, performances écologiques, macrofaune

ABSTRACT

Faced with the imminence of ensuring food security in the context of the Sustainable Development Goals (SDGs), agroecology is a mean to achieve this goal. The restoration of soil ecological functions is essential. This is why this experiment focuses on this restoration of the ecological functions of the soil by testing different practices in order to determine which are the most efficient to restore ecological and agronomic performances. This trial was conducted in the Middle West of Vakinankaratra on Ivory's experimental site dedicated to rainfed rice cultivation. Twenty-two treatments were tested with four repetitions. The type and quantity of amendments are studied. Other parameters are also considered such as inoculation of earthworms and the year of cultivation. Measurements were made during the cropping cycle at the level of ecological descriptors or agronomic descriptors. The study was able to demonstrate that pH is the main ecological descriptor affected by the amendments. Improved manure to 6 t DM ha⁻¹ as well as organic assemblages based on traditional manure, compost and vermicompost with the addition of mineral fertilizers were the practices that allowed the best increase in soil pH. Regarding the agronomic descriptors, most of these descriptors such as grain and straw yield, height, and weed colonization were affected by the organic amendments but also by the modification of the soil pH. The most effective treatments on agronomic descriptors are the same treatments that have been effective at the level of ecological descriptors. In the case of the inoculation of earthworms, the survival of the species within the plots was verified. The density of *Pontoscolex corethrurus* at the plot influence positively the agronomic and ecologic performances of the treatments. In fact, treatments that proved to be the most effective during this trial were improved manure treatments at 6 t DM ha⁻¹ as well as treatments based on organic assemblages of traditional manure, compost and vermicompost; these are also treatments that have benefited from the inoculation of earthworms. However, among these successful treatments, improved manure-based practice is the one that demonstrates by far the best yield. Future research should therefore be oriented towards a higher valuation of this input.

Keywords: organic amendments, *Pontoscolex corethrurus*, pH, apparent density, ecological performance, macrofauna

FINTINA

Ankehitriny, mila mikiry mafy dia mafy mba hanatratrana ny fahampiana sy ny fanjarian-tsakafy. Izany dia ao anaty tanjona momban'ny fampandrosoana maharitra. Tsy maintsy miezaka mba hamerenana ny fiasan'ny tany eo amin'ny lafiny ekolojika. Noho izany, nisy andrana natao teo amin'ny lafin'io famerenana ny fiasan'ny tany eo amin'ny lafiny ekolojika io. Nanandrana karazana fomba fanao maromaro mba hamantarana hoe iza amin'ireny no tena mahavoa indrindra eo amin'ny lafiny ekolojika nefa koa eo amin'ny lafin'ny famokarana. Ity andrana ity dia natao tao amin'ny faritry Vakinankaratra tao Ivory. Roa amby roapolo ny isan'ny fomba fanao nandramana tamin'izany teo anivon'ny vary an-tanety. Ny masontsivana voalohany dia ny karazan-jejika sy ny habetsahany. Nefa koa, nijery ny fiantraikan'ny fampidirana kankana teo anivon'ny tany ary ny fiantraikan'ny taom-pambolena. Nisy fandrefesana maro natao teo anivon'ireny andrana ireny ary ireny dia nahafahana nilaza fa ny karazan-jejika nampiasaina dia tena niantraika tokoa teo anivon'ny pH an'ny tany. Ny zezika nohatsaraina 6 t LM ha⁻¹ no tena nanome vokatra tsara indrindra raha ny pH no jerena. Nefa koa ny fiangonana zezika organika tahaky ny zezi-pahitra, ny kaompositra ary ny zezika kankana no anisan'ny nahafa-po ihany koa. Raha ny lafiny famokarana no jerena, ny zezika nampiasaina dia tena niantraika tamin'ny voka-bary sy ny mololo ary ny firoboroboan'ny ahi-dratsy sy ny hahavon'ny vary. Mitovy ihany ireo zezika mahavita mamokatra ambony sy ny zezika nentina nanatsarana ny tany. Ny fampidirana kankana *Pontoscolex corethrurus* dia nisy fiantraikany tsara ihany koa teo amin'ny vokatra azo sy teo amin'ny fiasan'ny tany ara-ekolojika. Noho izany, ny zezika nohatsaraina 6 t LM ha⁻¹sy ny fiangonana zezika organika tahaky ny zezi-pahitra, ny kaompositra ary ny zezika kankana no nahafa-po indrindra nandritran'ity andrana ity. Ireny ihany koa no anisan'ny nampidirana kankana nandritry ny andrana. Nefa koa ny zezika nohatsaraina no azo lazaina fa tsara indrindra tamin'ireo. Noho izany, tokony hanome lanja kokoa an'ito zezika ito ny fikarohana manaraka ho atao.

Teny mivohitra : zezika organika, *Pontoscolex corethrurus*, pH, fifatrarany tany, fahatsarana ara-ekolojika, bibikely

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Dans le cadre des objectifs de développement durable (ODD), de nombreux challenges sont lancés, notamment dans le domaine de l'agriculture. En effet, celle-ci doit permettre d'assurer la sécurité alimentaire mais aussi de réduire les impacts négatifs des activités agricoles sur l'environnement (FAO, 2015). Afin d'atteindre ces ODD, la pratique de l'agroécologie se manifeste comme étant le moyen le plus approprié. En effet, les systèmes inspirés de l'agroécologie sont nombreux pour n'en citer que l'association et la rotation culturale, l'utilisation de fertilisants organiques au niveau des sols, l'agroforesterie ou encore l'intégration agriculture-élevage (Altieri, 1986 ; Dufumier, 2009 ; Dufumier, 2010). De plus, l'optimisation des fonctions écologiques des sols entre dans le cadre de l'agroécologie qui consiste à s'appuyer davantage sur les fonctions naturelles, les interactions biotiques et les processus écologiques (Altieri, 1995 ; Barrios, 2007). Ces systèmes agroécologiques tendent ainsi à promouvoir la durabilité de l'agriculture de façon à répondre aux besoins alimentaires et d'existence des populations tout en limitant les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement et les ressources naturelles (Nahal, 1998).

Cependant, l'optimisation des fonctions écologiques des sols est d'une importance fondamentale pour réintégrer la durabilité en agriculture (Coleman, 2015). En effet, les fonctions écologiques des sols jouent un rôle clé dans les performances des systèmes agroécologiques (Altieri, 1999 ; Bender et Beller, 2016). Il est largement reconnu que les quatre grandes fonctions écologiques du sol dont (i) la dynamique de la matière organique, (ii) le recyclage des nutriments, (iii) le maintien de la structure du sol et (iv) la régulation des bioagresseurs, ont des impacts positifs sur les fonctions de la plante comme l'absorption au niveau des racines, la respiration, la photosynthèse, etc. (Lavelle *et al.*, 1997 ; Brussaard *et al.*, 2007 ; Kibblewhite *et al.*, 2008). L'optimisation des fonctions écologiques des sols peut être réalisée de deux façons : (i) soit indirectement en améliorant le sol en tant qu'habitat du biote du sol, (ii) soit directement par l'inoculation des organismes du sol. Étant donné que l'inoculation des organismes du sol semble difficile sans une restauration préalable de l'habitat du sol (Lavelle *et al.*, 2001 ; Thuita *et al.*, 2011), il est nécessaire de restaurer l'environnement abiotique du sol via l'adoption de pratiques fournissant de l'énergie aux organismes du sol (Lavelle *et al.*, 2001).

C'est dans cette optique que la présente étude a été conduite afin de tester différentes pratiques (SFR) sur les performances écologiques du sol mais également sur les performances agronomiques dans un contexte tropical. L'essai a été mis en place dans les Hautes Terres de Madagascar, en particulier dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra. Ce choix a été orienté par le fait que les sols de cette région, notamment les sols sur les collines ou « *tanety* », sont principalement dominés par des sols ferrallitiques pauvres en nutriments (Randriamanantsoa *et al.*, 2003). Il s'agit de sols profonds (Bourgeat et Aubert, 1972), peu fertiles, fragiles et facilement sujets à des dégradations. Dans le Vakinankaratra, ces sols sont essentiellement exploités par les agriculteurs pour la

riziculture pluviale, le maïs, le manioc et des légumineuses à grains. La spéculon choisie pour cette étude est le riz pluvial de par l'intérêt accordé à cette culture par les agriculteurs. De plus des enquêtes réalisées lors de la saison culturale 2016-2017 par le projet SECuRE ont démontré qu'en moyenne 15% de la surface d'une exploitation agricole dans le Moyen-Ouest du Vakinankarata est dédiée au riz pluvial. Ainsi, pour assurer la durabilité de la production de la riziculture pluviale, il est capital de restaurer les fonctions écologiques du sol. La question de recherche qui s'est posée est la suivante : *Quelles sont les pratiques de restauration des fonctions écologiques du sol qui optimisent les performances écologiques et agronomiques du riz pluvial ?*

L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer les performances écologiques et agronomiques de plusieurs pratiques de restauration des fonctions du sol (SFR) dans un système de riziculture pluviale. Pour atteindre cet objectif principal, trois sous-objectifs ont été lancés :

- Déterminer l'effet des pratiques SFR sur les descripteurs écologiques du sol ;
- Mesurer l'effet des pratiques SFR sur les descripteurs agronomiques ;
- Étudier l'impact de l'inoculation des mutualistes sol-plante sur les performances écologiques et agronomiques des pratiques SFR

Trois hypothèses relatives à cette question ont été émises :

- ✓ **Hypothèse 1** : les amendements à fortes doses et les assemblages d'amendements organiques ont un effet positif plus important sur les descripteurs écologiques du sol ;
- ✓ **Hypothèse 2** : les amendements organo-minéraux permettent d'améliorer les performances agronomiques ;
- ✓ **Hypothèse 3** : l'introduction des mutualistes conduit à des effets synergiques avec les amendements organiques et/ou minéraux et améliore les performances agronomiques et écologiques du système de production.

En termes d'organisation, le présent mémoire s'articule en trois principaux chapitres :

Chapitre 1 : Matériels et méthodes

Chapitre 2 : Résultats

Chapitre 3 : Discussion et recommandations

MATERIELS ET METHODES

Chapitre 1 : MATERIELS ET METHODES

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Localisation

La présente étude a été conduite dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra, dans le district de Mandoto au niveau du Fokontany d'Ivory (Figure 1). Plus précisément, le site d'expérimentation d'Ivory présente les coordonnées géographiques suivantes : $19^{\circ}33'03''\text{S}$ et $46^{\circ}24'37''\text{E}$, avec une altitude de 908 m.

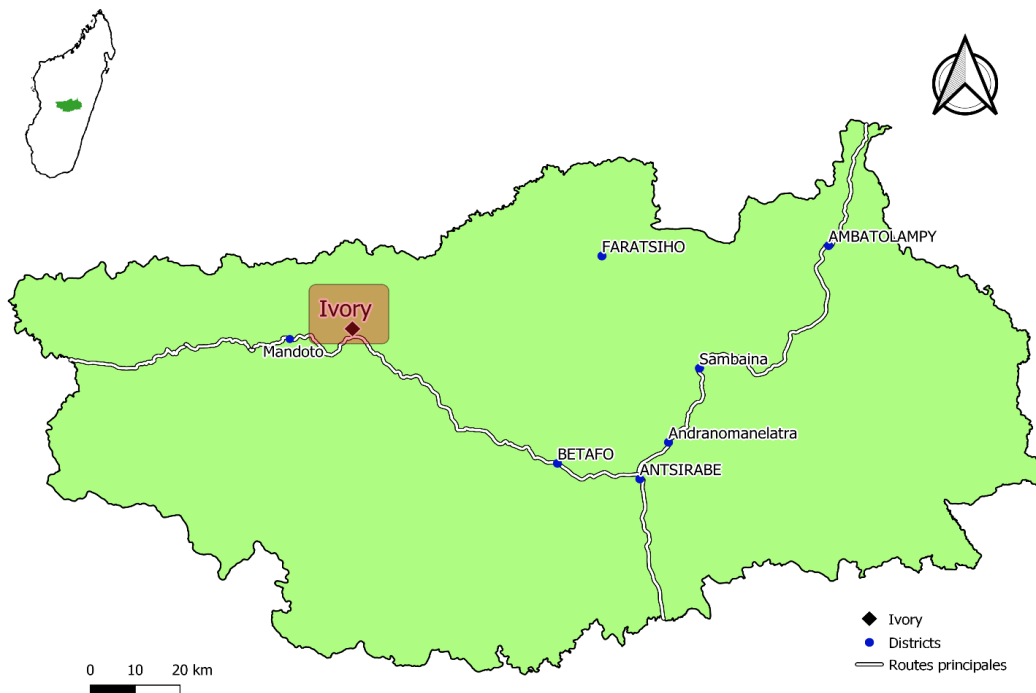


Figure 1. Localisation du site expérimental d'Ivory

1.1.2. Climat

Le climat d'Ivory se caractérise principalement par deux saisons bien distinctes selon le diagramme ombrothermique du site : (i) une saison sèche d'avril à octobre et (ii) une saison humide de novembre à mars (Figure 2). Ce diagramme a été élaboré à partir des données climatiques collectées sur une période de dix ans (2007 à 2017 ; Annexe 1) sur la station météorologique du site expérimental. Annuellement, les précipitations de la zone atteignent un cumul de 1 300 mm. Quant à la température, elle est de l'ordre de 25°C en moyenne au cours de l'année.

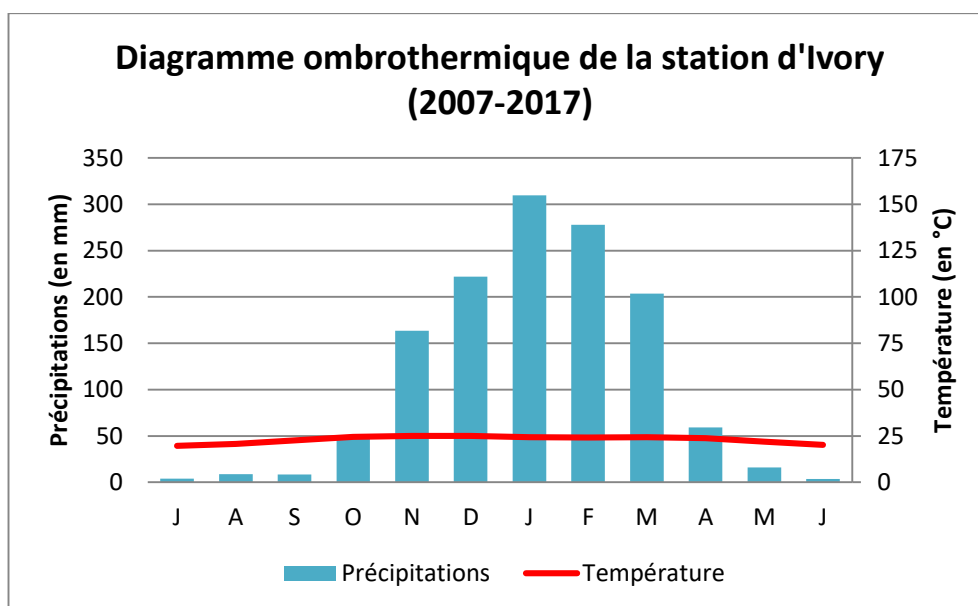


Figure 2. Diagramme ombrothermique du Fokontany d'Ivory dans le Moyen-Ouest du Vakinankaratra

1.1.3. Sols

Le sol du site expérimental d'Ivory est un Ferralsol à limon argileux. Selon les analyses effectuées au début de l'essai, les résultats montrent que les sols (profondeur 0-10 cm) sont fortement acides, avec un pH eau de 4,8. La teneur en P assimilable est faible, de l'ordre de $3,86 \text{ mg kg}^{-1}$, tandis que les valeurs du carbone et de l'azote du sol sont respectivement de $15,22 \text{ g kg}^{-1}$ et de $1,53 \text{ g kg}^{-1}$. La valeur en CEC de ce sol est elle aussi faible : $1,49 \text{ cmol kg}^{-1}$. Le rapport C/N du sol du site est de 9,94. Cette valeur est légèrement inférieure à 10. Et, il s'agit d'un sol à texture limono-argilo-sableuse (cf. Annexe 2).

1.2. Dispositif expérimental

1.2.1. Historique des parcelles

Avant l'installation du dispositif expérimental par le projet SECuRE en 2017, le site expérimental était en jachère depuis cinq ans. Ce terrain été choisi car la végétation de graminées présentes était bien développée, avec une forte densité de touffes, sans traces de ruissellement visibles. Lors de la première saison culturale (2017-2018), les travaux ont été exclusivement axés sur la restauration de l'habitat du sol avec des pratiques SFR basées sur des amendements organiques et/ou minéraux. Cela a permis de tester l'effet de la restauration de l'habitat du sol avant inoculation. Pour cette deuxième année de culture (2018-2019), les essais de restauration de l'habitat du sol avec des nouveaux amendements ont été poursuivis en mettant un accent sur la réhabilitation de la diversité fonctionnelle du sol avec l'inoculation de mutualistes sol-plante (vers de terre et mycorhizes).

1.2.2. Description du dispositif expérimental

Le type de dispositif choisi est un dispositif à 4 blocs (répétitions). Les blocs ont été placés de manière à s'adapter à la configuration triangulaire du terrain. Au total, 88 placettes de 16 m² (4 x 4 m) ont été installées à Ivory pour tester 22 traitements/pratiques SFR (*Soil Function Restoration*). (Figure 3). Les parcelles élémentaires sont distantes les unes des autres d'une allée de 1,0 m de largeur. Dans chaque bloc, la répartition des traitements SFR au niveau des parcelles a été effectuée de manière aléatoire.

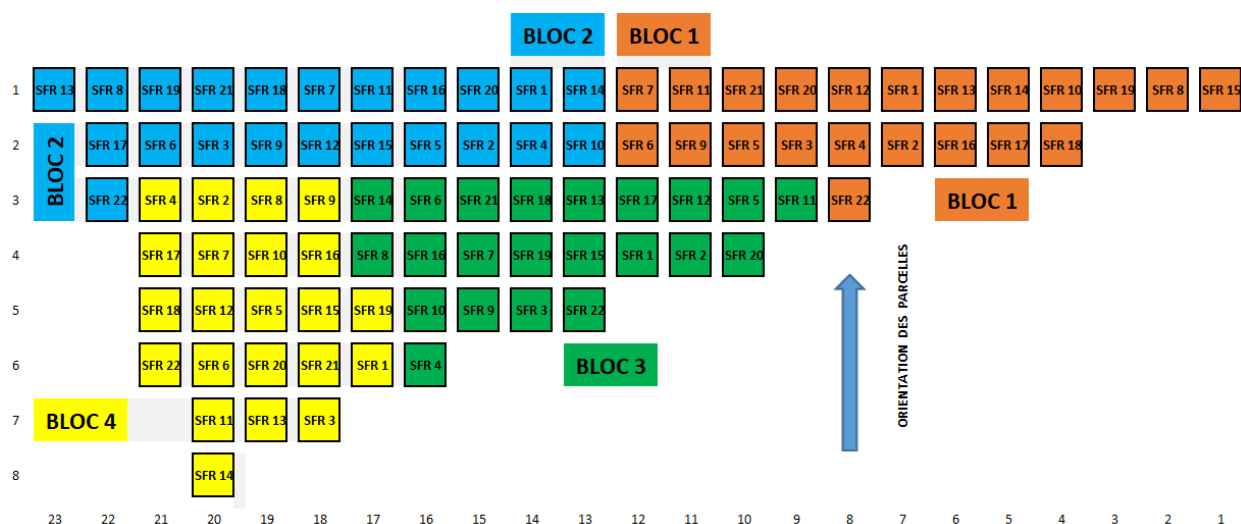


Figure 3. Plan du site expérimental

1.2.3. Traitements étudiés

Les traitements SFR testés dans la présente étude ont été choisis au départ sur la base de pratiques paysannes décrites lors d'enquêtes et choisis également par les scientifiques. Certaines autres SFR paysans ont été intégrés la deuxième année à partir d'ateliers participatifs au sein du *Work Package* (WP) 1 du projet SECuRE. Quant aux connaissances scientifiques, des essais en laboratoire dans le WP2 ont permis de faire ressortir les pratiques SFR pertinentes à tester sur le terrain.

Lors de la première saison culturale (2017-2018), 16 traitements SFR ont été testés :

- Trois pratiques « paysannes » :
 - ✓ poudrette de parc (3 t MS ha⁻¹ ; **SFR1**)
 - ✓ fumier traditionnel (3 t MS ha⁻¹ ; **SFR2**)
 - ✓ fumier traditionnel (3 t MS ha⁻¹) + fertilisation minérale (40 kg ha⁻¹ NPK) (**SFR3**)
- Onze pratiques « scientifiques » qui ont reçu une inoculation de vers de terre :
 - ✓ quatre fertilisants organiques transformés seuls : (i) fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹ ; **SFR4**), fumier amélioré (6 t MS ha⁻¹ ; **SFR5**), compost (6 t MS ha⁻¹ ; **SFR6**) et lombricompost (6 t MS ha⁻¹ ; **SFR7**)

- ✓ trois assemblages de matières organiques et minérales : (i) fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹) + dolomie (500 kg ha⁻¹) (**SFR9**), (ii) fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹) + cendres (500 kg ha⁻¹) (**SFR10**) et fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹) + prochimad (500 kg ha⁻¹) (**SFR11**)
 - ✓ quatre assemblages de matières organiques dont trois avec ajout de matières minérales : (i) fumier traditionnel (2 t MS ha⁻¹) + compost (2 t MS ha⁻¹) + lombricompost (2 t MS ha⁻¹) (**SFR12**), (ii) fumier traditionnel + compost + lombricompost (2 t MS ha⁻¹ chacun) + cendres (500 kg ha⁻¹) (**SFR13**), (iii) fumier traditionnel + compost + lombricompost (2 t MS ha⁻¹ chacun) + prochimad (500 kg ha⁻¹) (**SFR14**) et (iv) fumier traditionnel + compost + lombricompost (2 t MS ha⁻¹ chacun) + guanomad (500 kg ha⁻¹) (**SFR15**).
- Deux pratiques contrôles :
- ✓ contrôle positif : fertilisation minérale « adéquate » (100 kg ha⁻¹ NPK et 100 kg ha⁻¹ urée en deux apports ; **SFR8**)
 - ✓ contrôle négatif : sans aucune fertilisation (**SFR16**)

Au cours de la deuxième saison culturale (2018-2019), les 16 traitements SFR de l'année 1 ont été poursuivis. En outre, six nouveaux traitements ont été testés :

- Quatre nouvelles pratiques « scientifiques » :
 - ✓ un fertilisant organique à haut apport : fumier traditionnel (18 t MS ha⁻¹) ; (**SFR18**)
 - ✓ un assemblage organique à haut apport : fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹) + compost (6 t MS ha⁻¹) + lombricompost (6 t MS ha⁻¹) (**SFR19**)
 - ✓ un fertilisant organique avec apport fractionné : fumier traditionnel (6 t MS ha⁻¹) fractionnés en trois apports de 2 t MS ha⁻¹ par apport (**SFR20**)
 - ✓ un traitement « traceur » : fertilisation minérale adéquate (100 kg ha⁻¹ NPK et 100 kg ha⁻¹ urée en deux apports ; témoin positif) (**SFR21**)
- Deux pratiques « paysannes » :
 - ✓ un mélange de matières organiques : fumier traditionnel (1,5 t MS ha⁻¹) + fumier amélioré (1,5 t MS ha⁻¹) (**SFR17**)
 - ✓ un assemblage de matières organique et minérale : (i) fumier traditionnel (3 t MS ha⁻¹) + cendres de paille de riz (500 kg ha⁻¹) (**SFR22**)

Les constituants des matières organiques et minérales utilisées sont décrits dans le Tableau 1, tandis que leurs caractéristiques chimiques sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Constituants des matières organiques et minérales utilisées

Matières	Composition
Poudrette de parc	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.
Fumier traditionnel	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/conservé	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.
Compost	Mélange fermenté de débris organique obtenu par compostage. Le compost utilisé est celui de la société Madacompost.
Lombricompost	Déjections animales et résidus végétaux décomposés par des vers de terre tels qu' <i>Eisenia foetida</i> . Le lombricompost utilisé est commercialisé par la société Tata.
Guano	Déjections de chauve-souris commercialisées par la société Guanomad.
Dolomie	Poudre de roche riche en calcium et en magnésium.
Cendre de balles de riz	Cendres issues de la briqueterie.
Cendres de pailles de riz	Cendres issues du brûlis des pailles de riz.
Prochimad	Poudre de roche riche en phosphore.
NPK	Engrais minéral à base d'azote ; de phosphore et de potassium avec des proportions respectives de 11, 22 et 16
Urée	Engrais azoté sous forme granulée

Tableau 2. Caractéristiques chimiques des matières organiques et minérales utilisées

	Teneur MS (%)	Azote total (% MS)	P₂O₅ (%MS)	K₂O (%MS)	Carbone (%MS)
Matières organiques					
Poudrette de parc	93,50	1,03	0,16	0,69	14,05
Fumier traditionnel	65,00	0,74	0,68	2,18	13,95
Fumier amélioré	50,00	1,87	0,30	2,21	21,41
Compost	83,84	1,36	0,47	0,53	16,62
Lombricompost	46,00	2,00	0,37	1,71	23,13
Guano	81,00	1,21	6,85	0,22	4,46
Matières minérales					
NPK 11-22-16		11	22	16	0
Urée		46	-	-	0
Cendres de balles de riz	98	0,03	0,13	0,63	0,12
Prochimad hyperferos	88	0,04	8,29	0,03	0,34

1.3. Opérations culturales

1.3.1 Préparation du sol

Deux étapes se sont déroulées lors de la préparation du sol: le piquetage et le labour. Le piquetage consiste à délimiter chaque parcelle élémentaire. Quant au labour, l'opération consiste à travailler le sol d'une profondeur moyenne de 20 à 30 cm. Celui-ci a été effectué vers début novembre 2018, soit une vingtaine de jours avant le semis. Les détails de l'installation des parcelles sont décrits dans le lien suivant <https://www.secure.mg/videos/installation-des-placettes-de-lessai-au-champ-ivory>.

1.3.2 Semis

Le semis, réalisé par poquet, a eu lieu le 23 et le 24 novembre 2018. Pour chaque parcelle élémentaire, 400 poquets ont été formés, ce qui équivaut à une densité de semis de 25 poquets par m². La distance entre les poquets est de 20 cm. Dans chaque poquet, les semences ont été placées à raison de 5 à 8 graines par poquet. Les intrants sont alors répartis sur les 400 poquets. L'inoculation de mycorhizes s'est fait par enrobage le jour même du semis. Il s'agit du traitement à base de poudre composée de spores mycorhiziens. La dose normale de mycorhize est de 12 g de poudre par kg de riz donc deux spores par graine. L'enrobage consiste à mouiller légèrement les grains de riz avec 20 ml d'eau par kg de semence puis de mélanger ces grains avec la poudre en la répartissant bien sur les grains (Cliché 1).



Cliché 1. Enrobage des semences avec la poudre de spores mycorhiziens

La variété de riz utilisée est le Nerica 4, variété de référence de cette région, et promue à l'international pour les zones de basse altitude. Elle a été sélectionnée en raison de son adaptation au climat du Moyen-Ouest du Vakinankaratra (cf. Annexe 3). En outre, elle est résistante au *Striga asiatica* qui est une plante parasite épiphytisme pouvant causer de graves dégâts sur les rendements et qui est très présente dans cette région.

1.3.3 Entretien des cultures

Le sarclage constitue le principal entretien cultural dans la présente expérience. Deux sarclages ont été effectués pendant la durée de l'essai. Le premier a été effectué au début du tallage et le second sarclage s'est effectué durant la phase de tallage, 21 jours après le premier.

1.3.4 Inoculation de vers de terre

Les vers de terre utilisés sont des vers endogés géophages, de l'espèce *Pontoscolex corethrurus* (*Rhinodrilidae*) (cf. Annexe 4). La collecte a été effectuée manuellement à Andranomanelatra (cf. Annexe 5). Au total, 35 737 individus ont été inoculés sur l'ensemble des 44 parcelles (11 traitements SFR x 4 répétitions) soumises à l'inoculation de vers de terre. Cela équivaut à une densité de 51 individus par m².

Lors de l'inoculation proprement dite, les vers de terre ont été placés dans un trou à une profondeur de 15 cm. Une fois recouvert avec de la terre, le trou a été humidifié pour favoriser les conditions de l'inoculation (Cliché 2).



Cliché 2. Inoculation de vers de terre

1.4 Mesures effectuées

Afin d'évaluer les performances agronomique et écologique des pratiques SFR, différentes observations et mesures ont été réalisées au cours de l'expérimentation (cf. Annexe 6). Ces mesures correspondent aux descripteurs écologiques et agronomiques.

- Descripteurs écologiques : densité apparente, humidité du sol, macrofaune du sol, pH *in situ*

- Descripteurs agronomiques : le taux de germination, la hauteur et vigueur de la plante, la phénologie, le nombre de talles, la présence de maladies (*striga*, pyriculariose), l'abondance et le type des adventices, les indicateurs SPAD, la biomasse aérienne, la biomasse racinaire (sur blocs racinaire), le rendement et ses composantes.

1.4.1 Descripteurs écologiques

De nombreux paramètres relatifs aux propriétés du sol ont été considérés dans la mesure des descripteurs écologiques.

✓ Densité apparente

La méthode du cylindre (Cliché 3) a été utilisée pour déterminer la densité apparente du sol. Pour chaque parcelle élémentaire, deux prélèvements ont été effectués. Ceux-ci correspondent respectivement à deux profondeurs du sol (i) 0-10 cm et (ii) 10-20 cm. Les échantillons ont été séchés à l'étuve à une température de 105°C pendant 48 heures. Après la pesée du sol sec, la densité apparente a été déterminée par la formule suivante : **da = poids sec/volume**.



Cliché 3. Mesure de la densité apparente du sol par la méthode du cylindre

✓ Humidité du sol

Des échantillons de sol au niveau des horizons 0-10 cm et 10-20 cm ont été prélevés. Puis ces échantillons ont été séchés à l'étuve à 105°C pendant 48 heures

✓ Macrofaune du sol

La méthode TSBF (*Tropical Soil Biology and Fertility*) modifiée a été adoptée lors de la mesure de la macrofaune du sol. Elle consiste à prélever tous les invertébrés d'une longueur comprise entre 2 et 20 mm compris dans un bloc de sol de 25 cm de côté et de 20 cm de profondeur. Les organismes du sol ont été triés manuellement. Des piluliers contenant de l'alcool ont été utilisés pour conserver la macrofaune du sol. Arrivés au laboratoire, les échantillons ont été identifiés,

pesés et comptés. La macrofaune du sol a ensuite été classée en macrofaune bénéfique (ou auxiliaire) et néfaste en fonction de son action sur les cultures.

✓ **pH *in situ***

Le pH *in-situ* a été mesuré sur les poquets à l'aide d'un pH mètre de terrain (*Hanna Instruments*), avec une sensibilité de 1/100 unité de pH. Pour cela, un trou de 5 cm, correspondant au diamètre de l'électrode du pH mètre, a été mis en place à proximité d'un poquet. Le trou étant saturé avec de l'eau distillée pour que le sol soit pâteux afin d'installer l'électrode. Deux mesures par parcelles ont été réalisées à la fin du cycle, durant la période de récolte. Dans le cas où l'on constate une importante différence entre les deux valeurs de pH mesurées, une troisième mesure a été effectuée sur la parcelle.

1.4.2 Descripteurs agronomiques

Les mesures des descripteurs agronomiques concernent les paramètres liés aux plantes.

✓ **Hauteur et nombre de talles**

La hauteur et le nombre de talles ont été mesurés au niveau de huit placettes correspondant chacune à quatre poquets. Les placettes sont des points prédéfinis sur un plan qui correspondent à un endroit précis de la parcelle (cf. Annexe 7). Les mesures se sont donc faites sur 32 poquets à raison de deux mesures effectuées à deux stades différents : la première mesure s'est faite au début du tallage et la seconde en fin de la montaison. Les données obtenues ont été retranscrites dans la fiche de terrain (cf. Annexe 8).

✓ **Mesure SPAD**



Cliché 4. Appareil SPAD

Le SPAD (*Soil and Plant Analysis Development*) permet d'évaluer la teneur en chlorophylle de la plante. Le principe de l'appareil SPAD repose sur l'analyse de la lumière transmise par le limbe

foliaire dans le rouge et le proche infra-rouge. La valeur de la longueur d'onde (unité SPAD) obtenue par l'appareil varie de 0,0 à 99,9. Cette valeur est corrélée à la fois à la teneur en chlorophylle et à la teneur en azote de la plante (Pouzet *et al.*, 2007). Dans cette étude, la mesure SPAD a été effectuée lors du stade de montaison du riz afin de déterminer le niveau de la nutrition azotée.

✓ **Abondance des adventices**

Après le sarclage, les adventices ont été prélevés et pesés. Ensuite, après un séchage à l'étuve à 60°C d'un échantillon, la quantité d'adventices en matière sèche pour chaque parcelle a été obtenue.

✓ **Rendement en grains et en pailles**

La récolte a été effectuée du 21 mars au 4 avril 2018, en fonction de l'état de maturité du riz. Les étapes de la récolte sont détaillées dans le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=j7nZbIsBqeQ>. L'évaluation du rendement s'est effectuée au niveau du carré utile qui correspond à l'ensemble de la surface de la parcelle élémentaire à l'exception des deux lignes de bordures. Diverses étapes ont été réalisées lors de la récolte.

Etant donné qu'il y a eu un important problème de levée, le nombre de poquet présent sur le carré utile a été noté afin d'évaluer le rendement par poquet. Ensuite les poquets ont été récoltés en coupant les talles au ras du sol et la biomasse aérienne obtenue a été pesée. Puis la biomasse obtenue a été battue sur place et les grains obtenus sont vannés puis pesés pour avoir le poids frais des grains. Après cela, la paille est pesée pour avoir son poids frais. Un échantillon de grains et de paille est placé à l'étuve afin de déterminer la teneur en matière sèche des grains et des pailles ; ainsi le rendement en MS de ses deux constituants peut être obtenu.

1.3 Traitements statistiques

Des statistiques descriptives ont été effectuées pour déterminer les moyennes et les écart-types des traitements étudiés. Ensuite, la normalité des données a été testée. Pour les variables qui suivent une loi normale, l'analyse de variance (ANOVA), couplée du test de comparaison multiple par paire de Fisher-LSD a été utilisée pour effectuer la comparaison des moyennes entre les traitements. En revanche, lorsque les données ne suivent pas une loi normale, elles sont transformées par box-cox ou par $\log(x+1)$. Après cette étape, le test de normalité a été reconduit. Pour les données transformées normales, l'ANOVA a été utilisée. Sinon, les données sont soumises au test non-paramétrique de Kruskal-Wallis, couplé du test de comparaison multiple par paires de Conover-Iman. Le seuil de significativité est fixé à une p-value inférieure à 0,05.

Afin d'étudier les corrélations entre les données, une Analyse en Composantes Principale (ACP) a été effectuée. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Excel stat.

RESULTATS

Chapitre 2 : RESULTATS

Au cours de la saison culturale, un important problème de levée a été rencontré. En effet, juste après les semis, une forte pluie a eu lieu avec plus de 120 mm de précipitation en une nuit. Cela a entraîné un fort tassement du sol et en conséquence, un très faible taux de levée sur certaines parcelles du site d'expérimentation. Ces parcelles ont été répertoriées puis ôtées de l'interprétation des résultats. Ainsi, au lieu de 22 traitements étudiés, il y a actuellement 17 traitements « exploitables ». Les SFR suivants ont été évalués : SFR 1, SFR 2, SFR 3, SFR 4, SFR 5, SFR 7, SFR 11, SFR 12, SFR 13, SFR 14, SFR 15, SFR 16 pour les traitements depuis la première saison culturale (2017-2018) et les SFR 17, SFR 18, SFR 20, SFR 21, SFR 22 pour les nouveaux traitements qui ont démarré lors de la saison 2018-2019. Le SFR 21 est alors considéré comme le traitement positif lors des analyses statistiques.

Pour faciliter la lecture des graphiques, des couleurs ont été utilisées pour chaque groupe de traitements :

- la couleur jaune pour les deux témoins (positif et négatif) ;
- la couleur verte pour les SFR paysans déjà présents durant la saison culturale 2017-2018 ;
- la couleur orange pour les SFR avec amendement à 6 t MS ha⁻¹ et orange plus foncé pour le SFR 11 qui est un traitement à 6 t MS ha⁻¹ avec ajout de matières minérales ;
- la couleur bleue pour les assemblages d'amendements organiques ;
- la couleur violette pour les nouveaux SFR de cette saison culturale 2018-2019.

2.1. Les descripteurs écologiques du sol

2.1.1. Densité apparente du sol

L'observation des valeurs de la densité apparente indique que la densité la plus faible se trouve au niveau du SFR 5 à base de fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹ pour l'horizon 0-10 cm avec une densité apparente de 1,24. Quant à l'horizon 10-20 cm, la densité apparente la plus faible se trouve au niveau du SFR 3 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹ + NPK à 40 kg ha⁻¹) et du SFR 16 (témoin sans apport) avec une valeur de 1,36. Concernant la densité apparente la plus élevée, elle est enregistrée au niveau du SFR 21 (témoin avec NPK et urée à 100 kg ha⁻¹) que ce soit pour l'horizon 0-10 cm ou pour l'horizon 10-20 cm, avec des valeurs respectives de 1,45 et 1,64.

Cependant, il s'agit seulement de tendances étant donné que l'analyse de variance démontre l'absence de différence significative entre les traitements. En effet, la p-value est respectivement de 0,9 et de 0,5 pour les horizons 0-10 et 10-20 cm.

Tableau 3. Densité apparente au niveau des horizons de sol pour chaque traitement

	Densité apparente 0-10	Densité apparente 10-20
SFR 1	1,38±0,04	1,51±0,06
SFR 2	1,37±0,07	1,59±0,09
SFR 3	1,34±0,06	1,36±0,09
SFR 4	1,35±0,06	1,54±0,11
SFR 5	1,24±0,06	1,46±0,15
SFR 7	1,39±0,05	1,45±0,04
SFR 11	1,40±0,06	1,59±0,05
SFR 12	1,33±0,08	1,48±0,03
SFR 13	1,37±0,06	1,46±0,07
SFR 14	1,36±0,05	1,49±0,05
SFR 15	1,35±0,09	1,47±0,05
SFR 16	1,28±0,05	1,36±0,08
SFR 17	1,33±0,08	1,47±0,11
SFR 18	1,33±0,08	1,43±0,05
SFR 20	1,44±0,02	1,54±0,04
SFR 21	1,45±0,04	1,64±0,06
SFR 22	1,36±0,05	1,46±0,05

2.1.2. Humidité du sol

Le taux d'humidité du sol a été mesuré au niveau des deux horizons : 0-10 cm et 10-20 cm. Pour le premier horizon du sol, les différences entre les traitements n'ont pas été significatives (p-value = 0,240). Cependant, au niveau de l'horizon 10-20 cm, il existe une différence significative entre les traitements (p-value = 0,046).

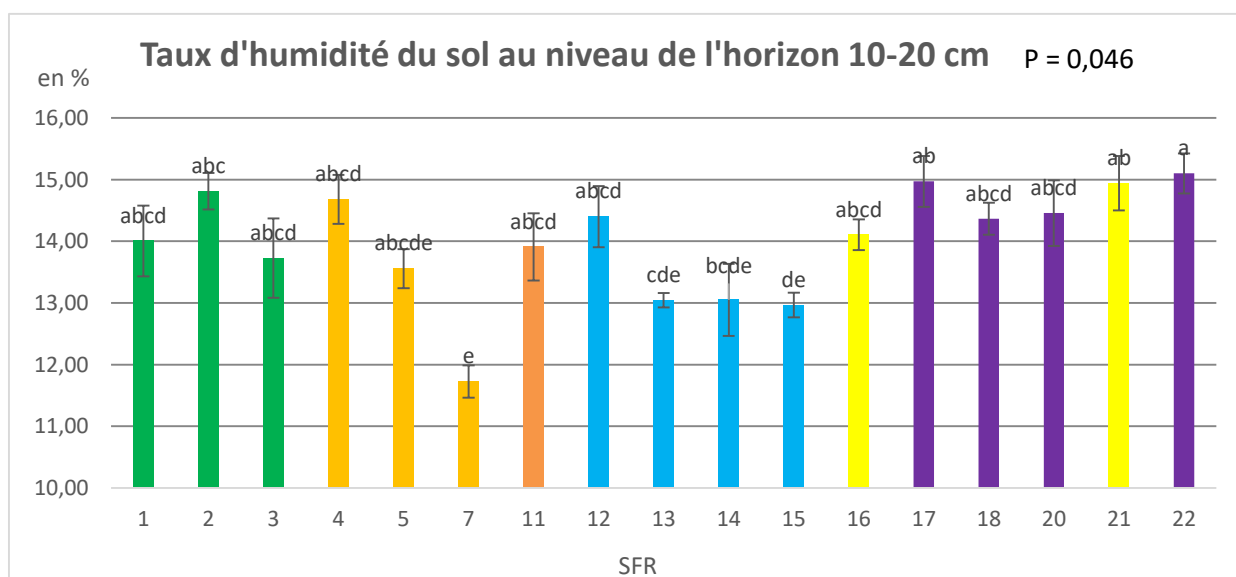


Figure 4. Taux d'humidité du sol au niveau de l'horizon 10-20 cm

Le SFR 22 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹ + cendre de paille de riz à 500 kg ha⁻¹), présente le taux d'humidité le plus élevé (15,1%). Cependant, il n'existe pas de différence significative entre

ce traitement et la plupart des autres traitements ; particulièrement en ce qui concerne les nouveaux SFR (en violet) ainsi que les deux témoins (en jaune) qui présentent le taux d'humidité le plus élevé de manière globale.

Le SFR 7 (lombricompost à 6 t MS ha⁻¹) présente le taux d'humidité le plus faible (11,7%). Toutefois, il n'y a pas de différence significative entre ce SFR et le SFR 5 (à base de fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹) ainsi que les SFR 13, 14 et 15 qui sont des assemblages organiques à base de fumier traditionnel, de compost et de lombricompost.

2.1.3. pH du sol

La Figure 5 montre les moyennes des mesures de pH du sol pour chaque traitement SFR.

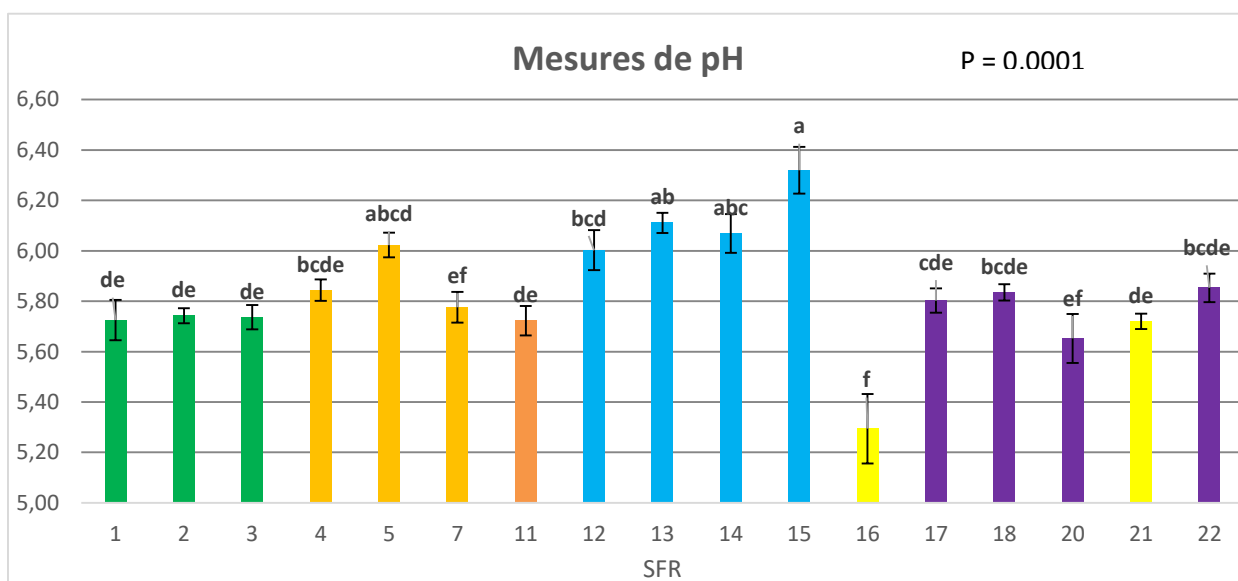


Figure 5. Mesure de pH du sol en fonction des traitements

D'après les résultats de l'ANOVA, il existe des différences très significatives entre les valeurs de pH des traitements (p -value < 0,001). La valeur maximale observée pour le pH est de 6,32, correspondant au SFR 15, qui est un traitement à base de fumier traditionnel, compost, lombricompost et guanomad. La valeur du pH la plus faible est celle du SFR 16 qui correspond au témoin négatif, sans aucun apport d'amendement ou d'engrais. D'un point de vue global, les traitements avec assemblages organiques (en bleu) ainsi que le SFR 5 à base de fumier amélioré, présentent un sol à pH plus élevé.

Ces observations sont confirmées par les comparaisons multiples par paire de Fisher-LSD qui démontrent que les traitements qui présentent des valeurs de pH supérieures sont les assemblages organiques à base de fumier traditionnel, compost et lombricompost (SFR 13, 14 et 15) ainsi que le fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ (SFR 5). Toutefois, il est important de noter que selon ces comparaisons par paire, il n'y a pas de différence significative entre les pH obtenus en utilisant le fumier traditionnel (SFR 4) et le fumier amélioré (SFR 5). Les SFR paysans (SFR 1, 2 et 3)

présentent des valeurs de pH identiques au témoin positif. Le SFR 20 (apport fractionné de fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹) est le moins performant en ce qui concerne l'augmentation du pH du sol par rapport au contrôle. En effet, la valeur de pH de ce SFR ne présente pas de différence significative avec celle du témoin négatif (SFR 16).

2.1.4. Macrofaune du sol

2.1.4.1. Richesse en macrofaune auxiliaire aux cultures

La macrofaune auxiliaire recensée regroupe des espèces détritivores et prédatrices. Parmi les espèces détritivores, des macrofaunes de la famille des Blatidae, Formicidae, Glossoscolocidea, Megascolocidea, Ostochaetidae, Termitidae, Tipulidae. Quant aux espèces prédatrices, elles appartiennent à la famille des Aranae, Carabidae, Forficulidae, Myrmeleontidae et Staphylinidae.

- Horizon 0-10 cm

L'analyse de variance montre une p-value de 0,674. Cette valeur dépassant largement le seuil de signification de 0,05, cela signifie qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne la densité de macrofaune auxiliaire dans les premiers centimètres de sol.

- Horizon 10-20 cm

Au niveau de cet horizon de sol, il existe des différences significatives entre les traitements étant donné que la p-value obtenue est de 0,006. Les résultats détaillés sont présentés dans la Figure 6.

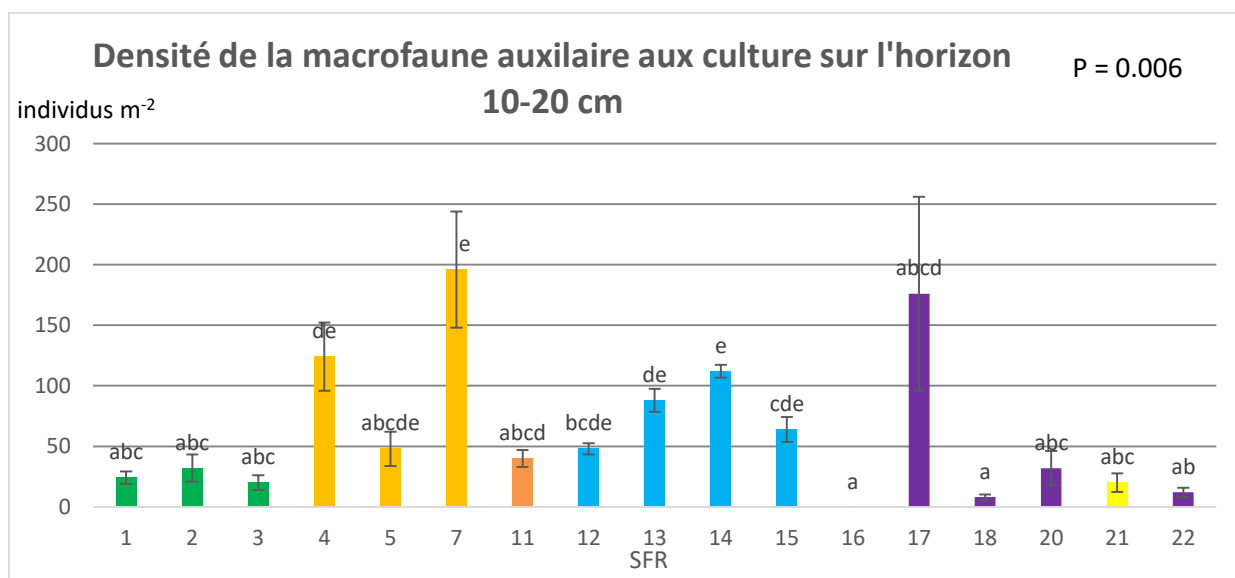


Figure 6. Densité de la macrofaune auxiliaire aux cultures en fonction des traitements

D'un point de vue global, et en tenant compte des comparaisons par paires de Fisher-LSD les traitements présentant une densité élevée de macrofaune auxiliaire, sont les traitements avec amendements organiques à 6 t MS ha⁻¹ (en orange) et les assemblages d'amendements organiques (en bleu). En effet, la densité de macrofaune la plus élevée a été enregistré au niveau du SFR 7

(lombricompost à 6 t MS ha⁻¹), avec une densité de 196 individus par mètre carré. Les comparaisons multiples par paires montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre le SFR 7 et les autres amendements organiques à 6 t MS ha⁻¹ (en orange sauf pour le cas du SFR 11) ainsi que les assemblages d'amendements organiques (en bleu).

Au niveau du témoin négatif (SFR 16), la macrofaune auxiliaire est absente. Les comparaisons multiples par paires montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre ce témoin négatif et la plupart des autres traitements : tous les SFR paysans (en vert), tous les nouveaux SFR (en violet) ainsi que le témoin positif en jaune.

2.1.4.2. Richesse en macrofaune néfastes aux cultures

La macrofaune néfaste recensée sont des phytophages de la famille des Carabidae, Cicadidae, Cydnidae, Dynastidae, Elateridae, Gryllidae, Iulidae et Melolothidae.

La densité de macrofaune néfaste aux cultures varie de 0 à 24 individus m⁻². La densité la plus basse est enregistrée au niveau du SFR 7 (lombricompost 6 t MS ha⁻¹), du SFR 15 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹, compost à 3 t MS ha⁻¹, lombricompost à 3 t MS ha⁻¹ et guanomad 500 kg ha⁻¹), du SFR 16 (témoin négatif sans apport) et du SFR 22 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹ + cendres de paille de riz à 500 kg ha⁻¹). La densité la plus haute est mesurée au niveau du SFR 11 (fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹ + prochimad à 500 kg ha⁻¹) Cependant, l'analyse de la variance montre une p-value de 0,188. Cela signifie donc que concernant la densité de macrofaune néfastes aux cultures, il n'y a pas de différence significative entre les traitements.

2.2. Les performances agronomiques du riz

2.2.1. Hauteur et nombre de talles des plants du riz

Deux mesures de hauteur et de nombre de talles par poquet ont été effectuées durant le cycle cultural. Au niveau du nombre de talles par poquet, il n'y a pas de différence significative entre les traitements avec une p-value de 0,138 pour la première mesure faite durant le début de tallage et une p-value de 0,253 pour la seconde mesure faite durant la phase de tallage. Par contre, pour les deux mesures de hauteur, la différence entre les traitements a été constatée à hauteur moyenne des plants de riz lors de la seconde mesure de hauteur est présentée au niveau de la Figure 7 :

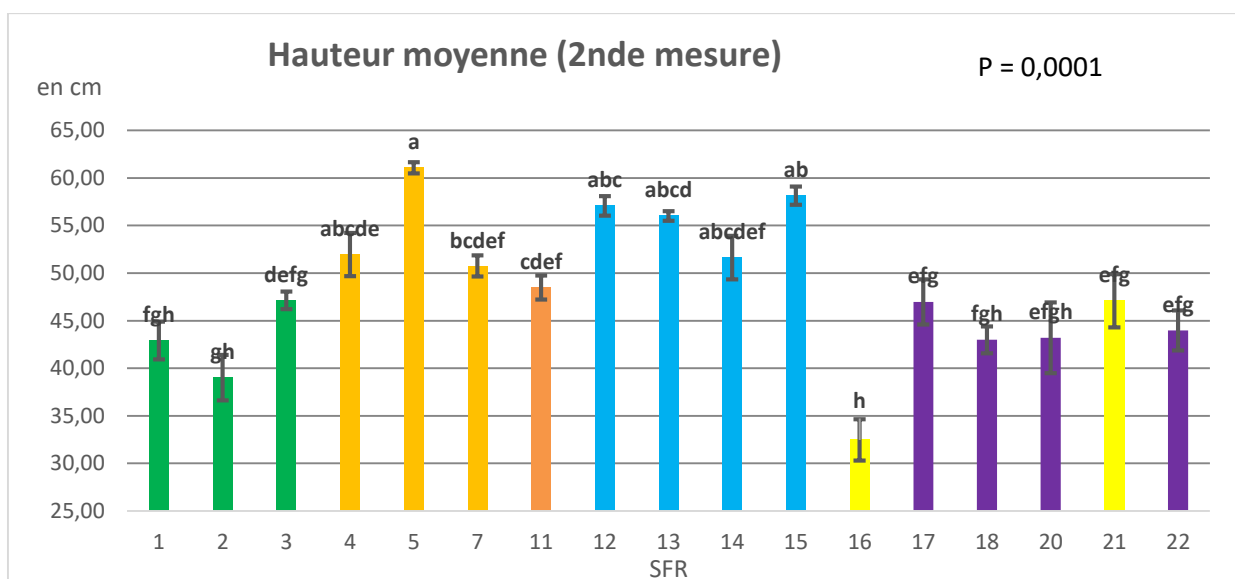


Figure 7. Hauteur moyenne des plants de riz en fonction des SFR, mesurée 73 jours après le semis

La Figure 7 montre des hauteurs variant de 32,5 cm pour le SFR 16 (témoin négatif, sans apport) à 61,1 cm pour le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹). L'ANOVA indique une différence significative entre les traitements comme indiqué par la p-value qui est égale à 0,0001. Les comparaisons multiples par paires montrent que les traitements avec assemblage organiques de fumier traditionnel, compost et lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ (SFR 12 à 15) ne présentent pas de différences significatives entre eux. Ils font partie des traitements les plus performants concernant la hauteur des plants. Le SFR 4 (fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹) et le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹) font également partie des plus performants sur la hauteur des plants. Les SFR paysans (en vert) et les nouveaux SFR (en violet) ne présentent pas de différences significatives entre eux et avec le témoin positif (SFR 21).

2.2.2. Abondance des adventices

Deux sarclages ont été effectués au cours du cycle. La quantité de biomasse d'adventice en MS a été pesée et comparée entre les traitements pour évaluer s'il existe des traitements plus susceptibles de développer des adventices. Les résultats de ces deux prélèvements de biomasse lors du sarclage sont présentés dans les figures suivantes :

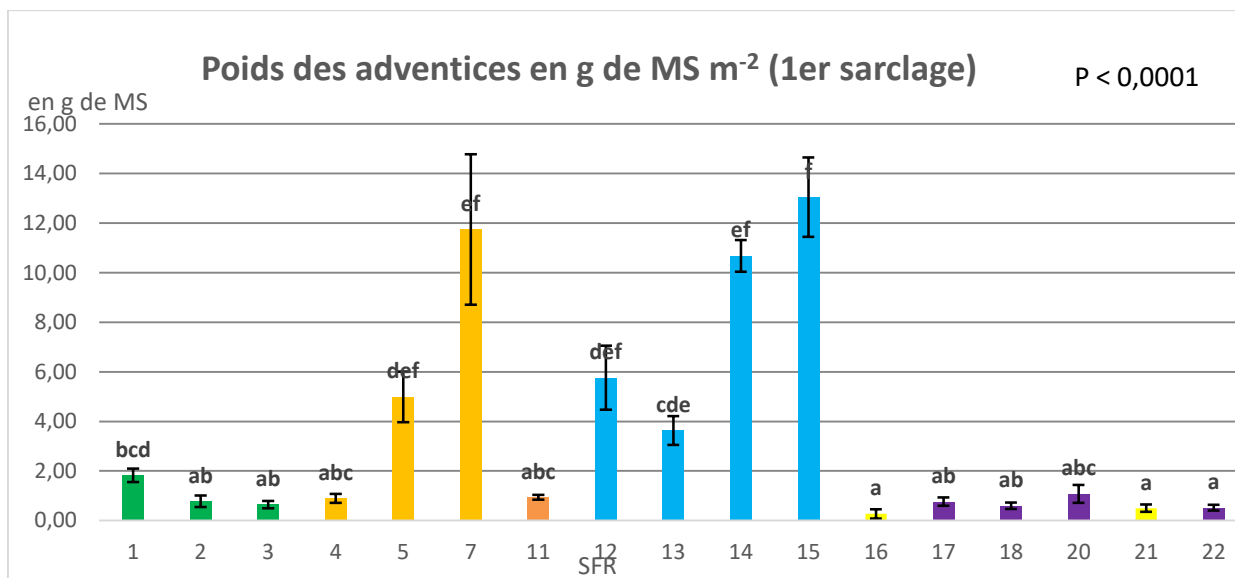


Figure 8. Poids des adventives en g de MS m⁻² au cours du premier sarclage

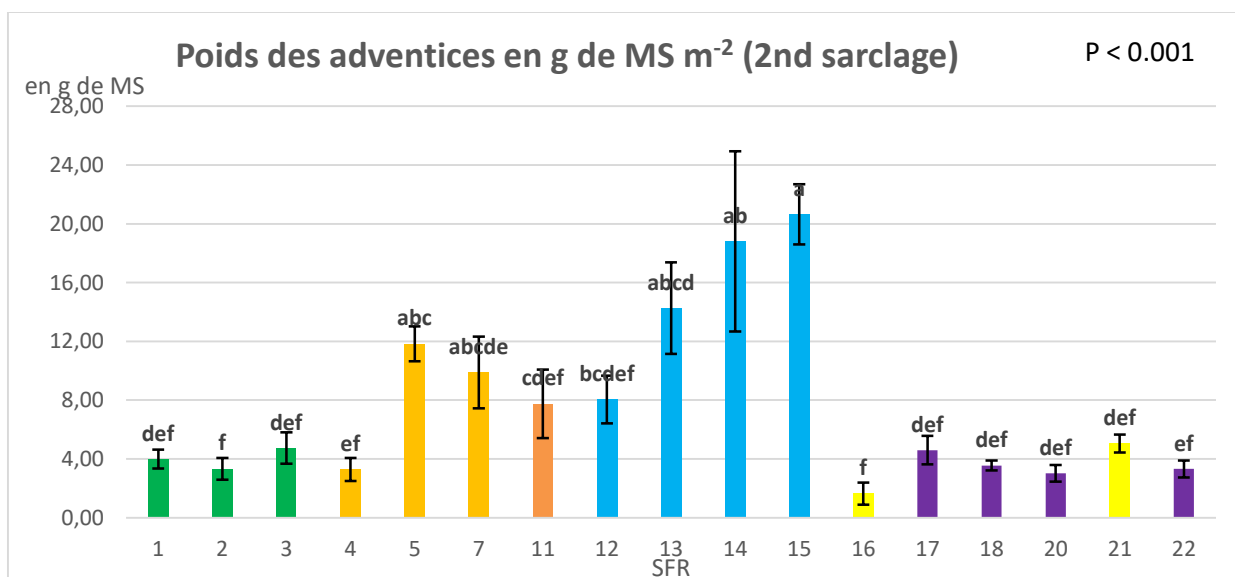


Figure 9. Poids des adventives en g de MS m⁻² au cours du second sarclage

Pour les deux sarclages, il existe des différences très significatives entre les traitements SFR. En effet, la p-value est respectivement de 0,0001 pour le premier sarclage et de 0,001 pour le second sarclage. D'un point de vue global, il existe une même tendance pour les deux sarclages. À partir du SFR 5 au SFR 15, la biomasse des adventives est plus importante que dans les autres traitements. Il s'agit ici des traitements avec les amendements organiques à 6 t MS ha⁻¹ et les traitements avec assemblage d'amendements organiques. De même, pour les deux sarclages, les SFR paysans (en vert) et les nouveaux SFR (en violet) ne présentent pas de différence significative entre eux et entre le témoin positif (SFR 21) et négatif (SFR 16). Au cours des deux sarclages, c'est le SFR 15 (fumier traditionnel, compost, lombricompost, chacun à 2 t MS ha⁻¹ + guanomad à 500 kg ha⁻¹) qui présente la biomasse d'adventice la plus élevée. De même, le SFR 16 (témoin négatif, sans apport) présente la biomasse d'adventice la plus faible.

2.2.3. Mesures SPAD

Les mesures SPAD ont été faites au cours de la phase de montaison. Les résultats sont présentés dans la Figure 10 :

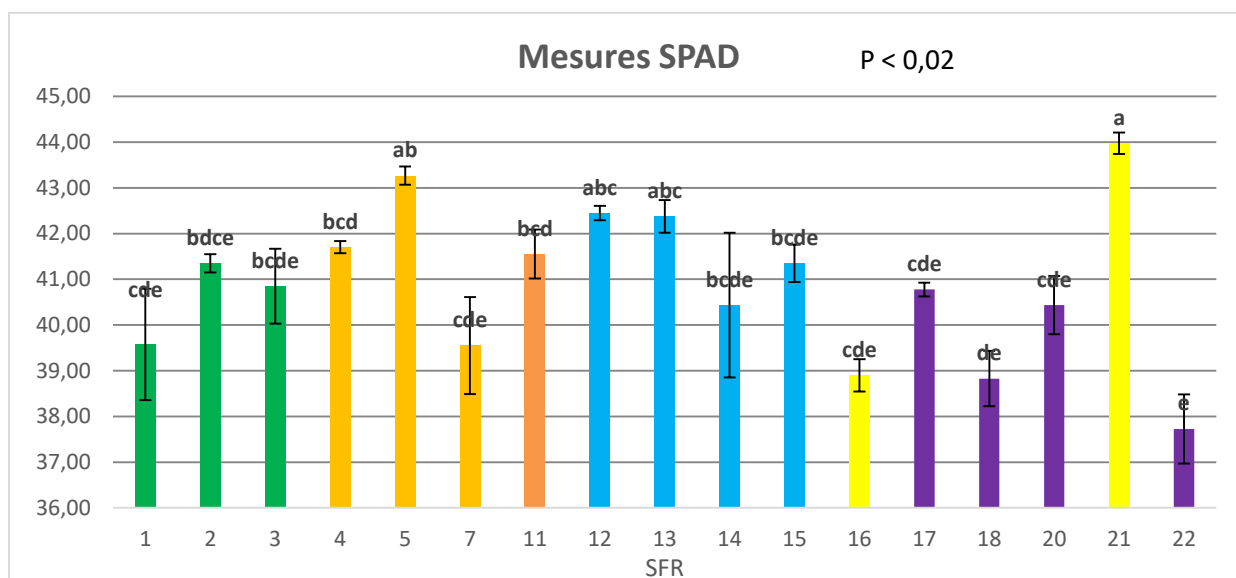


Figure 10. Variations des mesures SPAD en fonction des traitements

La p-value obtenue après ANOVA est inférieure au seuil de signification de 0,05, il y a donc une différence significative entre les traitements. D'après la Figure 10, le SFR 21 (témoin positif à base de fertilisation minérale) présente la valeur SPAD la plus élevée avec 43,98. Toutefois, le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹), le SFR 12 (fumier traditionnel, compost, lombricompost, chacun à 2 t MS ha⁻¹) et le SFR 13 (fumier traditionnel, compost, lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ + cendres de balles de riz à 500 kg ha⁻¹) ne présentent pas de différences significatives avec le SFR 21. La valeur SPAD la plus faible est enregistrée au niveau du SFR 22 à base de fumier traditionnel et de cendres de paille de riz. Cependant, les comparaisons multiples par paire montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre la valeur SPAD du SFR 22 et les valeurs SPAD des autres nouveaux SFR (en violet) et des SFR paysans (en vert). Similairement, il n'y a pas de différence entre les valeurs SPAD du SFR 22 avec celles du SFR 7 (lombricompost à 6 t MS ha⁻¹), du SFR 14 (fumier traditionnel, compost, lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ + prochimad à 500 kg ha⁻¹), du SFR 15 (fumier traditionnel, compost, lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ + guanomad à 500 kg ha⁻¹) et du témoin négatif, sans apport (SFR 16).

2.2.4. Rendement en grains et en paille

2.2.4.1. Rendement en grains

Les rendements en grains en fonction des traitements SFR sont présentés dans la Figure 11. L'analyse de variance indique une p-value de 0,0001. Cela signifie qu'il y a une différence fortement significative entre les traitements.

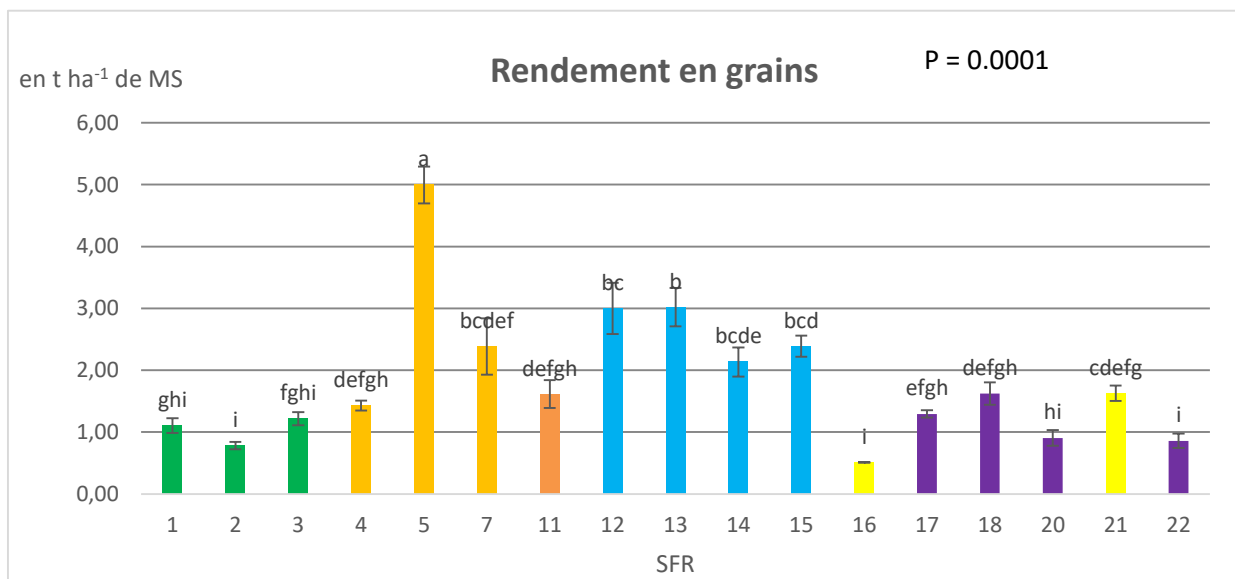


Figure 11. Rendement grains en MS en fonction des traitements

Le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹) est celui qui possède le rendement en grains le plus élevé (5 t MS ha⁻¹) comparé aux autres traitements. Grâce à la comparaison multiple par paire de Fisher-LSD, le SFR 5 est significativement différent de tous les autres traitements. Après le SFR 5, les traitements qui montrent un rendement élevé sont les traitements à base d'assemblage organique de fumier traditionnel, compost et lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ (en bleu) ainsi que le SFR 7 (lombricompost à 6 t MS ha⁻¹). Les comparaisons multiples par paire montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre eux. Le traitement qui démontre le rendement le plus faible est le témoin négatif, sans apport (SFR 16) avec un rendement en grains de 0,51 t MS ha⁻¹. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre le SFR 16, les traitements paysans (en vert) et le SFR 20 (apport fractionné de fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹) ainsi que le SFR 22 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹ + cendre de balle de riz à 500 kg ha⁻¹).

2.2.4.2. Rendement en paille

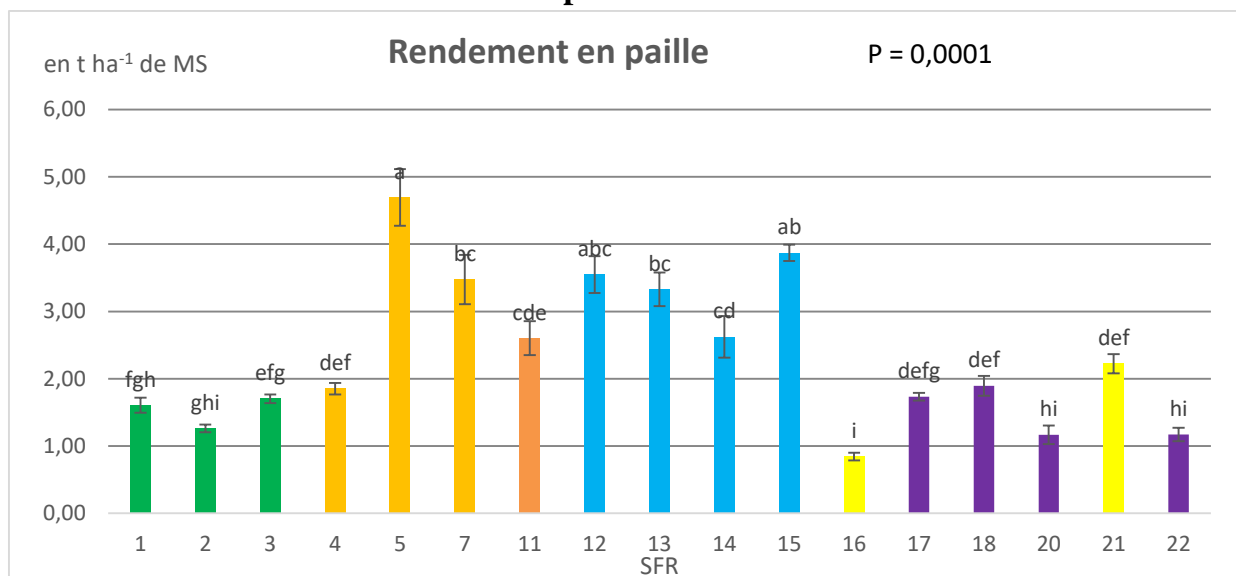


Figure 12. Variations des rendements en paille en fonction des traitements

En ce qui concerne le rendement en paille, l'analyse de la variance indique une p-value de 0,0001. Cela signifie qu'il existe une différence fortement significative entre les traitements.

Selon la Figure 12, le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹) présente le rendement en paille le plus élevé avec 4,69 t MS ha⁻¹. Les comparaisons multiples par paires de Fisher-LSD montrent cependant qu'il n'y a pas de différences significatives entre ce SFR 5, le SFR 12 (fumier traditionnel, compost, lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹) et le SFR 15 (fumier traditionnel, compost, lombricompost chacun à 2 t MS ha⁻¹ + guanomad à 500 kg ha⁻¹).

Le traitement qui démontre le rendement en paille le plus faible est le témoin négatif (SFR 16) avec 0,84 t MS ha⁻¹ de paille. Cependant, il n'existe pas de différence significative entre ce témoin, le SFR 2 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹) et le SFR 20 (apport fractionné de fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹) ainsi que le SFR 22 (fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹ + cendre de paille de riz à 500 kg ha⁻¹). Les résultats de l'analyse de la paille sont détaillés en annexe (cf. Annexe 9).

2.3. Impacts de l'inoculation de vers de terre sur les performances écologiques et agronomiques des traitements SFR

2.3.1. Réussite de l'inoculation de *P. corethrurus*

2.3.1.1. Densité du *P. corethrurus*

La Figure 13 montre qu'il existe de grandes variations de densité de la population du *Pontoscolex corethrurus* entre les traitements SFR. Cela est confirmé par l'analyse de variance. La p-value est en effet égale à 0,0001 ce qui signifie qu'il y a une différence fortement significative entre les traitements. Les traitements qui ont reçu une inoculation de vers de terre (SFR 4 à 15) présentent

une densité significativement plus importante. Tandis que dans les autres SFR, les vers de terre sont quasiment absents.

Parmi les SFR qui ont été inoculés, celui qui présente la plus haute densité de *P. corethrurus* est le SFR 4 (fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹) avec une densité de 104 individus m⁻². Cependant, il n'y a pas de différence significative entre le SFR 4 et les autres traitements inoculés sauf pour le SFR 12 (fumier traditionnel, lombricompost, compost chacun à 6 t MS ha⁻¹). Celui-ci présente la densité la plus faible avec 8 individus m⁻².

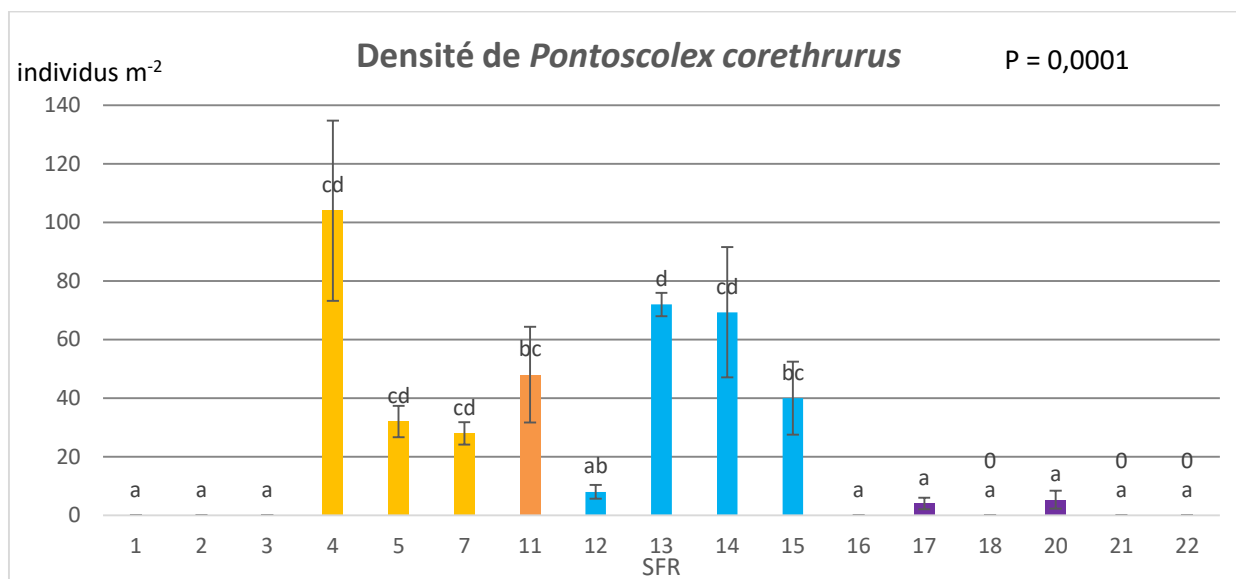


Figure 13. Densité de *P. corethrurus* en fonction des traitements

2.3.1.2. Densité moyenne en fonction de la profondeur

Le tableau suivant montre les moyennes des densités de *P. corethrurus* en fonction des horizons de sol et au niveau des parcelles qui ont été inoculées.

Tableau 4. Densité de *Pontoscolex corethrurus* en fonction des horizons de sols dans les parcelles inoculées

Horizons	0-10 cm	10-20 cm
Densité moyenne	8,28 ± 0,64	45,14 ± 2,01

Selon le Tableau 6, il est constaté que la densité la plus importante de *P. corethrurus* se trouve dans l'horizon 10-20 cm, avec une densité moyenne de 45,14 individus m⁻². L'horizon 0-10 cm ne compte que 8,28 individus m⁻² en moyenne.

2.3.2. Evolution du pH suivant l'inoculation des vers de terre

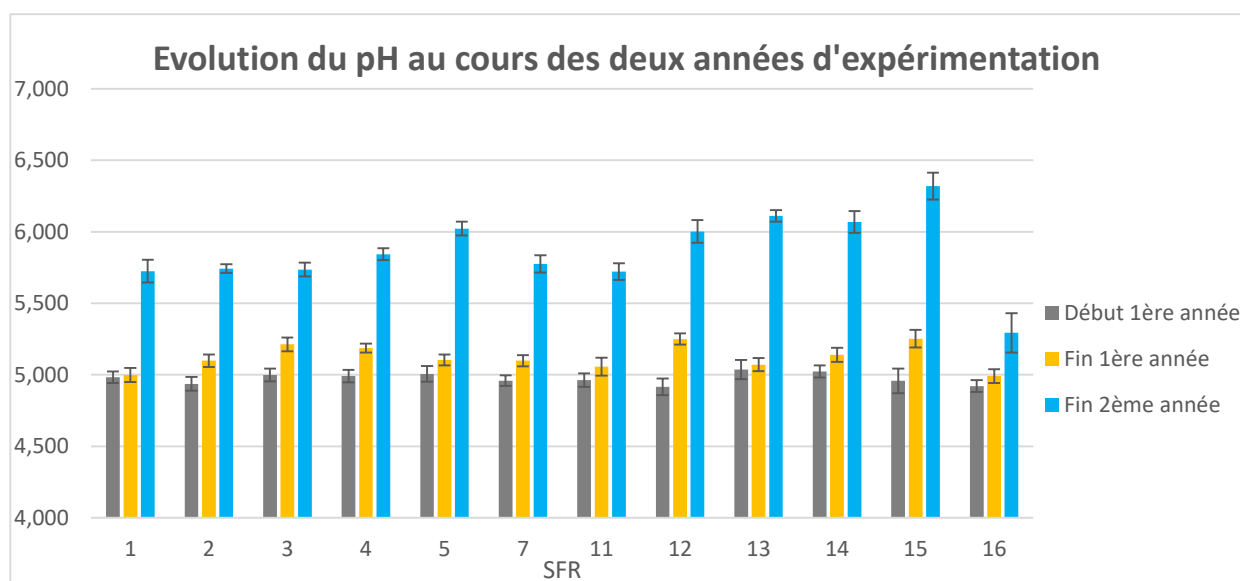


Figure 14. Évolution du pH durant les deux années d'expérimentation

D'une manière générale, le pH des parcelles à la fin de la première année de culture a légèrement augmenté en comparaison avec le pH au tout début de l'essai. Mais, à la fin de la seconde année de culture, une augmentation plus importante du pH comparé aux deux premières mesures.

2.3.3. Evolution des performances agronomiques suivant l'inoculation des vers de terre

2.3.3.1. Rendement en grains

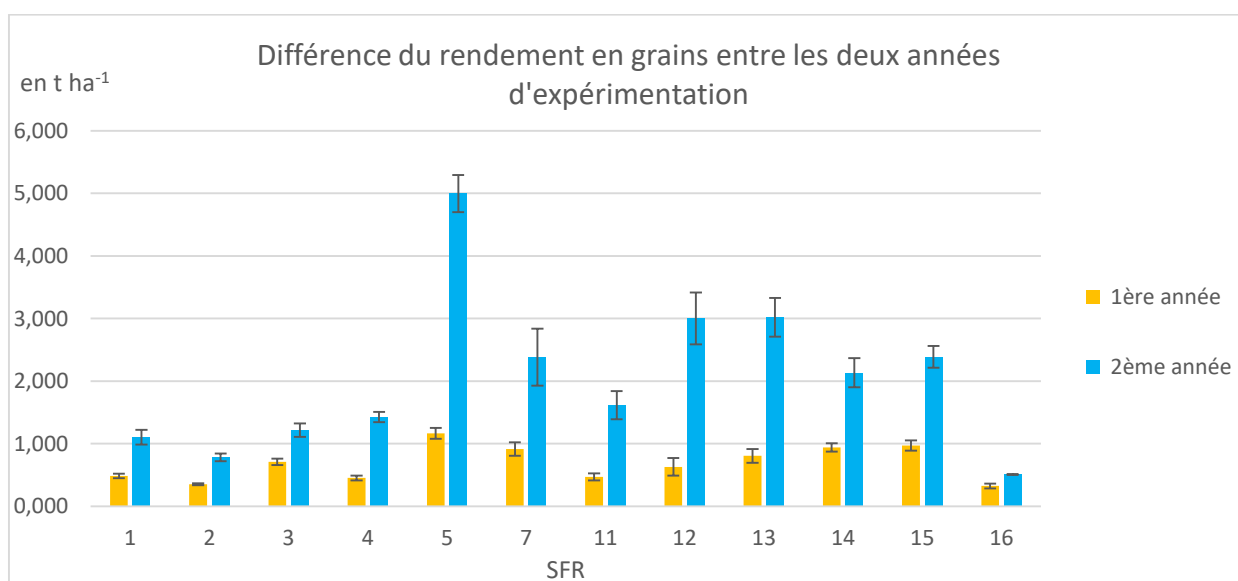


Figure 15. Différence de rendements en grains entre les deux années d'expérimentation

Tableau 5. Augmentation du rendement en grains de l'année 2 comparé à l'année 1

SFR	1	2	3	4	5	7	11	12	13	14	15	16
Année 1	0,48	0,35	0,71	0,45	1,16	0,91	0,47	0,63	0,80	0,94	0,97	0,32
Année 2	1,11	0,78	1,22	1,43	5,00	2,38	1,61	3,00	3,02	2,13	2,39	0,51
Augmentation	129%	123%	71%	215%	330%	161%	244%	377%	276%	127%	146%	57%

Le Tableau 7 permet de comparer les rendements en grains obtenus au cours de la première et de la seconde année de culture. D'un point de vue général, les rendements en grains de la seconde année ont fortement augmenté en comparaison avec ceux de la première année. En effet, les rendements en deuxième année pour le même traitement ont augmenté en moyenne de 188% par rapport à la première année. Le SFR 12 (fumier traditionnel, lombricompost, compost chacun à 6 t MS ha⁻¹) présente l'augmentation de rendement le plus important entre les deux années de culture avec 377% d'augmentation. Le SFR 16 (témoin négatif) présente l'augmentation la plus faible avec 57%.

2.3.3.2. Rendement en paille

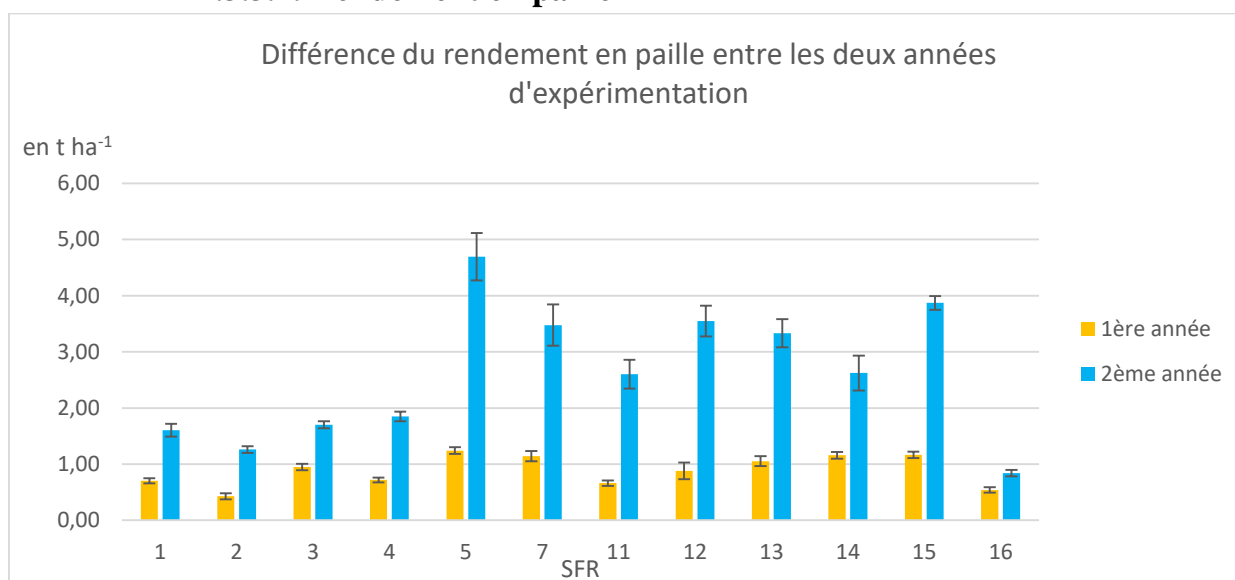


Figure 16. Différence de rendement en paille entre les deux années d'expérimentation

Concernant la différence au niveau des rendements en paille, la même tendance que le rendement en grains a été observée. Pour le rendement en paille, les traitements qui ont manifesté une plus importante augmentation du rendement en paille au cours des années sont les SFR 5 à 14. Et ces derniers ont tous bénéficié d'une inoculation.

2.4. Corrélation entre les performances écologiques et les performances agronomiques

Une ACP a été effectuée sur les variables et les cinq premiers axes ont été retenus. Ces axes expliquent 84,1% de la variance totale. L'axe F1 explique 40,3% de la variance tandis que l'axe

F2 en explique 15,7%. Les axes F3, F4 et F5 expliquent respectivement 11,2%, 9,8% et 7,1%. La contribution des variables à la formation des axes est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 6. Contributions des variables aux axes

Axes	Variables explicatives	R
F1	pH	0,778
	Densité de <i>P. corethrurus</i>	0,597
	Biomasse des adventices lors du 1 ^{er} sarclage	0,812
	Biomasse des adventices lors du 2 nd sarclage	0,901
	Première mesure de hauteur	0,780
	Seconde mesure de hauteur	0,929
	Seconde mesure du nombre de talles	0,930
	Rendement en grains	0,810
	Rendement en paille	0,919
F2	Taux d'humidité du sol de l'horizon 10-20 cm	0,636
	Densité apparente du sol à l'horizon 10-20 cm	0,762
	Mesure SPAD	0,670
F3	Densité apparente du sol à l'horizon 0-10 cm	0,817
	Première mesure du nombre de talles	0,603
F4	Densité de la macrofaune bénéfique de l'horizon 0-10 cm	-0,648
	Densité de la macrofaune nuisible	0,662
F5	Taux d'humidité du sol de l'horizon 0-10 cm	-0,570
	Densité de la macrofaune bénéfique de l'horizon 10-20 cm	0,529

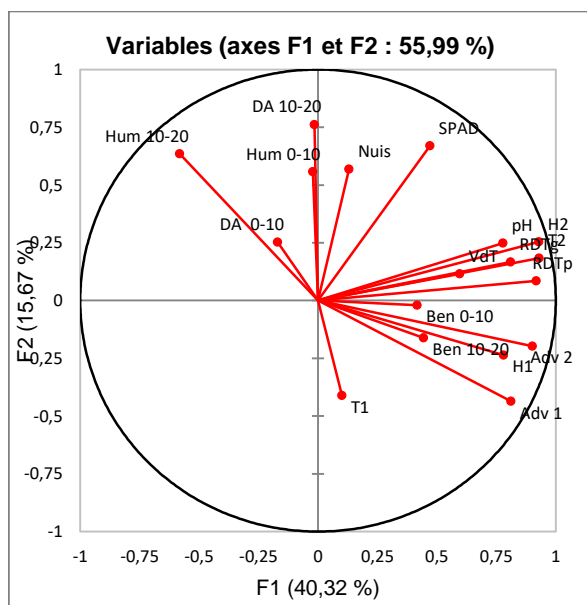


Figure 17a

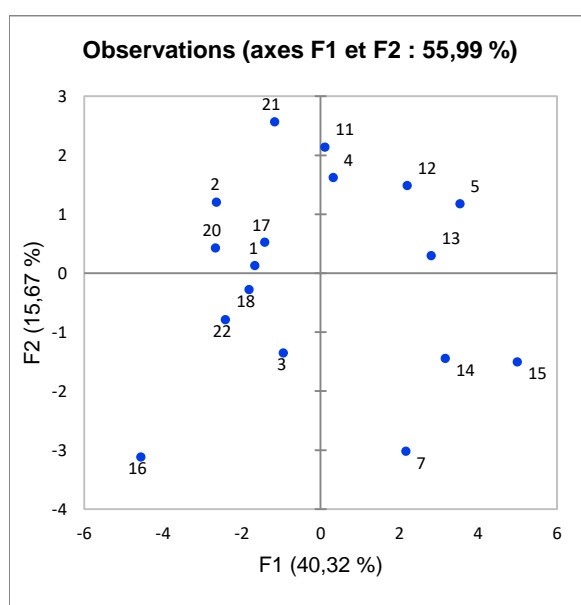


Figure 17b

Figure 17. Cercle de corrélation entre les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol avec les performances agronomiques (Figure 17a) et projection sur le plan factoriel 1-2 des traitements SFR testés (Figure 17b). (Hum 0-10) taux d'humidité sur l'horizon 0-10 cm du sol, (Hum 10-20) taux d'humidité sur l'horizon 10-20 cm du sol, (DA 0-10) densité apparente sur l'horizon 0-10 cm du sol, (DA 10-20) densité apparente sur l'horizon 10-20 cm du sol, (Ben 0-10) densité de macrofaune bénéfique recueillie dans l'horizon 0-10 cm, (Ben 10-20) densité de macrofaune bénéfique recueillie dans l'horizon 10-20 cm, (Nuis) densité de macrofaune nuisible recueillie au niveau des monolithes, (Adv 1) poids sec des adventices recueillis lors du premier sarclage, (Adv 2) Poids sec des adventices recueillis lors du second sarclage, (H1) hauteur des plants lors de la première mesure, (H2) hauteur des plants lors de la seconde mesure, (T1) nombre de talles des plants lors de la première mesure, (T2) nombre de talles des plants lors de la seconde mesure, (RDTg) rendement en grains, (RDTp) rendement en paille.

A partir du tableau 10 et de la Figure 17 qui représente la projection des individus et des variables sur le plan principal, les axes se caractérisent ainsi :

- **Axe F1 :** Cet axe regroupe la quasi-totalité des variables qui définissent les performances agronomiques des plants de riz (hauteur, nombre de talles, rendement en paille et en grains) ainsi que la biomasse des adventices lors des deux sarclages. Concernant les variables relatives aux performances écologiques, l'axe 1 regroupe le pH et la de *P. corethrurus*. Cet axe oppose des SFR différents : le SFR 5 (fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹) et tous les autres SFR constitués par des assemblages organiques de la première année (SFR 12, 13, 14 et 15) sont corrélés positivement à l'axe. Ils présentent donc des plants de riz avec une bonne hauteur et un tallage élevé au cours de leur cycle ainsi qu'un rendement élevé en paille et en grains. Le pH des sols de ces traitements est élevé ainsi que la densité de *P. corethrurus* et la colonisation par les adventices. Ces SFR sont opposés aux SFR 1, 2, 16,

17,18, 20 et 22 qui sont corrélés négativement à l'axe. Ils présentent donc de faibles performances agronomiques, un sol à pH faible avec une densité de *P. corethrurus* faible et une faible colonisation par les adventices.

- Axe F2 : Il est corrélé avec le taux d'humidité et la densité apparente du sol au niveau de l'horizon 10-20 cm ainsi que la valeur SPAD. Les SFR 3 (fumier traditionnel à 3 t MS ha⁻¹ + NPK à 40 kg MS ha⁻¹) et SFR 7 (lombricompost à 6 t MS ha⁻¹) sont corrélés négativement à cet axe : ils présentent donc un faible taux d'humidité du sol et une faible densité apparente au niveau de l'horizon 10-20 cm ainsi qu'une faible valeur de SPAD.

- Axe F4 : Il est corrélé négativement avec la densité de la macrofaune bénéfique de l'horizon 0-10 cm et positivement avec la densité de macrofaune nuisible. Cet axe est corrélé positivement avec le SFR 4 (fumier traditionnel à 6 t MS/ha) et le SFR 11 (fumier traditionnel à 6 t MS ha⁻¹ + prochimad à 500 kg ha⁻¹). Ces traitements présentent alors une densité plus faible de macrofaune bénéfique mais au contraire, une densité plus importante de macrofaune nuisible. L'axe F4 est corrélé négativement au SFR 21(NPK à 100 kg ha⁻¹ + urée à 100 kg ha⁻¹), qui présente alors une densité élevée macrofaune bénéfique et une densité plus faible de macrofaune nuisible.

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Chapitre 3 : DISCUSSION ET RECOMMANDATION

3.1. Impacts des traitements SFR sur les descripteurs écologiques du sol

3.1.1. Densité apparente du sol

Au niveau de la densité apparente du sol, l'absence de différence significative entre les traitements quel que soit l'horizon de sol, signifie que les traitements n'ont pas eu d'impact notable sur le tassement du sol. Cependant, la tendance observée montre que le tassement du sol est moins important au niveau du sol qui n'a reçu aucun apport et que le tassement du sol s'accroît au niveau d'un sol qui a reçu uniquement des engrais minéraux.

3.1.2. Taux d'humidité du sol

Il y a une différence significative au niveau de l'humidité du sol de l'horizon 10-20 cm entre les traitements. D'une manière générale, l'humidité est plus élevée au niveau des nouveaux SFR qui en sont à leur première année de culture. Les travaux de Boue (2013) démontrent que le labour du sol minimise l'infiltration de l'eau dans le sol et entraîne un dessèchement du sol. Dans le cas du présent essai, les parcelles des anciens SFR ont bénéficié d'un labour à la première année de culture et un autre à la seconde année. Pourtant les nouveaux SFR n'ont bénéficié que d'un seul labour. Probablement, ceci a permis à ces parcelles de conserver un taux d'humidité plus élevé.

3.1.3. pH du sol

Les traitements à base d'assemblage organique de fumier traditionnel, compost et lombricompost donnent les meilleurs résultats concernant l'augmentation de pH du sol. Cela peut être expliqué par les recherches de Sikuzani (2014). Selon ses travaux, les amendements organiques à base de compost donnent un pH du sol plus élevé que les amendements organiques à base de fumier. Cela explique alors que ces traitements qui contiennent du compost, donnent des mesures de pH du sol plus élevées. Cependant le SFR 5 à base de fumier amélioré présente aussi une valeur de pH du sol semblable aux assemblages organiques qui contiennent du compost. Il est donc performant quant à sa faculté à réduire l'acidité du sol.

L'efficacité de la quantité de matière organique apportée peut s'estimer en comparant le SFR 2 et le SFR 4. Ces deux traitements ont reçu du fumier traditionnel mais le premier à 3 t MS ha⁻¹ et le second à 6 t MS ha⁻¹. Sur les variations de pH, il y a une légère différence entre les deux traitements même si celle-ci n'est pas significative. L'augmentation de la quantité d'amendement organique utilisé n'a entraîné qu'une tendance à l'augmentation du pH. Cela signifie donc que même si la quantité d'amendement organique affecte positivement le pH du sol, l'amélioration du pH n'est pas proportionnelle à la quantité d'amendement apporté. Concernant les types d'amendements

organiques, leurs quantités et les assemblages formés, ces critères jouent également dans la variabilité du pH du sol. Les pratiques paysannes testées montrent la même aptitude quant à l'amélioration du pH du sol. Ainsi, le fumier traditionnel et la poudrette de parc présentent les mêmes capacités d'augmentation du pH du sol. Le traitement à base de fumier à 6 t MS ha⁻¹ et d'engrais minéraux démontre la même aptitude que le traitement à base de fumier uniquement à 6 t MS ha⁻¹. Cela signifie que l'effet acidifiant des engrais minéraux est atténué par l'amendement organique qui l'accompagne. Ce résultat est confirmé par les recherches de Bado (1997).

L'effet cumulé de l'apport d'amendement organique à chaque saison culturale a aussi influencé le pH du sol. C'est ce qui peut être observé au niveau des résultats obtenus. En effet, le pH du sol au niveau des traitements qui en sont à leur première année de culture (pH variant de 5,65 à 5,85) est plus élevé que celui des traitements en deuxième année de culture (pH variant de 5,72 à 6,32). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Cooper (1997) : les sols qui ont reçu des amendements organiques présentent une augmentation de pH. Cela s'explique par le fait que l'apport d'amendement organique riche en humus favorise la formation d'un complexe argilo-humique. Et ce complexe permet de capter les ions H⁺. La quantité d'ions H⁺ responsable de l'acidité dans la solution du sol diminue alors et entraîne une augmentation de pH. Les travaux de Bressoud et Pares (2010) sont en adéquation avec les résultats obtenus. En effet, ces travaux concernent un apport de matière organique sur un sol pendant une période de huit ans. L'utilisation de ces matières organiques, notamment au niveau du compost, a permis d'augmenter le pH du sol d'une unité au cours de cette période. L'apport d'amendement organique cumulé entraîne alors progressivement une augmentation du pH d'un sol. Il existe donc un effet cumulé de l'utilisation d'amendements organiques au cours du temps. Cependant, les traitements en seconde année de culture qui ont démontré une valeur de pH élevée sont aussi des traitements qui ont subi une inoculation de mutualistes. L'augmentation du pH au niveau de ces traitements ne serait alors pas seulement due aux amendements mais également à l'inoculation de mutualistes dans le sol.

La comparaison des variations de pH au cours des années de culture montre une augmentation de pH même pour le témoin négatif, qui n'a reçu aucun apport d'amendement organique. Cela laisse penser qu'il n'y a pas que l'apport d'amendement organique qui a joué dans l'augmentation du pH du sol. La modification de la rhizosphère du sol par la mise en culture peut être également une cause de l'augmentation du pH du sol. En effet, selon Hisinger (2010), la rhizosphère est spécifique en fonction des plantes et celles-ci peuvent avoir un effet acidifiant ou au contraire, un effet alcalinisant. L'augmentation du pH du sol au cours du temps, même au niveau du témoin négatif démontre alors que les racines du riz ont un effet alcalinisant sur le sol. La comparaison des variations de pH au cours des années de culture permet aussi de conclure qu'un très fort apport d'amendement organique (SFR 18) en une seule année n'est pas aussi efficace pour augmenter le pH qu'un effet cumulé (deux ans) d'un apport à 6 t MS (SFR 4).

3.1.4. Propriétés biologiques du sol

La densité des individus de macrofaune présents en fonction des traitements n'est significative que dans l'horizon 10-20 cm car la faune du sol a migré en profondeur étant donné que la saison des pluies a commencé à prendre fin. Les résultats montrent que ce sont les parcelles qui ont subi une inoculation de vers de terre durant leur cycle cultural qui présentent une densité de macrofaune bénéfique plus élevée. La question qui se pose est alors si le type et la dose d'amendements ont influencé la densité de macrofaune ou si cette densité n'a été influencée que par l'inoculation de vers de terre. L'analyse de variance au niveau des traitements sans considérer le *P. corethrurus* n'a démontré aucune différence significative entre les traitements. Cela signifie alors que la macrofaune bénéfique présente dans le sol (autre que *P. corethrurus*) n'est pas dépendante des amendements utilisés dans les traitements SFR. Le type et la dose d'amendement organique utilisé n'a pas influencé la présence de macrofaune bénéfique dans le sol. Les résultats de l'analyse de variance de la macrofaune néfaste aux cultures ont démontré qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements. De ce fait, les amendements organiques utilisés n'ont pas eu d'effet spécifique en ce qui concerne la prolifération de la macrofaune du sol que ce soit en ce qui concerne la macrofaune néfaste ou la macrofaune bénéfique.

3.2. Impacts des traitements SFR sur les performances agronomiques du riz

3.2.1. Hauteur des plants de riz au cours du cycle cultural

Les deux mesures de hauteurs démontrent la même tendance : les traitements de la première année, les traitements qui ont reçu des assemblages organiques à base de fumier traditionnel, compost et lombricompost à 2 t MS ha⁻¹ chacun ainsi que le SFR 4, à base de fumier amélioré, présentent une hauteur significativement plus grande que celle des autres traitements. Ce sont également les traitements qui ont bénéficié d'une inoculation de mutualistes dans le sol. Les facteurs qui ont alors joué dans une amélioration de la croissance des plantes sont alors la nature et la dose des amendements utilisés, l'effet cumulé de ceux-ci ainsi que la présence de mutualistes dans le sol. En effet, la stimulation de croissance des plantes mycorhizées est souvent associée à un effet bénéfique des champignons symbiotes sur la nutrition phosphatée des plantes-hôtes (Hatch, 1937 ; Mousain, 1989 ; Bolan, 1991 in Mousain *et al.*, 1997). La présence de mycorhize a alors permis d'améliorer la nutrition phosphatée des plants de riz et ainsi de permettre une meilleure croissance des plants de riz.

3.2.2. Nutrition azotée des plants de riz

La valeur SPAD permet de déterminer le niveau de nutrition azotée de la plante au cours de son cycle. Cela présente un intérêt du fait qu'il est possible d'estimer le pouvoir fertilisant des matières organiques utilisées. Le témoin positif, qui a reçu du NPK et de l'urée, présente logiquement la valeur SPAD la plus élevée. En effet, le NPK et l'urée sont riches en azote qui est très disponible pour la plante. De ce fait, la nutrition azotée de la plante se retrouve améliorée et c'est pourquoi,

un pic de mesure SPAD est visible au niveau de ce témoin positif. Certains traitements qui n'ont pas reçu d'apport d'engrais minéraux présentent également des valeurs SPAD assez élevées, sans différence significative avec le témoin positif. Cela signifie que malgré l'absence d'apport d'engrais minéraux, les matières organiques apportées jouent non seulement un rôle amendant pour le sol, mais permettent également une libération d'azote qui peut être disponible directement pour la plante (Akanza et Sanogo, 2017). Le SFR 5 fait partie de ces traitements dont les plants présentent une valeur SPAD élevée. Ce traitement est à base de fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹. Cette nutrition azotée élevée peut s'expliquer par le mode de fabrication du fumier amélioré. En effet, contrairement au fumier traditionnel, le fumier amélioré est conservé sous abri ce qui permet d'éviter une partie des pertes azotées par volatilisation (Salgado *et al.*, 2014). De plus, le SFR 5 est un des traitements qui a reçu une inoculation de mutualistes (vers de terre et mycorhize). La présence de mycorhize a alors pu impacter sur la nutrition azotée au niveau de ce traitement comme le démontre les essais de Rasolofoarimanana (2012) selon lesquels des plants de riz mycorhizés démontraient une meilleure nutrition azotée que des plants de riz non mycorhizés.

3.2.3. Rendements en grains de riz

Les rendements au niveau des différents traitements démontrent la même tendance que ce soit au niveau du rendement en paille ou du rendement en grains. En effet, il existe une très forte corrélation entre ces deux types de rendement. Le fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ est celui qui donne le meilleur rendement que ce soit au niveau des grains ou de la paille. Ce fumier est un bon amendement et fertilisant et il permet donc de limiter voire remplacer l'utilisation d'engrais minéraux, comme l'a fait remarquer Lacharme (2001). Le fumier amélioré est donc un bon amendement pour le sol et son mode de production permet de minimiser la perte en éléments fertilisants notamment l'azote, comme c'est possible de le voir au niveau des résultats de la nutrition azotée du riz ; mais c'est également une source d'éléments fertilisants pour la plante.

Cependant, il est important de souligner l'action des mutualistes du sol sur le rendement. La présence potentielle de mycorhizes au niveau des racines des plants inoculés a permis une meilleure nutrition azotée de la plante comme cela a été mentionné dans la partie « Nutrition azotée des plants de riz ». Quant aux vers de terre inoculés, leur présence a un impact particulièrement important sur le rendement 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).

Les résultats de la différence de rendement entre la première année et la seconde année a permis de mettre en évidence une différence de rendement importante entre les deux années de culture. Mais ce qui est remarquable, c'est qu'il existe une augmentation de rendement même au niveau du témoin négatif qui n'a reçu aucun apport pendant les deux années de culture. Normalement, la tendance aurait dû être la baisse de rendement pour ce traitement. Cependant, il est possible d'expliquer cette augmentation de rendement : à cause de l'acidité du sol, certains éléments

minéraux étaient présents dans le sol mais n'ont pas pu être disponibles pour la plante. Mais la modification au niveau de la rhizosphère grâce aux racines des plants de riz (Hisinger, 2010) a permis une augmentation du pH. Cette augmentation de pH a alors permis de rendre disponible les éléments minéraux du sol qui ne l'étaient pas auparavant et cela a permis d'augmenter les rendements même au niveau du témoin négatif qui n'a reçu aucun apport (Tran *et al.*, 1995 in Estevez, 2006). Les conditions climatiques en deuxième année ont certainement joué un rôle important pour l'amélioration du rendement de ce traitement négatif.

3.3. Effet de l'introduction de mutualistes sur les performances écologiques et agronomiques des pratiques SFR

3.3.1. Réussite de l'inoculation de *P. corethrurus*

Pour le cas du *P. corethrurus* qui a été inoculé, les résultats ont démontré une différence très significative entre la densité de cette espèce au niveau des traitements avec inoculation et sans inoculation. La densité au niveau des traitements sans inoculation, que ce soit ceux de la première ou de la seconde année, montre une densité de *P. corethrurus* de zéro ou proche de zéro. Cela signifie que la richesse naturelle de cette espèce au niveau du site est quasiment nulle. La conclusion est alors que tous les individus retrouvés dans les parcelles inoculées ont été présents grâce à l'inoculation, mais n'ont pas été initialement présents dans le sol avant l'inoculation.

Pour rappel, la densité de vers de terre inoculés a été de 50 individus m⁻². Les résultats obtenus après décompte de la macrofaune du sol ont montré que trois traitements (SFR 4, 13 et 14) parmi les 11 inoculés présentaient une densité supérieure à 50 individus m⁻². Dans ces parcelles, il y a donc eu forcément une multiplication des individus durant le cycle cultural. La raison de la multiplication du *P. corethrurus* vient d'abord du fait que les traitements qui ont été inoculés en sont à leur deuxième année de culture ; il y a donc déjà eu amélioration des propriétés physico-chimiques du sol due au traitement de l'année précédente et c'est cela qui a potentiellement permis le succès de la prolifération de cette espèce dans le sol, après son inoculation, comme le démontre les travaux de Darmawan *et al.* (2015). Mais, cette prolifération peut également s'expliquer par les caractéristiques de cette espèce. En effet, selon de nombreux travaux (Gonzalez *et al.*, 2006 ; Kale et Krishnamoorthy, 1979 in Darmawan *et al.*, 2015), le *P. corethrurus* est un vers de terre capable de s'adapter à des conditions variées notamment celles des agrosystèmes pluvieux des Hautes Terres de Madagascar (Ratsiatosika, 2018).

Concernant la répartition de *P. corethrurus*, il a été démontré que plus de 80% des individus sont concentrés dans l'horizon 10-20 cm. Pourtant cette espèce est une espèce endogée qui se retrouve préférentiellement jusqu'aux 15 premiers centimètres du sol (Rhigi, 1984 ; Razafindrakoto, 2012). Leur présence à une profondeur plus importante peut s'expliquer par le fait que la mesure de la macrofaune du sol s'est faite vers la fin de la saison des pluies. Comme les parcelles étaient alors plus sèches, les vers de terre ont migré en profondeur.

3.3.2. Impacts sur les descripteurs écologiques

3.3.2.1. Impacts sur les propriétés physiques du sol

Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de différences significatives entre les traitements en ce qui concerne les propriétés physiques du sol. Comme cela a déjà été dit précédemment, les amendements utilisés n'ont pas affecté les propriétés physiques du sol. Mais il n'y a pas non plus de différence significative entre les traitements inoculés (densité élevée de *P. corethrurus*) et les traitements non inoculés (densité quasiment nulle de *P. corethrurus*). La densité de cette espèce n'a donc pas influencé les propriétés physiques du sol. Pourtant, selon les travaux de Pashanashi *et al.* (1995), l'inoculation de vers de terre dans un sol a entraîné une tendance à la compaction du sol. Blanchart et Jouquet (2015) expliquent ce phénomène par la distinction de deux catégories de vers de terre : ceux à effet compactant sur le sol et ceux à effet décompactant. Les vers de terre à effet compactant produisent des bio-structures de grandes tailles dont l'accumulation entraîne une augmentation de la densité apparente du sol. Et, d'après Lapied et Lavelle (2013), le *P. corethrurus* fait partie des vers de terre à effet compactant : leur présence aurait donc dû entraîner une augmentation de la densité apparente sur les parcelles inoculées pour une densité inoculée suffisante. Les études menées par Ratsiatosika (2014) montrent qu'il nécessite une densité de 60 ind m⁻² afin d'observer un effet significatif de la présence de vers de terre. L'explication de l'absence de différence significative entre les traitements avec inoculation et sans inoculation peut s'expliquer par une densité trop faible de *P. corethrurus* pour avoir un impact significatif sur la densité apparente du sol. Cependant, le *P. corethrurus* est une espèce qui favorise l'agrégation du sol, donc entraîne une amélioration de structure (Ratsiatosika, 2018).

3.3.2.2. Impacts sur le pH du sol

Afin de voir les effets de l'inoculation de *P. corethrurus* et de l'inoculation de spores mycorhiziens sur le pH du sol, une comparaison du pH entre les deux années de culture a été effectuée. Cette comparaison a pu mettre en évidence une forte augmentation du pH du sol au cours de la seconde année de culture par rapport au pH de la première année. Particulièrement au niveau des traitements qui ont reçu une inoculation lors de la seconde année de culture. La tendance observée suggère une augmentation de pH plus importante que sur les autres traitements. Le pH a été influencé non seulement par l'effet (cumulé) des amendements organiques et la rhizosphère mais également par la présence de mutualistes dans le sol.

De même, il y a une possibilité que le pH ait lui-même influencé la densité de *P. corethrurus* dans le sol comme le montre les travaux de Darmawan *et al.* (2015) : l'abondance de *P. corethrurus* est significativement influencée par les propriétés physiques du sol et les éléments minéraux du sol. Selon les travaux de Chaudhuri *et al.* (2008) et Nath et Chaudhuri, (2010), les vers de terre de l'espèce *P. corethrurus* préfèrent des sols à pH inférieur à 5. De ce fait, la conclusion que l'on peut tirer est que c'est que l'augmentation du pH du sol n'a pas engendré une meilleure densité de *P.*

corethrurus étant donné que cette espèce préfère les sols acides. Peut-être même qu'une densité plus élevée de vers de terre aurait pu être retrouvée si le pH du sol avait été plus faible.

3.3.3. Impacts sur les descripteurs agronomiques

D'un point de vue amélioration des rendements au cours du temps, la comparaison des rendements en grains et en paille lors de la première année de culture et la seconde année de culture présente une différence importante. D'une manière générale, l'augmentation de rendement a été la plus importante au niveau des traitements qui ont reçu une inoculation de mutualistes. En effet, en moyenne, l'augmentation de rendement est de l'ordre de 235% pour les traitements avec inoculation contre 108% pour les traitements sans inoculation. Cela est en adéquation avec les travaux de Pashanasi *et al.* (1995) dans lesquels la production végétale a été significativement affectée par l'introduction de vers de terre au niveau des parcelles. En effet, les vers de terre agissent sur les plantes en libérant plus de nutriments et de phytohormones et en stimulant les symbioses entre plantes et microorganismes (Barot *et al.*, 2007, Chapuis-Lardy *et al.*, 2011 ; Bernard *et al.*, 2012 in Blanchart et Jouquet, 2015). Leur présence au niveau des parcelles inoculées peut alors expliquer l'augmentation plus importante de rendement au niveau de la seconde année de culture. Il y a eu en moyenne une augmentation de rendement de 234,5% au niveau des parcelles inoculées entre l'année 1 et l'année 2. Cette augmentation est due aux effets bénéfiques des vers de terres sur la disponibilité en éléments nutritifs pour la plante, notamment en phosphore (Raharijaona, 2016 ; Ratsiatosika, 2018).

De plus, il faut aussi considérer l'effet de l'inoculation de mycorhize en même temps que celle du *P. corethrurus*. La présence potentielle de mycorhize, en améliorant la nutrition de la plante, influe également sur le rendement. En effet, comme cela a déjà été dit précédemment, la présence de mycorhizes permet d'améliorer la nutrition phosphatée des plants de riz (Hatch, 1937 ; Mousain, 1989 ; Bolan, 1991 in Mousain *et al.*, 1997). Et comme le phosphore est généralement un élément limitant, une meilleure nutrition phosphatée est directement corrélée à un meilleur rendement. Cependant, il faut souligner qu'il est difficile, et même parfois impossible, de séparer le rôle des ingénieurs du sol comme les vers de terre des autres variables comme le traitement utilisé, les pratiques culturales (Blanchart et Jouquet, 2015). Ainsi, l'augmentation de rendement entre les deux années de culture n'est pas seulement due aux éléments apportés par les traitements ou à la présence de *P. corethrurus* et de mycorhizes comme cela vient d'être démontré. Elle est aussi due aux caractéristiques du climat (pluviométrie et température) et probablement à l'amélioration des propriétés du sol grâce aux amendements organiques qui ont alors permis d'améliorer la structure du sol par la formation de complexes argilo-humique. Ces complexes argilo-humiques ont permis de retenir les éléments nécessaires à la plante au lieu qu'ils soient perdus par lessivage ou par lixiviation (Tetelin, 2016). L'augmentation du pH du sol a lui aussi joué un rôle. Il a permis de rendre disponibles pour la plante certains éléments qui ne l'étaient pas à une certaine acidité du sol (Tran *et al.*, 1995 in Estevez, 2006).

3.4. Corrélation des indicateurs des performances agronomiques avec les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol

L'augmentation du pH du sol a présenté un effet non négligeable sur les performances agronomiques des plants, notamment sur le rendement. Selon Lacharme (2001), les plants de riz ont besoin d'un pH aux alentours de 5,5 à 6,0 pour permettre un rendement optimal. L'augmentation du pH du sol a donc permis de se rapprocher du pH optimal pour les plants de riz et cela a engendré une amélioration des performances agronomiques. Notamment on sait qu'une augmentation du pH peut améliorer la disponibilité en phosphore assimilable et que ce site présente une forte carence en cet élément. Quant à la densité de *P. corethrurus*, il a été dit précédemment que la forte densité de *P. corethrurus* provient de l'inoculation mais n'a pas vraiment été influencé par le type de traitement ou encore par les propriétés du sol comme le pH. Cependant, au vu de la corrélation positive de la densité de *P. corethrurus* avec les performances agronomiques, un effet bénéfique de la présence de *P. corethrurus* est visible, comme cela a été démontré dans la partie 3.3.3.

La prolifération des adventices en fonction des traitements est en corrélation positive avec les variables de performances agronomiques du riz. Cela était à prévoir car les amendements et les matières fertilisantes utilisées agissent de manière similaire sur la végétation. Donc, si le riz présente un bon développement ainsi qu'un bon rendement grâce à l'utilisation d'un amendement en particulier, il est normal que cet amendement ait un effet bénéfique pour les adventices du sol et donc qu'il y ait une croissance, voire une densité d'adventice plus élevée. Cependant, il faut souligner que la colonisation par les adventices au niveau du riz pluvial peut entraîner une importante baisse de production : lors du second mois de culture, les pertes en rendement potentiellement causées par les adventices sont de l'ordre de 70% (Merlier, 1982). L'expérience aurait pu alors montrer un résultat contraire : un bon amendement aurait permis un développement important des adventices aux dépens de la production de riz. Mais, comme le suivi et le sarclage des adventices s'est effectué correctement, les adventices n'ont pas eu d'effets importants sur le développement du riz et son rendement.

3.5. Recommandations et perspectives

3.5.1. Recommandations concernant les meilleurs traitements SFR

Grâce à l'ACP qui a été réalisée, il a été possible de faire un tri sur les différents SFR pour visualiser lesquels ont été les plus « performants ». Les traitements choisis ont été ceux qui présentent des performances agronomiques élevées. Ainsi, les traitements qui ont été retenus sont les suivants : le SFR 5, le SFR 12, le SFR 13, le SFR 14 et le SFR 15. Il est important de souligner que ces traitements sont tous des traitements « scientifiques » qui en sont à leur seconde année de culture et qui ont bénéficié d'une inoculation de mutualistes. Les traitements performants sont alors d'une manière générale des assemblages d'amendements organiques à 6 t MS ha⁻¹ ou du fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹, donc à une dose supérieure à celle utilisée en général par les paysans.

L'effet cumulé des amendements organiques durant les deux années de culture a permis des effets positifs sur performances écologiques. De plus, l'inoculation de vers de terre a pu influencer favorablement les performances agronomiques du sol.

Ces cinq SFR sont ceux qui présentent les meilleures performances agronomiques. Ils vont être comparés entre eux afin de voir quel est celui qui sera le plus efficace pour restaurer les sols tout en étant performant d'un point de vue agronomique. La Figure 18 présente ces traitements SFR et leurs performances au niveau des variables étudiées. Cette figure a été obtenue en attribuant à chacun des cinq traitements retenus une note de 0 à 10 en fonction de chaque descripteur. Cette note a été obtenue par interpolation en choisissant la valeur la plus basse obtenue comme équivalent à « 0 » et la valeur la plus haute obtenue comme équivalent à « 10 ».

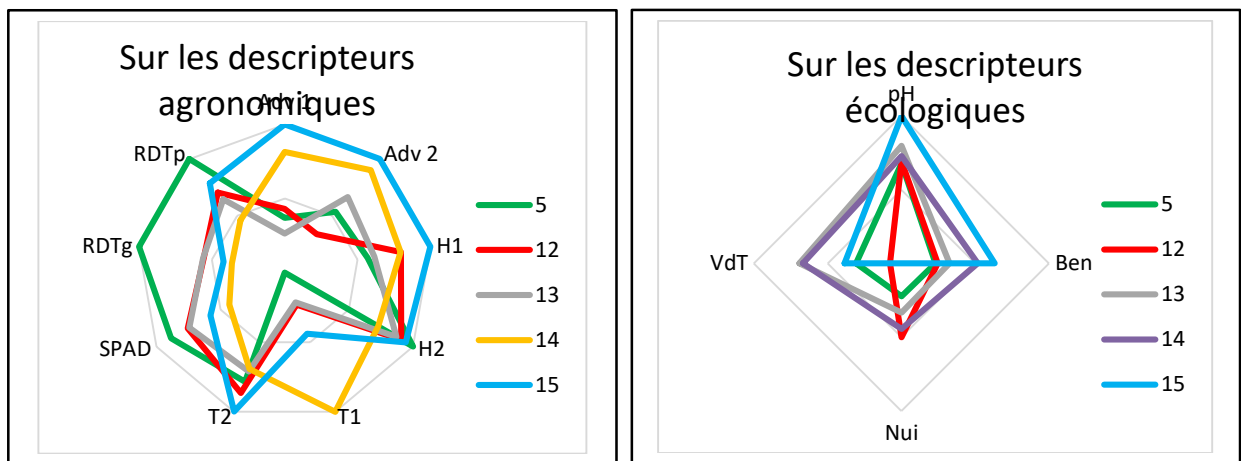


Figure 18a

Figure 18b

Figure 18. Comparaison des performances des SFR retenus, au niveau des performances agronomiques (Figure 18a) et au niveau des propriétés du sol (Figure 18b). (Hum 0-10) taux d'humidité sur l'horizon 0-10 cm du sol, (Hum 10-20) taux d'humidité sur l'horizon 10-20 cm du sol, (DA 0-10) densité apparente sur l'horizon 0-10 cm du sol, (DA 10-20) densité apparente sur l'horizon 10-20 cm du sol, (Ben) densité de macrofaune bénéfique recueillie au niveau de smonolithes (Nuis) densité de macrofaune nuisible recueillie au niveau des monolithes, (VdT) Densité de *Pontoscolex corethrurus*, (Adv 1) poids sec des adventices recueillis lors du premier sarclage, (Adv 2) Poids sec des adventices recueillis lors du second sarclage, (H1) hauteur des plants lors de la première mesure, (H2) hauteur des plants lors de la seconde mesure, (T1) nombre de talles des plants lors de la première mesure, (T2) nombre de talles des plants lors de la seconde mesure, (RDTg) rendement en grains, (RDTp) rendement en paille.

La Figure 18 montre que le SFR 5, à base de fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹, présente un rendement de loin beaucoup plus élevé que les autres traitements que ce soit le rendement en grains ou en paille ; il est donc le traitement le plus performant du point de vue agronomique. De plus, son utilisation engendre moins d'adventices que les autres traitements. Cependant, d'un point de vue

écologique, le SFR 5 présente une performance moindre. La valeur de pH de ce traitement est assez similaire aux quatre autres traitements. Cependant, la densité de macrofaune et de *P. corethrurus* est faible pour ce SFR comparé aux autres. Il présente également une colonisation plus faible par les adventices.

Le SFR 15, à base de fumier traditionnel, compost, lombricompost et guanomad ainsi que le SFR 13, à base de fumier traditionnel, de compost, de lombricompost et de cendre de pailles de riz, semblent être également des traitements intéressants. En effet, les performances écologiques sont meilleures au niveau de ces deux traitements. Cependant, si un choix entre ces deux traitements devait se faire, il serait plus judicieux de choisir le SFR 5. En effet, même si les performances écologiques de ce traitement semblent moins satisfaisantes que les autres, l'observation des résultats montre que la différence de ces descripteurs avec les autres traitements n'est pas significative. Néanmoins, une meilleure alternative serait l'association des deux traitements performants. Il serait préférable de changer le fumier traditionnel qui compose le SFR 13 ou le SFR 15 en fumier amélioré. Ainsi, il serait possible d'avoir de meilleurs résultats.

3.5.2. Perspectives pour les recherches futures

Le fumier amélioré présente des résultats très satisfaisant que ce soit dans la restauration du sol ou au niveau des rendements obtenus. Une perspective intéressante serait la sensibilisation des paysans à la fabrication du fumier amélioré plutôt que du fumier traditionnel ainsi qu'une meilleure diffusion de l'information sur la production de fumier amélioré. Les recherches futures devraient ainsi se tourner plus vers la valorisation de cet intrant comme dans son utilisation dans des assemblages minéraux ou organiques par exemple. Cependant, il faut tenir compte que les amendements utilisés et leur efficacité dépend fortement du lieu, du climat et du type de sol. Même si le fumier amélioré a été efficace pour cet essai, il ne le serait pas forcément dans d'autres régions, sur d'autres types de sol et de climat. Les recherches sur le sujet devraient être regroupées en une base de données regroupant les régions, les données climatiques et les données pédologiques, les types de traitements qui ont été testés et les résultats obtenus. Ainsi, une base de données sera disponible et utile non seulement pour les chercheurs qui souhaitent faire des essais mais aussi pour les agriculteurs qui désirent avoir des informations plus complètes sur les amendements à appliquer sur leur sol.

Concernant l'inoculation de mutualistes au niveau du sol, bien que les résultats aient démontré un effet de ces mutualistes sur les descripteurs écologiques et agronomiques, il reste encore difficile de séparer le rôle des ingénieurs du sol et des mutualistes avec les autres variables comme le traitement utilisé, les pratiques culturales (Blanchart et Jouquet, 2015). De ce fait, pour faciliter les recherches futures sur l'effet de ces mutualistes, des essais plus homogènes devraient être mis en place.

CONCLUSION

CONCLUSION

Cet essai sur la restauration des fonctions écologiques des sols sous riz pluvial s'est fixé comme objectif d'évaluer les performances écologiques et agronomiques de plusieurs pratiques de restauration des fonctions du sol. Il s'agit donc d'identifier des pratiques performantes pour restaurer écologiquement les sols et qui puissent en plus être performantes d'un point de vue agronomique. L'introduction de mutualiste au niveau des pratiques « scientifiques » à la seconde année de culture devrait avoir également engendré des impacts que ce soit sur les descripteurs écologiques ou ceux agronomiques.

La première hypothèse suggérait que les amendements à fortes doses et les assemblages d'amendements organiques ont un effet positif plus important sur les descripteurs écologiques du sol. Les résultats ont ensuite montré que parmi les descripteurs écologiques, c'est le pH qui a été influencé par les amendements organiques. Sur le type de matière organique, les assemblages organiques à base de fumier traditionnel, compost et lombricompost à 2 t MS ha⁻¹ chacun ainsi que le fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ ont induit des augmentations de pH du sol plus élevées que pour les autres traitements. Une conclusion a pu être également tirée concernant l'augmentation du pH en fonction de la quantité d'amendement : bien que la quantité d'amendement joue sur l'augmentation du pH, l'augmentation du pH en fonction de la dose apportée est moins que proportionnelle. Une autre tendance tirée de cet essai concerne l'effet cumulé des amendements organiques, bien que cette tendance doive encore être vérifiée au cours de futurs essais. Concernant les autres descripteurs écologiques, les résultats ont démontré que les types et les doses d'amendements organiques n'ont pas joué sur l'amélioration des propriétés physiques du sol, notamment la densité apparente et le taux d'humidité. Cependant, il faut tenir compte que le travail cumulé du sol au cours des deux années de culture a influencé le taux d'humidité du sol. Et du point de vue propriétés biologiques du sol au niveau de la macrofaune, les amendements n'ont pas eu d'effet particulier sur la densité de macrofaune au niveau des monolithes. La première hypothèse qui a été émise ne peut alors être confirmée que partiellement.

Selon la seconde hypothèse qui a été émise au début de l'essai : les amendements organo-minéraux permettent d'améliorer les performances agronomiques. Concernant les amendements organiques utilisés, les résultats ont démontré que la meilleure performance agronomique obtenue se trouve au niveau du fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹. Néanmoins, de bonnes performances agronomiques ont pu être retrouvées au niveau des assemblages organiques avec apports de matières minérales (SFR 13, 14 et 15). Les matières minérales jouent donc un rôle dans l'amélioration des performances agronomiques du sol mais la qualité des amendements utilisés joue un rôle plus important pour améliorer les performances agronomiques, notamment le rendement. L'amélioration des fonctions écologiques du sol, notamment au niveau du pH, permet d'avoir un impact positif sur les performances agronomiques du riz. Tous les traitements les plus performants d'un point de vue agronomiques présentent une valeur de pH plus élevée comparée aux autres. Les

autres propriétés du sol telles que la densité apparente et le taux d'humidité du sol ainsi que la densité de macrofaune n'ont pas conduit à des impacts notables sur les performances agronomiques du riz. Tout comme la première hypothèse, la seconde n'est vérifiée que partiellement.

La troisième hypothèse stipule que l'introduction des mutualistes conduit à des effets synergiques avec les amendements organiques et/ou minéraux et améliore les performances agronomiques et écologiques du système de production. Les résultats ont démontré que l'inoculation de vers de terre a réussi. La réussite de l'inoculation de vers de terre peut être expliquée par l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol depuis la première année et également par le fait que le *Pontoscolex corethrurus* est une espèce qui s'adapte facilement au milieu. Des effets positifs de l'inoculation mycorhizienne ont pu être observés même si la présence effective des mycorhizes n'a pu être vérifiée. La présence de vers de terre a impacté positivement les performances écologiques du sol notamment au niveau du pH. D'un point de vue agronomique, la présence de mutualiste a permis une meilleure biodisponibilité des éléments pour la plante et donc de meilleures performances agronomiques. La troisième hypothèse peut alors être confirmée.

L'essai a donc finalement permis de trouver des pratiques efficaces pour la restauration écologique du sol. Les assemblages d'amendements à base de fumier traditionnel, compost et lombricompost ainsi que le fumier amélioré à 6 t MS ha⁻¹ sont parmi les plus performants. Ces derniers ont permis de restaurer écologiquement les sols et ainsi d'obtenir de meilleures performances agronomiques. L'amendement le plus intéressant est cependant le fumier amélioré qui donne de meilleurs résultats agronomiques. Concernant l'inoculation, son effet reste visible malgré la difficulté à le séparer des effets des autres facteurs. Pour les prochains essais, il serait préférable d'augmenter la densité de vers de terre et d'homogénéiser l'introduction de mutualistes. Les résultats obtenus sont satisfaisants du point de vue amendement organique car le fumier amélioré pourrait se retrouver facilement sur le marché. Il faudrait néanmoins promulguer ce mode de production de fumier. Les perspectives sont nombreuses pour la continuité des essais et des traitements qui mettent plus en valeur l'utilisation de fumier amélioré devraient être testés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Akanza P., Sanogo S., 2017. Effet des fumures sur la fertilité, les composantes de rendement et diagnostic des carences du sol sous culture de riz sur les ferralsols en Côte d'Ivoire. *Journal de la société Ouest-Africaine de Chimie*. 43 : 1-10.
2. Altieri M. A., 1986. *L'Agroécologie: bases scientifiques d'une agriculture alternative*. Editions Debarb, Paris
3. Altieri M. A., 1999. The Ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74:19-31
4. Bado B.V., Sedogo M.P., Cescas M.P., Lompo F., Bationo A., 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahier Agriculture*. 6 : 571-575.
5. Barrios E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64 : 269-285.
6. Bender, A., and Beller, S., 2016. Probing the cultural constitution of causal cognition-a research program. *Front. Psychol.* 7 : 245.
7. BCP, 2013. Madagascar : Bilan commun de pays 2012. Avril 2013.103p.
8. Blanchart E., Jouquet P., 2015. Rôles des vers de terre et des termites pour la restauration de la productivité des sols en milieux tropicaux. In : *Restauration des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie*. IRD Editions, 10 : 249-258
9. Boue A., 2013. Analyse des effets conjugués travail du sol et culture associée sur la production de sorgho. Mémoire de fin de cycle en ue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en vulgarisation agricole. Université polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB). Institut du Développement Rural (IDR). 78p.
10. Bourgeat F., Aubert G., 1972. Les sols ferrallitiques à Madagascar. 25p.
11. Bressoud & Pares, 2010. Essai matière organique 2002-2010. INRA Alenya. Perpignan, 66.
12. Brussaard, L., de Ruiter P.C., Brown G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121,233–244.
13. Coleman D.C., 2015. Soil fauna : occurrence, biodiversity and roles in ecosystem function. 42p.
14. Cooper J.M., Warman P.R., 1997. Effects of three fertility amendments on soil dehydrogenase activity, organic C and pH. *Can. J. Soil Sci.* 3p.

15. Darmawan A., Atmowiddi T., Manalu W., Suryobroto B., 2015. *Pontoscolex corethrurus* (Müller, 1857) (*Oligochaeta glossoscolicedae*) in forest transformation system in Bungku Village, Jambi, Indonesia. Biodiversity Journal : 505-512.
16. Diallo D., Tamini Z., Barry B., Faya A. O., 2010. Effet de la fumure organique sur la croissance et le rendement du riz NERICA 3 à Faranah. International Journal of Biological and Chemical Sciences. 9p.
17. Dufumier M., 2009. Sécurité alimentaire et développement durable. Repenser l'agronomie et les échanges internationaux. Futuribles, n. 352, p. 25-42.
18. Dufumier M., 2010. Agroécologie et développement durable. ISDA 2010, 2010/06/28-2010/07/01, Montpellier (France).
19. Estevez B., 2006. L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité, Une préoccupation en agriculture ? Syndicat des producteurs de grains biologiques du Québec (SPGBQ). 25p.
20. FAO, 2015. Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. La FAO et les 17 Objectifs de Développement Durable. 8p.
21. Hinsinger P., 2010. Les racines au cœur du fonctionnement de la rhizosphère : Des connaissances pointues issues de la recherche aux applications possibles en AB. Alter Agri. 3p.
22. Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. Philos T Roy Soc B-Biol Sci 363:685–701.
23. Lacharme M., 2001. La fertilisation minérale du riz. Ministère du Développement Rural et de l'Environnement. Direction de la Recherche Formation Vulgarisation. 19p.
24. Lapied E. & Lavelle P., 2013. The peregrine earthworm *Pontoscolex corethrurus* in the East coast of Costa Rica. Pedobiologia 47 : 471–474.
25. Lavelle P., Bignell D., Lepage M., Wolters W., Roger P., Ineson P., Heal O. W., Dhillion S., 1997. Soil function in a changing world : the role of invertebrate ecosystem ingeneers. Eur. J. Soil Biol. 33 : 159-193.
26. Lavelle P., Spain A.V., 2001. Soil Ecology. Vadose Zone Journal. 11p.
27. Merlier H., 1982. La lutte contre les mauvaises herbes en riziculture pluviale en Côte d'Ivoire. Agronomie Tropicale. 3p.

28. Mousain D., Matumoto-Pintro P., Quiquampoix H., 1997. Le rôle des mycorhizes dans la nutrition phosphatée des arbres forestiers. Rev. For. Fr. XLIX - numéro spécial 1997. 15p.
29. Nahal I., 1998. Principes d'agriculture durable. ESTEM Editions Scientifiques, Techniques et Médicales, 75017 Paris. 138p.
30. Pashanashi B., Lavelle P., Alegre J., Charpentier F., 1995. Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on soil chemical characteristics and plant growth in a low-input tropical agroecosystem. 801-810.
31. Penot E., Rabouin L.M., Tokarski Y., Rakotofiringa A., Bodoy A., Ahmim-Richard A., Dabat M.H., Raharison T., Rakoto Harivony A. Razafimandimby S., 2016. Le rôle du riz pluvial. In : Processus d'innovation et résilience des exploitations agricoles à Madagascar. L'Harmattan. 410p.
32. Pouzet D., Chabaliet P. F., Velle A., 2007. Diagnostic de nutrition azotée au champ de la canne à sucre par mesure photométrique au chlorophylle-mètre (SPAD). 10p.
33. Raharijaona S. N. F., 2016. Effet de l'interaction entre vers de terre et matières organiques sur la disponibilité du phosphore et la production de biomasse du riz, cas du sol ferrallitique de Lazaina-Antananarivo. Mémoire en vue de l'obtention du Certificat d'Aptitude Pédagogique de l'École Normale (C.A.P.E.N.). École Normale Supérieure. Université d'Antananarivo. 121p.
34. Rasolofoarimanana L., 2012. Effet des champignons mycorhiziens à arbuscules sur la culture de riz infestée de *Striga asiatica* à Madagascar. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Étude approfondie (DEA) en Biologie et Écologie Végétale. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département de Biologie et Écologie Végétale. 72p.
35. Ratsiatosika H. O., 2014. Effet de l'introduction de vers de terre sur la croissance et le rendement du riz et du maïs associés à la dolique sur les Hautes Terres de Madagascar (Cas de Lazaina). Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 101p.
36. Ratsiatosika H. O., 2018. Vers de terres et services écosystémiques en riziculture pluviale à Madagascar. Connaissances des processus et proposition d'innovations agricoles. Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences agronomiques. École Doctorale Agriculture-Élevage- Environnement. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 220p.
37. Righi G., Bittencourt E. C. R., 1972. On the blood-system of *Pontoscolex corethrurus* (fr. Müller, 1857) (*Oligochaeta glossoscolicedae*). Soil Biologie Biochemistry. 178p.

38. Siagbe G., 2015. Effets de l'inoculation de vers de terre sur la production de maïs : expérimentations en milieux paysans. 59p.
39. Salgado P., Tillard E., Rarivoarimanana B., Decruyenaere V., Lecomte Ph. 2014. Management practices to conserve the fertilizer N value of dairy manure in Vakinankaratra region, Madagascar. International Conference, Agroecology for Africa, 03-07 November 2014, Antananarivo, Madagascar.
40. Sikuzani Y.U., Ilunga G.M., Mulembo T.M., Katombe B.N., Lwalaba J.L.W., Lukangila M.A.B., Lubobo A.K., Longanza L.B., 2014. Amélioration de la qualité des sols acides de Lumbumbashi (Katanga, RD Congo) par l'application de différents niveaux de composts de fumiers de poule. *Journal of Applied Biosciences*. 77 : 6523-6533.
41. Tetelin A., 2016. Valorisation du sol de plantation en milieu urbain pour des aménagements paysangers. Mémoire de fin d'étude de Master et d'Ingénieur de l'Institut Supérieure des Sciences agronomique, agroalimentaires, horticoles et du paysage, Agrocampus Ouest. 69p.
42. Thuita M., Pypers P., Herrmann L., Okalebo R.J., Othieno C., Muema E., Lesueur D., 2011. Commercial rhizobial inoculants significantly enhance growth and nitrogen fixation of a promiscuous soybean variety in Kenyan soils. *Biology and Fertility of Soils*. 48 : 87-96.

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe 1: DONNÉES CLIMATIQUES D'IVORY	I
Annexe 2 : RÉSULTATS D'ANALYSES DU SOL	II
Annexe 3 : DESCRIPTION DE LA VARIÉTÉ NERICA 4	III
Annexe 4 : DESCRIPTION DU <i>Pontoscolex corethrurus</i>	IV
Annexe 5 : COLLECTE DE VERS DE TERRE.....	V
Annexe 6. DATES DES MESURES EFFECTUEES DURANT LE CYCLE CULTURAL	VI
Annexe 7 : LOCALISATION DES MESURES SUR LA PARCELLE ÉLÉMENTAIRE	VII
Annexe 8 : FICHE TERRAIN HAUTEUR ET NOMBRE DE TALLES	VIII

Annexe 1: DONNÉES CLIMATIQUES D'IVORY

Températures

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
2007-2008	20,29	20,80	22,84	24,24	24,81	24,46	24,47	23,73	24,07	22,74	20,79	18,75
2008-2009	19,15	20,50	22,84	24,79	24,76	24,85	24,25	24,39	24,21	22,88	21,40	20,36
2009-2010	19,45	20,55	22,82	24,32	24,64	24,96	24,22	24,38	24,65	25,10	22,97	21,07
2010-2011	18,91	20,48	22,53	25,12	25,11	24,73	24,21	23,73	23,97	23,92	22,21	20,42
2011-2012	19,61	20,57	22,41	24,20	25,97	25,11	23,88	24,65	24,00	23,47	21,84	20,02
2012-2013	19,51	20,75	22,60	24,54	24,50	24,73	25,04	24,21	24,68	23,96	21,57	19,25
2013-2014	19,08	20,27	22,91	24,34	25,54	25,22	23,65	24,05	24,72	23,75	21,44	20,56
2014-2015	19,86	20,91	22,64	24,59	25,61	25,46	24,05	23,52	23,99	24,50	22,53	20,17
2015-2016	20,55	21,12	22,93	24,23	25,14	24,90	24,94	24,50	24,00	23,94	21,28	20,12
2016-2017	19,45	20,28	22,29	24,07	24,67	25,02	25,14	24,99	24,81	23,53	22,64	21,13

Précipitations

	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
2007-2008	0	0	1	22,5	169	215	94	271,5	55	25	11,5	2
2008-2009	0	0,5	2,5	59	174,5	249	292,5	201,5	254	84,5	0,5	2
2009-2010	10	39	0	63,5	130	155,5	208	288	210,5	13	5,5	7,5
2010-2011	0	17	0	50,5	281,5	254	441	200,5	341,5	190	40	0
2011-2012	0	20	45	5	108,5	203,5	273,5	132	113,5	92	8	1
2012-2013	0	0	0	147	137	286	290	348	170	57	19	1
2013-2014			7,5	90,0	148,5	190,5	320,5	297,0	100,0	34,5	6,0	
2014-2015	29,5		23,0	20,5	114,5	201,5	615,0	435,5	348,0	12,0	44,5	1,0
2015-2016		11,0		38,0	101,0	283,0	268,0	302,8	264,9	2,5	14,0	6,5
2016-2017			5,0	14,5	272,0	183,0	294,5	302,0	179,0	83,5	9,5	13,5

Annexe 2 : RÉSULTATS D'ANALYSES DU SOL

❖ Analyse granulométrique du sol du site

A%	LF%	LG%	SF%	SG%
34	12	4	11	39

A% : Argile ; LF : Limon fin ; LG : Limon grossier ; SF : Sable fin ; SG : Sable grossier

❖ Analyse chimique du sol du site

Variable	pH eau	CO	N tot	P Olsen	CEC
Unité		g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹	cmol.kg ⁻¹
Valeur	4,83	15,22	1,53	3,86	1,49

CO: Carbone organique; N tot : Azote total; P Olsen : Phosphore ; CEC: capacité d'échange cationique;

Annexe 3 : DESCRIPTION DE LA VARIÉTÉ NERICA 4

La variété de riz Nerica 4 a été créée par Africa Rice. Il s'agit d'une lignée pure dont l'origine géographique provient de Warda en Côte d'Ivoire.

Cycle d'adaptation

La variété Nerica 4 provient du groupe morphologique *Oryza sativa* × *Oryza glaberrima*. Il s'agit d'une variété à vocation pluviale qui s'adapte à de basse et moyenne altitudes (inférieures à 1300 m). Le cycle semis-floraison dure 84 jours en moyenne tandis que le cycle semis-maturité dure 116 jours.

Caractéristiques végétatives et agronomiques

La variété Nerica 4 présente des plants à port érigé avec une bonne aptitude au tallage et une hauteur moyenne de 103 cm environ. Cette variété est intéressante du fait de sa résistance à la verse et à l'égrenage ainsi qu'au *Striga asiatica*, qui est particulièrement ravageur dans le Moyen-Ouest. De plus, elle est également résistante à la pyriculariose avec une fertilité des épillets de l'ordre de 86%. Le rendement moyen dans des conditions optimales de croissance est autour de 5,2 t MS ha⁻¹.

Les graines de cette variété présente des glumelles glabres et dorées comme le montre le cliché 4. Les grains sont longs avec une longueur de 9,3 mm et une largeur de 2,6 mm. L'apex est non coloré tandis que le péricarpe présente une couleur blanche. Le poids de 1000 grains de cette variété est estimé à 27 g.



Grains de Nerica 4

Annexe 4 : DESCRIPTION DE *Pontoscolex corethrurus*

Classification

- ❖ Règne : Animalia
- ❖ Phylum : Annelida
- ❖ Classe : Clitellata
- ❖ Sous-classe : Oligochaeta
- ❖ Ordre : Crassicitellata
- ❖ Sous-ordre : Lumbricina
- ❖ Super-famille : Lumbricoidea
- ❖ Famille : Glossoscolecidae
- ❖ Genre : *Pontoscolex*
- ❖ Espèce : *Pontoscolex corethrurus* (Müller, 1857)

Morphologie

Le *P. corethrurus* présente une longueur pouvant varier de 6 à 8 cm. Cependant, d'autres auteurs tels que Blakemore en 2002 affirment que leur longueur peut atteindre jusqu'à 14,2 mm. Le diamètre de leur corps varie de 4 à 6 mm et ils présentent des segments dont le nombre est compris entre 166 et 210 avec une présence potentielle d'annulations secondaires. Le corps du *P. corethrurus* ne présente pas de pigmentation. Ses glandes calcifères sont alors 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.

Anatomie

Le système nerveux afférent du *P. corethrurus* se distingue par la présence de vaisseaux afférents septo-pariétaux et par l'absence de vaisseaux afférents néphridiens.

Une zone caudale spéciale de 5 à 7 segments commence aux segments 120 à 130 ; sa circulation est plus développée, avec une paire de vaisseaux typiques. L'intestin est divisé en trois régions.

À partir du segment 19, la topographie vasculaire est modifiée par la céphalisation.

Les organes génitaux sont irrigués à travers les segments adjacents 10 et 14 avec une anastomose constituant un système de sécurité. Dans les segments 7, 8 et 9 à 10, la disposition des vaisseaux a un plan commun, mais dans le segment 7, une paire de vaisseaux ventro-tégumentaires provient des cœurs latéraux. Les vaisseaux ventral et dorsal sont doubles dans la région antérieure (Righi & Bittencourt, 1972).

Distribution géographique

Le *P. corethrurus* est un vers de terre endogé, qui se trouve préférentiellement au niveau des quinze premiers centimètres de sol. Cette espèce est originaire de la Guyane mais se retrouve actuellement aussi bien dans les régions méditerranéennes que tropicales et subtropicales.

Annexe 5 : COLLECTE DE VERS DE TERRE

Certains SFR ont été inoculés avec des vers de terre et des mycorhizes. Pour les vers de terres, il faut d'abord qu'ils soient collectés et placés dans un endroit afin de les élever. La collecte s'est faite à Andranomanelatra. Il s'agit de la collecte du vers *Pontoscolex corethrurus*, qui est un vers de terre répandu en milieu tropical. Il s'agit d'un vers de terre endogée caractérisé par une tête de couleur rougeâtre.

Il est plus facile de le trouver en saison de pluies, donc il a fallu attendre le début des pluies avant de pouvoir les collecter. Un labour à proximité de l'eau d'un canal de drainage a été effectué. Le labour se fait de manière à ne pas trop pulvériser les mottes de terres car cela risquerait de détruire les vers. Les mottes de terre sont délicatement pulvérisées à la main afin d'y trouver les vers de terre. Ces derniers sont ensuite placés dans une cuvette avec un peu de terre et à l'abri du soleil. Si la partie antérieure des anneaux du vers se coupe, celui-ci peut encore survivre et il est ainsi collecté. Mais à partir du moment où la tête du vers de terre à partir du clitellum est touchée, celui-ci ne peut plus survivre. Il ne sera donc pas collecté. De plus, les vers qui sont récoltés sont uniquement de l'espèce *Pontoscolex corethrurus*, il faut faire attention à les distinguer des autres espèces avant de les collecter.

Après la collecte, les vers de terre sont comptés à l'aide d'un peu d'eau. Ils sont ensuite replacés dans des cuvettes avec de la terre et ils sont alors transportés au lieu d'élevage dans de la terre qui se recouverte de paille.

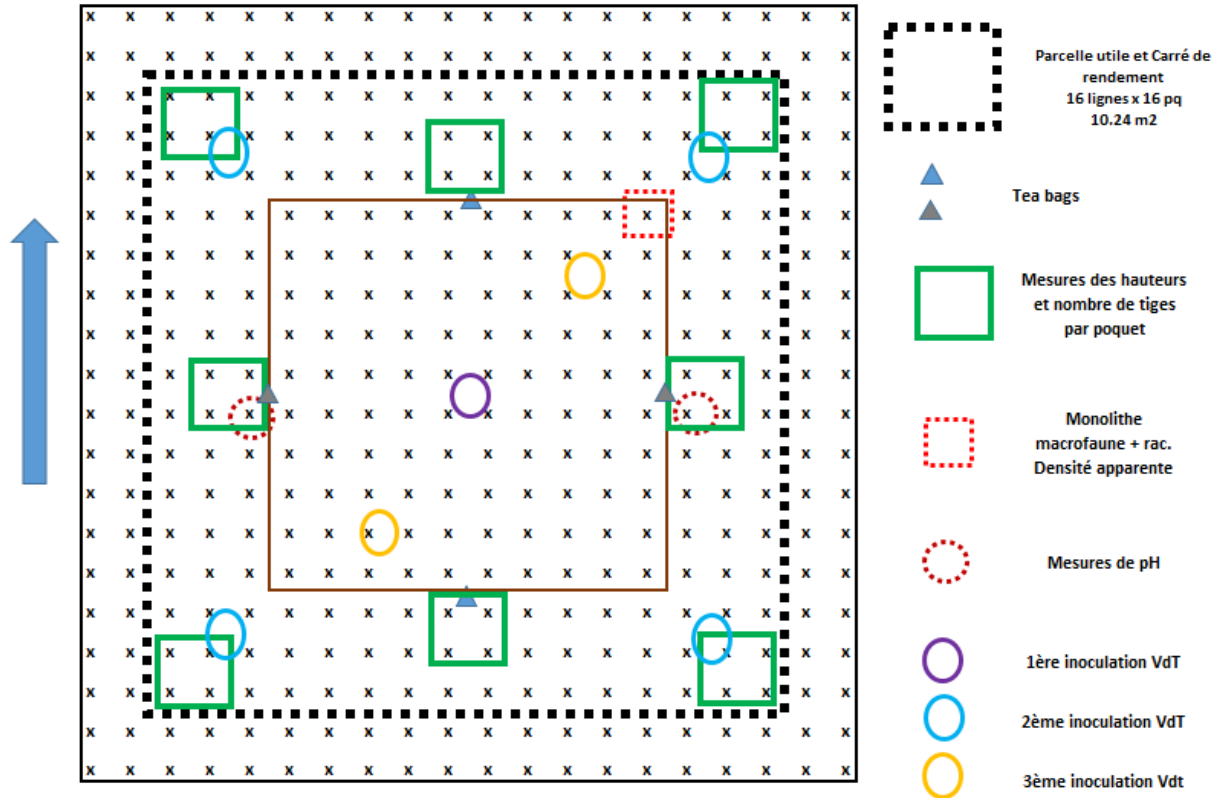
Quantité de vers de terre inoculés

	1 ^{ère} inoculation	2 ^{ème} inoculation	3 ^{ème} inoculation
Date d'inoculation	27/11	11/12	15/01
Nombre de vers de terre inoculés	10 480	18 217	7 040

Annexe 6. DATES DES MESURES EFFECTUEES DURANT LE CYCLE CULTURAL

Mesures	Dates
1 ^{ère} mesure de hauteur et nombre de talles	21/12
2 ^{ème} mesure de hauteur et nombre de talles	01-04/02
Mesures SPAD	01-04/02
Mesure de la macrofaune	19-21/02
Mesure de la densité apparente	20-21/02
Mesure de pH	02/04

Annexe 7 : LOCALISATION DES MESURES SUR LA PARCELLE ÉLÉMENTAIRE



**Annexe 8 : FICHE TERRAIN HAUTEUR ET NOMBRE DE
TALLES**

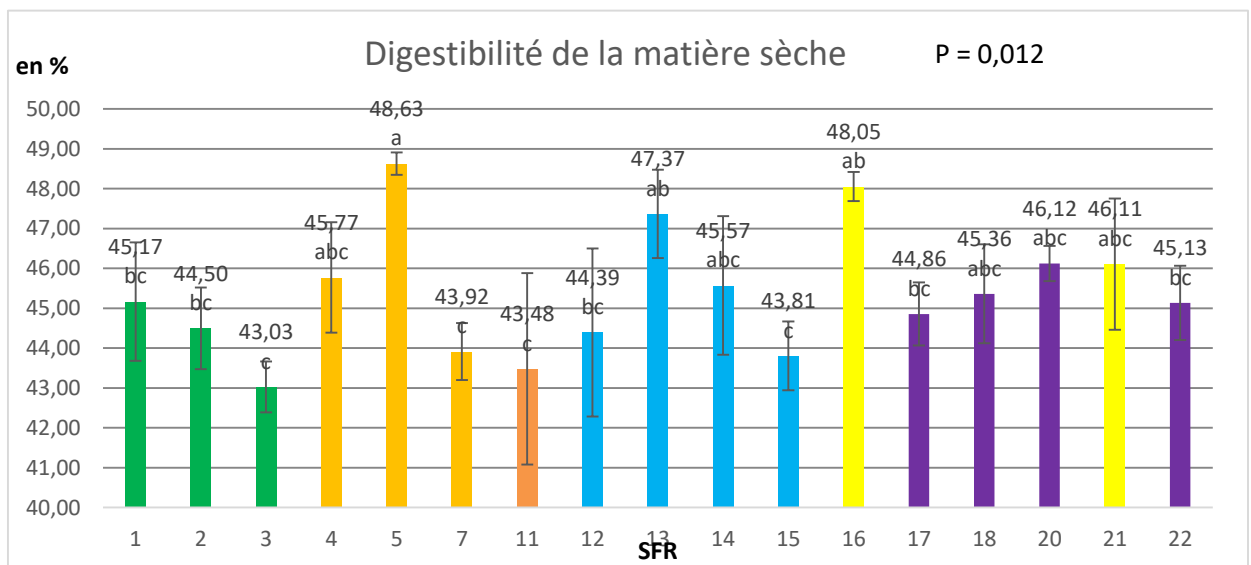
			1	2	3	4	5	6	7	8
B1	SFR	15								
B1	SFR	15								
B1	SFR	8								
B1	SFR	8								
B1	SFR	19								
B1	SFR	19								
B1	SFR	10								
B1	SFR	10								
B1	SFR	14								
B1	SFR	14								
B1	SFR	13								
B1	SFR	13								
B1	SFR	1								
B1	SFR	1								
B1	SFR	12								
B1	SFR	12								
B1	SFR	20								
B1	SFR	20								
B1	SFR	21								
B1	SFR	21								
B1	SFR	11								
B1	SFR	11								
B1	SFR	7								
B1	SFR	7								
B2	SFR	14								
B2	SFR	14								

Annexe 9 : RÉSULTAT D'ANALYSE DE LA PAILLE

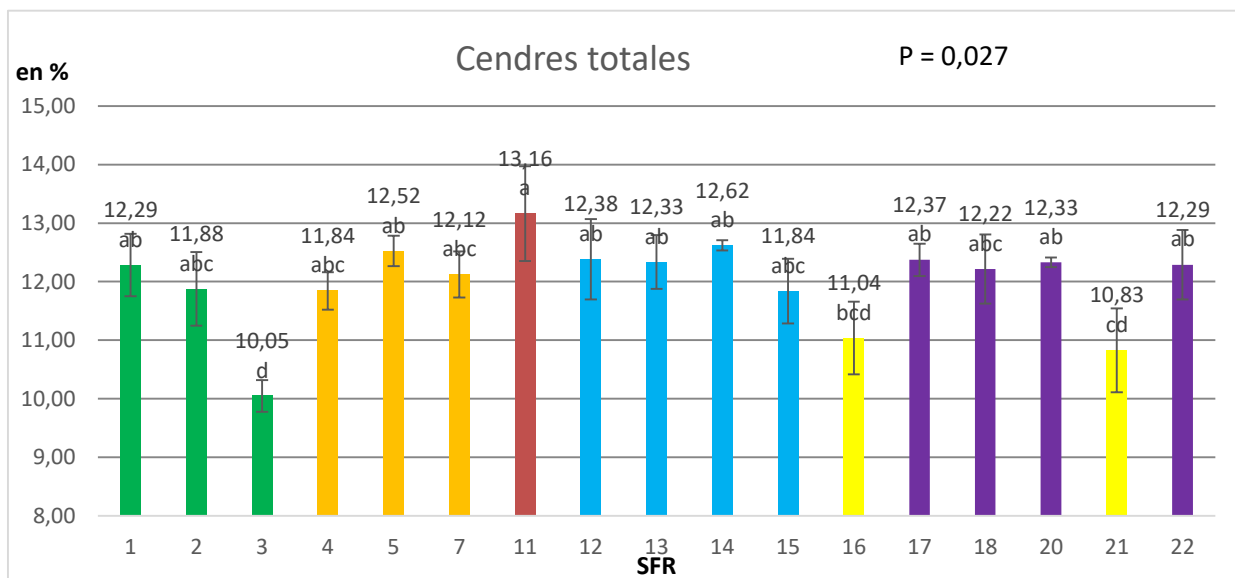
Des analyses ont été effectuées sur la paille en fonction des traitements. Pour cela, sept mesures ont été effectuées : (i) la Digestibilité de la Matière Sèche (DMS), (ii) les Cendres Totales (CT), (iii) la Cellulose Brute (CB), (iv) *Neutral Detergent Fiber* (NDF), (v) *Acid Detergent Fiber* (ADF), (vi) *Acid Detergent Lignin* (ADL) et (vii) la Matière Azotée Totale (MAT). Une analyse de variance a été effectuée sur chacune des mesures. Le tableau suivant montre les p-value obtenues pour chacune des mesures :

Mesures	DMS	CT	CB	NDF	ADF	ADL	MAT
P-value	0,012	0,027	0,666	0,110	0,438	0,222	0,225

D'après ces analyses, il n'existe pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne les mesures de CB, NDF, ADF, ADL et MAT. Cependant, il existe une différence significative entre les traitements en ce qui concerne la digestibilité de la matière sèche (DMS) et les cendres totales (CT). Les figures suivantes montrent les différences entre les traitements en ce qui concerne la DMS et la CT :



Digestibilité de la matière sèche de la paille



Cendres totales de la paille

Concernant la digestibilité de la matière sèche, le SFR 5 est celui qui présente la digestibilité la plus élevée avec 48,63%. Cependant, les comparaisons multiples par paires montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre ce SFR 5 et les SFR 4, 13, 14, 18, 20 et 21. Le pourcentage le plus faible est enregistré au niveau de SFR 3 avec 43,63.

Quant aux cendres totales, le pourcentage le plus élevé se retrouve au niveau du SFR 11 avec 13,16. Il faut cependant noter qu'il y a une différence significative seulement au niveau du SFR 11 avec les SFR 16, 21 et 3. Ce dernier est celui qui présente le pourcentage le plus faible avec 10,05.

Annexe 10 : RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES

Annexe 10-1 : ANOVA de la densité apparente de l'horizon 0-10

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,145	0,008	0,462	0,964
Erreur	43	0,710	0,017		
Total corrigé	62	0,855			

Annexe 10-2 : ANOVA de la densité apparente de l'horizon 10-20

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,467	0,025	1,145	0,345
Erreur	43	0,923	0,021		
Total corrigé	62	1,390			

Annexe 10-3 : ANOVA du taux d'humidité de l'horizon 0-10

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	74653227,846	3929117,255	5,477	0,164
Erreur	43	30846736,201	717365,958		
Total corrigé	62	105499964,047			

Annexe 10-4 : ANOVA du taux d'humidité de l'horizon 10-20*

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	100,386	5,283	3,195	0,035
Erreur	43	71,104	1,654		
Total corrigé	62	171,489			

Annexe 10-5 : ANOVA de la mesure du pH

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	3,282	0,173	4,108	< 0,0001
Erreur	42	1,766	0,042		
Total corrigé	61	5,048			

Annexe 10-6 : Test de Kruskal-Wallis de la densité de macrofaune bénéfique de l'horizon 0-10

K (Valeur observée)	12,978
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,674
Alpha	0,05

Annexe 10-7 : Test de Kruskal-Wallis de la densité de macrofaune bénéfique de l'horizon 10-20

K (Valeur observée)	33,484
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,006
Alpha	0,05

Annexe 10-8 : Test de Kruskal-Wallis de la densité de macrofaune bénéfique de l'horizon 10-20 sans considérer le *Pontoscolex corethrurus*

K (Valeur observée)	16,093
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,446
Alpha	0,05

Annexe 10-9 : Test de Kruskal-Wallis de la densité de macrofaune nuisible au niveau des monolithes

K (Valeur observée)	20,753
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,188
Alpha	0,05

Annexe 10-10 : ANOVA de la quantité de macrofaune bénéfique capturé au niveau des *pitfall-trap*

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	40,946	2,155	1,919	0,039
Erreur	43	48,280	1,123		
Total corrigé	62	89,227			

Annexe 10-11 : Test de Kruskal-Wallis de la quantité de macrofaune nuisible capturé au niveau des *pitfall-trap*

K (Valeur observée)	12,863
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,683
Alpha	0,05

Annexe 10-12 : ANOVA de la première mesure de hauteur

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	320,134	16,849	5,882	< 0,0001
Erreur	43	123,177	2,865		
Total corrigé	62	443,311			

Annexe 10-13 : ANOVA de la seconde mesure de hauteur

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	3434,694	180,773	4,629	< 0,0001
Erreur	43	1679,179	39,051		
Total corrigé	62	5113,873			

Annexe 10-14 : ANOVA de la première mesure de nombre de talles

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,577	0,030	1,673	0,081
Erreur	43	0,781	0,018		
Total corrigé	62	1,358			

Annexe 10-15 : ANOVA de la seconde mesure de nombre de talles

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	60,771	3,198	0,980	0,501
Erreur	43	140,389	3,265		
Total corrigé	62	201,160			

Annexe 10-16 : Test de Kruskal-Wallis du poids en MS des adventices du premier sarclage

K (Valeur observée)	41,798
K (Valeur critique)	26,296
DDL	16
p-value (bilatérale)	0,000
Alpha	0,05

Annexe 10-17 : ANOVA du poids en MS des adventices du second sarclage

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	41,295	2,173	4,097	< 0,0001
Erreur	43	22,812	0,531		
Total corrigé	62	64,107			

Annexe 10-18 : ANOVA des mesures SPAD

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	74744793473952100000,000	3933936498629060000,000	2,745	0,003
Erreur	43	61617028992845600000,000	1432954162624320000,000		
Total corrigé	62	136361822466798000000,000			

Annexe 10-19 : ANOVA du rendement en grains

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	18,355	0,966	7,903	< 0,0001
Erreur	43	5,256	0,122		
Total corrigé	62	23,612			

Annexe 10-20 : ANOVA du rendement en paille

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	11,878	0,625	10,924	< 0,0001
Erreur	43	2,461	0,057		
Total corrigé	62	14,338			

Annexe 10-21 : Test de Kruskal-Wallis de la densité de *Pontoscolex corethrurus*

K (Valeur observée)	21,163
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Annexe 10-22 : Contribution des axes de l'ACP

