



AGRICULTURE TROPICALE &
DEVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable

Parcours : Biofonctionnement du Sol et Environnement

Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
au grade de Master II

EFFETS DES FERTILISANTS BIO-ORGANIQUES SUR LA RESILIENCE CLIMATIQUE DU RIZ PLUVIAL FACE AU STRESS THERMIQUE

Présenté par **RAKOTOMANANA Rojotiana Marco**

Promotion ANDRARANGY Mahasedra (2018-2023)

Soutenu le 17 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Docteur/HDR RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa
Examineur : Docteur RAMIFEHIARIVO Nandrianina
Maitre de stage : Docteur/HDR BLANCHART Eric
Encadrant : Docteur/HDR RAMANANKAJA Landiarimisa





AGRICULTURE TROPICALE &
DEVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable

Parcours : Biofonctionnement du Sol et Environnement

Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
au grade de Master II

**EFFETS DES FERTILISANTS BIO-ORGANIQUES SUR
LA RESILIENCE CLIMATIQUE DU RIZ PLUVIAL
FACE AU STRESS THERMIQUE**

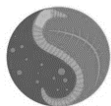
Présenté par **RAKOTOMANANA Rojotiana Marco**

Promotion ANDRARANGY Mahasedra (2018-2023)

Soutenu le 17 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Docteur/HDR RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa
Examineur : Docteur RAMIFEHIARIVO Nandrianina
Maitre de stage : Docteur/HDR BLANCHART Eric
Encadrant pédagogique : Docteur/HDR RAMANANKAJA Landiarimisa



INNOV'EARTH



Institut de Recherche
pour le Développement



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire :

- Docteur/HDR RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa, Enseignant chercheur et Responsable de la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D) de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA)) pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de ce mémoire ;
- Docteur RAMIFEHIARIVO Nandrianina, Enseignant à l'AT2D en tant que membre du jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail ;
- Docteur/HDR BLANCHART Eric, Chercheur IRD (Institut de Recherche pour le Développement), en tant que maître de stage au sein du Laboratoire des Radio-Isotopes (LRI) et du projet Innov'Earth, pour son encadrement attentif et ses conseils avisés qui ont été déterminants tout au long de mon stage et durant les phases de rédaction.
- Docteur/HDR RAMANANKAJA Landiarimisa, Enseignant chercheur à l'ESSA, mon encadrant pédagogique, pour le temps qu'elle m'a consacré et pour ses conseils qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.
- Monsieur RANDRIANTSOA Toky et Monsieur RAZAFIMAHAFALY Damase pour leur encadrement rigoureux tout au long de l'expérimentation. Leur expertise et Leur disponibilité ont été des atouts majeurs dans la réalisation de ce travail.

Ma reconnaissance s'étend au projet Innov'Earth, Innovative Earthworms, pour son appui technique et financier indispensable à la réalisation de cette étude.

Je tiens à remercier Professeur RAZAFIMBELO Tantely, pour m'avoir accueilli au sein du LRI, et Docteur RATSIATOSIKA Onja, de m'avoir confié cette étude.

Je tiens ensuite à remercier le corps enseignant et le personnel de l'ESSA pour toutes les connaissances acquises qui ont façonné mon parcours académique et professionnel.

Merci à ma famille et à ma promotion Andrarangy Mahasedra.

Misaotra
RAKOTOMANANA M.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
1 MATERIELS ET METHODES	4
1.1 Matériels utilisés	4
1.2 Méthodologie	8
1.3 Variables mesurées	14
1.4 Analyses statistiques	17
2 RESULTATS	18
2.1 Taux de survie des vers de terre	18
2.2 Hauteur	19
2.3 Nombre de talles.....	20
2.4 Indices de la végétation	21
2.5 Biomasses végétales	22
2.6 Ratio Shoot/Root.....	24
2.7 Paramètres racinaires.....	25
2.8 Quantité d'azote et de phosphore dans la biomasse aérienne	26
2.9 Biodisponibilité de phosphore dans le sol.....	28
2.10 Emission de CO ₂	29
3 DISCUSSIONS.....	30
3.1 Effets des lombricomposts et des vers de terre sur la croissance du riz pluvial en condition normale de température	30
3.2 Effets des lombricomposts et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz pluvial en situation de stress thermique	34
3.3 Limites et suggestions d'améliorations	37
3.4 Perspectives d'applications pratiques de l'étude.....	38
CONCLUSION	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	i
LISTES DES ANNEXES.....	vii

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Teneur en carbone et en azote des lombricomposts et quantités apportées par 12,06 g/pot.....	8
Tableau 2 : Température dans la salle d'expérimentation	10
Tableau 3 : Liste des modalités croisées des trois facteurs étudiés (situation climatique, type de lombricompost et inoculation de vers de terre)	12
Tableau 4 : Récapitulatif du taux de survie	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du site de prélèvement du sol à Imerintsiatosika	5
Figure 2 : Hauteur du riz à la fin de l'expérience.....	19
Figure 3 : Nombre de talles finals du riz	20
Figure 4 : Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	21
Figure 5 : Photochemical Reflectance Index (PRI).....	21
Figure 6 : Biomasses racinaires en condition de stress thermique	22
Figure 7 : Biomasses aériennes, racinaires et totales du riz	23
Figure 8 : Ratio shoot/root	24
Figure 9 : Nombre des racines primaires	25
Figure 10 : Longueur des racines primaires	26
Figure 11 : Quantité d'azote dans la biomasse aérienne	27
Figure 12 : Quantité de phosphore dans la biomasse aérienne	27
Figure 13 : Phosphore assimilable du sol.....	28
Figure 14 : Gaz carbonique dégagé.....	29

LISTE DES CLICHÉS

Cliché 1 : Design des pots utilisés pour l'expérimentation	11
Cliché 2 : Pot de plantation et pot annexe	16
Cliché 3 : Disposition des pots dans la salle d'incubation du LRI.....	16
Cliché 4 : Mesure de l'émission de CO ₂ avec un chromatographe en phase gazeuse.....	16

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

0D	: Sans inoculation de vers de terre
1D	: Simple densité avec 3 individus par pot
2D	: Double densité avec 6 vers par pot
AMY	: Lombricompost produit par le vers <i>Amyntas minimus</i>
ANOVA	: Analysis of variance
ATP	Adénosine Triphosphate
BA	: Biomasse aérienne
BR	: Biomasse racinaire
EIS	: Lombricompost produit par le vers <i>Eisenia fetida</i>
EUD	: Lombricompost produit par vers <i>Eudrilus eugeniae</i>
FOFIFA	: Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra (Centre national de recherche appliquée au développement rural)
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
Innov'Earth	: Innovative Earthworms
LED	: Light Emitting Diode
LRI	: Laboratoire des RadioIsotopes
MS	: Matière Sèche
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NPK	: Azote, Phosphore, Potassium
ONG AMADESE	: Association Malagasy pour le Développement Economique, Social et Environnemental
<i>P.corethrurus</i>	: <i>Pontoscolex corethrurus</i>
PERMANOVA	: Permutational Multivariate Analysis of Variance
PPFD	: Photosynthetic Photon Flux Density
PRE	: Pré-compost
PRI	Photochemical Reflectance Index
TN	: Condition de température normale
TS	: Condition de stress thermique

GLOSSAIRE

Endogés : catégories des vers de terre vivant dans les couches minérales du sol (Bouché, 1977)

Epigés : catégories des vers de terre vivant à la surface ou dans les couches superficielles de la litière (Bouché, 1977)

Fertilisant bio-organique : une combinaison d'organismes fonctionnellement bénéfiques, comme les bactéries, les champignons et les vers de terre, avec des fertilisants organiques (Ahmed *et al.*, 2011)

Intensification écologique : approche agricole visant à augmenter la production tout en minimisant l'impact environnemental, en s'appuyant sur les processus écologiques naturels et la biodiversité pour remplacer ou réduire l'utilisation d'intrants chimiques (Tittonell, 2014)

Lombricompost : produit de compostage de la matière organique issu de l'utilisation de vers de terre (Manyuchi *et al.*, 2013)

Macrocosme : termes particulièrement utilisés dans le domaine de l'expérimentation qui décrivent différents niveaux d'organisation, le macrocosme peut désigner une expérimentation dans l'environnement naturel complet ou en plein champ (Odum, 1971).

Mésocosme : dispositif expérimental de taille intermédiaire entre microcosme et macrocosme, utilisé dans des conditions contrôlées mais plus réaliste (Odum, 1971).

Microcosme : désigne le niveau le plus petit, il peut s'agir de petits systèmes contrôlés en laboratoire qui simulent des processus spécifiques (Odum, 1971).

Pré-compost : le produit du pré-compostage, qui fait référence à la première phase de dégradation de la matière organique avant l'intervention des vers de terre dans le processus de lombricompostage (Frederickson, *et al.*, 2007)

Résilience climatique : capacité à s'adapter aux perturbations climatiques ou à revenir à un régime de routine face à un milieu changeant (Oliveira *et al.*, 2019)

Santé des sols : état d'un sol capable à fonctionner et d'assurer une productivité de biomasse végétale sur le long terme (Sarhou, 2016)

Socio-système : ensemble intégré et interdépendant comprenant les composantes sociales (structures sociales et pratiques sociales), les composantes écologiques (écosystème), et leurs interactions (Griffon, 2013)

Solutions fondées sur la nature : ensemble d'actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de la société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et les avantages pour la biodiversité (Cohen-Shacham *et al.*, 2016)

Stress thermique : augmentation de la température au-delà d'un niveau seuil pendant une période suffisante pour causer des dommages irréversibles à la croissance et au développement des plantes (Wahid *et al.*, 2007).

RESUME

Face au changement climatique impactant l'agriculture des Hautes Terres de Madagascar, cette étude évalue l'efficacité des fertilisants bio-organiques pour renforcer la résilience du riz pluvial aux stress thermiques. L'objectif était d'analyser les effets de différents lombricomposts combinés à diverses densités de vers de terre sur la croissance et l'adaptation du riz pluvial. L'expérimentation en mésocosmes, menée en conditions contrôlées, a comparé trois types de lombricomposts AMY, EIS et EUD (issus respectivement des espèces *Amyntas minimus*, *Eisenia fetida* et *Eudrilus eugeniae*) et un pré-compost (PRE) et trois densités de vers de terre 0D, 1D et 2D (correspondant à 0, 3 et 6 individus/pot). Les plants de riz ont été exposés à des températures normales (26°C/18°C jour/nuit) et de stress (31°C/18°C jour/nuit pendant 2 semaines). En conditions normales, le lombricompost EIS associé à une densité modérée de vers de terre (1D = 3 individus/pots soit 150 individus.m⁻²) a permis d'obtenir les teneurs en phosphore assimilable les plus élevées (1,95 ± 0,19 mg.P.kg⁻¹ sol). Cette combinaison s'est avérée bénéfique pour les Ferralsols, sols prédominants des Hautes Terres, en augmentant le phosphore assimilable et favorisant une meilleure architecture racinaire. Sous stress thermique, les lombricomposts EIS et AMY ont renforcé la résilience du riz, améliorant sa nutrition minérale et maintenant son activité photosynthétique. Les vers de terre ont favorisé une allocation préférentielle des ressources vers les parties aériennes, bien que l'effet synergique avec les lombricomposts n'ait pas été observé. De ce fait, cette étude démontre le potentiel de la fertilisation bio-organique pour améliorer la résilience du riz pluvial face au changement climatique. L'adoption de cette approche agroécologique, basée sur des ressources locales, pourrait transformer les systèmes rizicoles pluviaux, les rendant plus productifs et résilients. Des recherches complémentaires sur d'autres cultures vivrières et en conditions de plein champ permettraient d'affiner ces recommandations pour une adoption à grande échelle, contribuant ainsi à renforcer la sécurité alimentaire.

Mots clés : Stress thermique, Ferralsols, Lombricompost, *Eisenia fetida*, Disponibilité du phosphore

ABSTRACT

In response to climate change affecting agriculture in the Highlands of Madagascar, this study evaluates the effectiveness of bio-organic fertilizers in enhancing the resilience of rainfed rice to thermal stress. The objective was to analyze the effects of different vermicomposts combined with various earthworm densities on the growth and adaptation of rainfed rice. The mesocosm experiment, conducted under controlled conditions, compared three types of vermicomposts AMY, EIS, and EUD (derived from the species *Amyntas minimus*, *Eisenia fetida*, and *Eudrilus eugeniae* respectively), a pre-compost (PRE), and three earthworm densities 0D, 1D, and 2D (0, 3, and 6 individuals/pot). Rice plants were exposed to normal temperatures (26°C/18°C day/night) and stress conditions (31°C/18°C day/night for 2 weeks). Under normal conditions, EIS vermicompost associated with a moderate density of earthworms (1D) resulted in the highest levels of available phosphorus in the soil ($1,95 \pm 0,19 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ soil}$). This combination proved beneficial for Ferralsols, the predominant soils of the Highlands, by increasing available phosphorus and promoting better root architecture. Under thermal stress, EIS and AMY vermicomposts enhanced rice resilience, improving its mineral nutrition and maintaining its photosynthetic activity. Earthworms favored a preferential allocation of resources to the aerial parts, although a synergistic effect with vermicomposts was not observed. Thus, this study demonstrates the potential of bio-organic fertilization to improve the resilience of rainfed rice to climate change. The adoption of this agroecological approach, based on local resources, could transform rainfed rice systems, making them more productive and resilient. Further research on other food crops and under field conditions would help refine these recommendations for large-scale adoption, thereby contributing to strengthening food security.

Keywords: Thermal stress, Ferralsols, Vermicompost, *Eisenia fetida*, Phosphorus availability

FINTINA

Noho ny fiovan'ny toetr'andro, izay misy fiantraikany amin'ny fambolena eto amin'ny faritry ny afovoan-tanin'i Madagasikara, dia natao ity fikarohana ity mba handrefesana raha toa ka mandaitra tokoa ny fampifangaroana ny zezika biolojika sy organika amin'ny fanamafisana ny fahafahan'ny vary an-tanety mizaka ny hafanana ambony. Araka izany dia notanterahina ny andrana anaty toerana voafehy ka nampitahaina tamin'izany ny fampifangaroana zezika tain-kankana karazany telo (*Amyntas minimus*, *Eisenia fetida* sy *Eudrilus eugeniae*) sy zezika komposta tsotra ary ny fitondrana kankana amin'ny tany amin'ny fatra telo samihafa: 1D (tsy misy kankana), 2D (kankana 3/tavy) sy 3D (kankana 6/tavy). Ankoatran'ireo dia nampisedraina karazana mari-pana roa ny voly vary: mari-pana mahazatra (26°C/18°C andro/alina) sy hafanana ambony (31°C/18°C andro/alina nandritra ny roa herinandro). Ny vokatry azo tamin'ny andrana tamin'ny mari-pana mahazatra dia nahitana fa ny fampifangaroana ny zezika tain-kankana avy amin'ny *Eisenia fetida* sy ny fitondrana kankana amin'ny fatra antonony (1D) no nanatsara ny tahan'ny faosiforo. Ity karazana fampifangaroana zezika biolojika sy organika iray ity araka izany no nisy fiantraikany tsara ho an'ny fambolena amin'ny tany mena na "Ferralsols" izay karazatany tsy ampy faosiforo nefa hita matetika aty amin'ny faritry ny afovoan-tanin'i Madagasikara. Tamin'ny fampiharana ny hafanana ambony kosa dia tsy nahitana fiantraikany mifanontona ny zezika tain-kankana sy ny fitondranana kankana amin'ny tany. Fa kosa, ny zezika tain-kankana avy amin'ny *Eisenia fetida* sy *Amyntas minimus* irery dia afaka manatsara ny fitombon'ny vary na dia misy aza ny hafanana ambony sedrainy. Ny fitondrana kankana amin'ny tany amin'ny fatra antonony irery ihany koa dia afaka manampy ny fitombony vary na dia ao anaty hafanana ambony. Noho izany ity fikarohana ity dia mampiseho fa ny zezika biolojika sy organika dia ahafahana manatsara ny fahafahan'ny vary miatrika ny fiovan'ny toetr'andro. Ny fampiharana ity teknika agroekolojika iray ity, izay miainga amin'ny fampiasana ny akora voajanahary misy eto an-toerana, dia afaka manatsara ny voly vary an-tanety sy hatohitra ny fiantraikan'ny hafanana ambony. Tsy ny vary an-tanety ihany anefa no misedra ity olan'ny fiovan'ny toetr'andro ity. Noho izany dia tsara kokoa raha hitarina amin'ny voly fihinanana hafa ity andrana teknika fampifangaroana ny zezika tainkanana sy ny fitondrana kankana amin'ny tany ity mba hanamafisana ny ady amin'ny tsy fanjarian-tsakafo.

Teny fototra : Hafanana ambony, "Ferralsols", zezika tain-kankana, kankana *Eisenia fetida*, tahan'ny faosiforo

INTRODUCTION

Les dernières décennies ont été marquées par une augmentation mondiale des températures ambiantes en raison de l'accumulation continue des gaz à effet de serre anthropiques notamment le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote, dans l'atmosphère (Farooq *et al.*, 2023). Le rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) (2023) prévoit que l'augmentation de la température pourrait dépasser 2°C d'ici la fin du siècle. Cette augmentation provoque des irrégularités des pluies et de températures. Ces irrégularités représentent le changement climatique qui désigne une modification globale et continue des caractéristiques climatiques et météorologiques de la Terre qui à leur tour augmentent les stress abiotiques (thermiques, hydriques, etc.) et biotiques (ravageurs, maladies) sur les cultures (Kikstra *et al.*, 2022). L'agriculture est particulièrement vulnérable au changement climatique. En particulier, les stress thermiques résultant du changement climatique impactent négativement la croissance et le développement des cultures, affectant finalement leurs rendements (Peng *et al.*, 2004). Selon Yoshida (1973), la croissance du riz est compromise au-delà d'une température de 31°C. En plus de cette augmentation de la température, la variabilité de répartition et de quantité des pluies conduisent également à l'instabilité des calendriers rizicoles (Randriamarolaza & Aguilar 2023). À Madagascar, cette situation contraint les paysans malgaches à s'adapter en modifiant leur calendrier cultural, notamment en décalant la période des semis du riz (Mandimbiniaina, 2009). Cependant, les baisses des rendements rizicoles observées récemment témoignent encore de leur manque de résilience face au changement climatique (Harvey *et al.*, 2014).

La situation est particulièrement critique sur les Hautes Terres de Madagascar, où l'agriculture familiale repose principalement sur des pratiques agricoles traditionnelles et reste dominée par le riz (Raboin *et al.*, 2013). Ces pratiques ancestrales présentent des limitations importantes dans le contexte actuel. En effet, de nombreux agriculteurs n'apportent pas ou peu de fertilisants sur leurs cultures de riz, ou utilisent des fumiers traditionnels généralement moins riches en nutriments. Cette approche, autrefois suffisante, se révèle de plus en plus problématique face aux défis du changement climatique. En plus des contraintes climatiques, le riz pluvial (cultivé sur les hautes altitudes au-delà de 1 300 m) est confronté à des contraintes économiques et édaphiques dont les pratiques de gestion des cultures sous-optimales et les faibles rendements en riz (Ratsiatosika *et al.*, 2021). De plus, les sols des Hautes Terres sont des Ferralsols carencés en de nombreux nutriments essentiels, en particulier le phosphore. Ces sols sont également pauvres en azote, calcium et magnésium ce qui limitent le développement des organismes du sol et des plantes et constituent alors un frein supplémentaire à la productivité agricole (Raminoarison *et al.*, 2020). Dans ce contexte difficile, le changement climatique risque d'aggraver davantage l'insécurité alimentaire déjà présente (PAM, 2018).

Face à ces multiples défis, il est crucial d'améliorer les pratiques agricoles pour les adapter au changement climatique. La transition agroécologique est reconnue comme une approche prometteuse. C'est un moyen qui propose des solutions fondées sur la nature menant à des socio-systèmes plus désirables (Griffon, 2013). Selon la FAO (2018), l'intensification écologique peut transformer les systèmes de production agricole en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources (biodiversité, sols, eau, nutriments) et en minimisant les impacts sur l'environnement. Cette approche agroécologique devrait permettre de renforcer la résilience des écosystèmes face au changement climatique notamment en promouvant la biodiversité et la santé des sols (Altieri *et al.*, 2015).

Il est impératif que les scientifiques, les agriculteurs et les autres parties prenantes développent et adoptent cette nouvelle stratégie respectueuse de l'environnement. Les fertilisants bio-organiques qui représentent l'une des solutions fondées sur la nature pourraient atténuer les effets du changement climatique sur l'agriculture. Un fertilisant bio-organique se définit par une combinaison d'organismes fonctionnellement bénéfiques avec des fertilisants organiques. Ces organismes fonctionnels sont principalement des microorganismes comme des bactéries ou des champignons (Ahmed *et al.*, 2011). Pourtant, il est également possible d'inoculer des invertébrés tels que des vers de terre. A Madagascar, le projet Innov'earth propose aux agriculteurs d'Imerintsiasika un fertilisant bio-organique à base de vers de terre constitué du lombricompost et de l'inoculation des vers de terre. En effet, des ateliers avec des agriculteurs ont mis en évidence leurs perceptions négatives des engrais chimiques et leur forte attirance pour les ressources organiques riches en nutriments telles que les lombricomposts (Raharimalala & Audouin, 2021). Plusieurs espèces de vers de terre épigés sont exploitées par les paysans malgaches pour la production de lombricompost. La plus utilisée dans le lombricompostage à Madagascar est le ver de compost ou ver rouge de Californie (*Eisenia fetida*) (Ranaivoarisoa *et al.*, 2016 ; Raharison *et al.*, 2022). C'est une espèce introduite à Madagascar, mais il y a aussi des espèces indigènes utilisées en lombricompostage dont *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus*, *Amyntas corticis* et *Dichogaster saliens* (Blanchart *et al.*, 2019). Selon Vambe *et al.* (2023), le lombricompost contient des nutriments, des turricules de vers de terre, des populations microbiennes bénéfiques et des hormones de croissance qui aident les cultures à mieux résister à divers stress abiotiques. En outre, la littérature a largement mis en évidence l'importance des vers de terre, démontrant leur apport bénéfique sur la nutrition du riz (Trap *et al.*, 2021), la croissance du riz selon les cultivars (Ratsiatosika *et al.*, 2021), la résistance aux maladies (Blanchart *et al.*, 2020). Grâce à ces multiples effets positifs du lombricompost et des vers de terre, la fertilisation bio-organique à base de vers de terre peut se présenter comme une solution durable face aux stress abiotiques liés au changement climatique.

La question de recherche qui se pose est alors : ***Dans quelle mesure la fertilisation bio-organique associant lombricompost et inoculation de vers de terre permet-elle d'améliorer la résilience du riz pluvial face aux stress thermiques ?***

L'objectif général de cette étude est d'évaluer les effets de la fertilisation bio-organique par apport combiné de différents types de lombricomposts (produits par *Eisenia. fetida* et des espèces indigènes) et de différentes densités d'inoculation de vers de terre sur la résilience du riz pluvial soumis à des conditions de stress thermique.

Pour mener à bien l'étude, deux objectifs spécifiques sont visés :

- OS 1 : Déterminer les effets de différents traitements combinant lombricomposts et vers de terre sur la croissance du riz pluvial en condition normale de température.
- OS 2 : Déterminer le type de lombricompost et la densité d'inoculation de vers de terre optimaux qui améliore la résilience du riz pluvial face aux stress thermiques.

Les hypothèses émises en réponse à ces objectifs sont :

- H1 : En l'absence de stress thermique, la croissance du riz sera meilleure avec l'apport combiné de lombricompost de meilleure qualité chimique produit par l'espèce *Eisenia fetida* et d'une plus forte densité de vers de terre.
- H2 : En conditions de stress thermique, l'application combinée de lombricompost de meilleure caractéristique chimique produit par l'espèce *Eisenia fetida* et d'une forte population de vers de terre permettra une meilleure résilience du riz pluvial.

Dans cette étude seront exposés, en premier lieu, les matériels et méthodes pour les expérimentations, ensuite les résultats et en dernier lieu, les discussions et recommandations sur le sujet.

1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'expérimentation a été menée de mars à juin 2023 au Laboratoire des Radioisotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo (Madagascar).

1.1 Matériels utilisés

1.1.1 Le sol

Le sol d'expérimentation a été prélevé à proximité du site expérimental du projet Innov'earth à Imerintsiatosika, région Itasy (19°05'40"S ; 47°25'65"E), à une altitude de 1296 m (Figure 1). En effet, au sein du site expérimental proprement dit, divers tests impliquant l'utilisation de différents fertilisants sont en cours, ce qui induit une hétérogénéité significative des propriétés des sols. Pour éviter tout biais potentiel lié à cette variabilité pédologique, les échantillons de sol ont été prélevés dans une zone adjacente, où les propriétés du sol sont plus homogènes. Selon la taxonomie mondiale des sols, le sol prélevé est classé comme **Ferralsol** (WRB, 2014), type de sol représentatif des Hautes-Terres Centrales de Madagascar (Rabeharisoa, 2004). Pour cette étude, seul l'horizon 0 - 10 cm a été prélevé.

Le site de prélèvement est caractérisé par un sol de défriche, non cultivé depuis une dizaine d'années. Les analyses physico-chimiques du sol de ce site de prélèvement ont déjà été effectuées lors d'une étude antérieure (Raminoariso *et al.*, 2020). Ces analyses ont révélé un pH très acide (4,70) caractéristique des Ferralsols tropicaux. La faible teneur en C total (29,2 g.kg⁻¹) et la texture argilo-limono-sableuse observées sont aussi représentative des Ferralsols, avec une prédominance d'argiles kaolinitiques. Cette composition confère à ce type de sol une capacité d'échange cationique faible (1,73 cmol⁺.kg⁻¹), limitant sa fertilité naturelle. Les propriétés physico-chimiques détaillées de ce sol, incluant sa teneur en éléments nutritifs, sont présentées en Annexe 1.

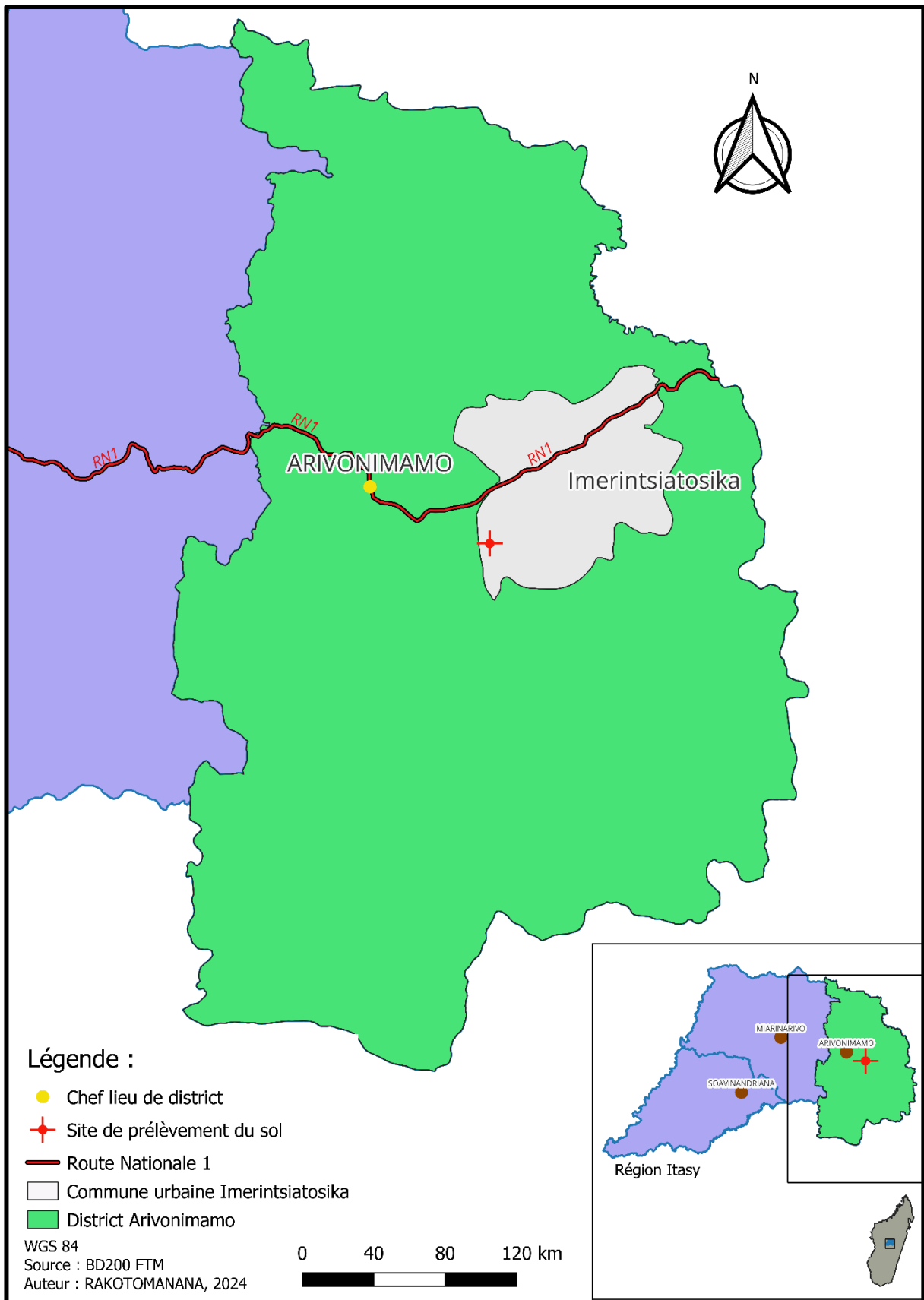


Figure 1 : Localisation du site de prélèvement du sol à Imerintsiasosika

Carte réalisée avec QGIS 3.28

1.1.2 Variété de riz utilisée

La variété de riz pluvial **Chhomrong Dhan** (*Oryza sativa japonica*) a été choisie pour cette étude. Le choix de la variété Chhomrong Dhan est particulièrement pertinent dans le contexte malgache. Même si c'est une variété d'origine népalaise, son adaptation locale est confirmée par sa présence répandue dans les cultures pluviales à Madagascar. Les résultats de Raboin et al (2013) ont indiqué que 80 % des parcelles de riz pluvial dans les Hautes Terres sont maintenant cultivées avec Chhomrong Dhan. En utilisant une variété largement cultivée et adaptée aux conditions climatiques des Hautes altitudes, cette étude s'assure de produire des résultats pertinents et applicables directement par les paysans.

Les semences ont été fournies par le Centre National de Recherches Appliquées au Développement Rural (FOFIFA). Le FOFIFA dispose en effet d'une banque de semences comprenant de nombreuses variétés de riz adaptées aux différentes régions de Madagascar. Pour une meilleure compréhension de la variété Chhomrong Dhan, les caractéristiques morphologiques et agronomiques détaillées de cette variété sont présentées en Annexe 2.

1.1.3 Vers de terre adultes utilisés

L'espèce endogée *Pontoscolex corethrurus* a été sélectionnée pour cette étude. Des vers adultes de *P. corethrurus* ont été collectés dans le site expérimental d'Imerintsiatosika par la méthode de tri manuel. *P. corethrurus* est une espèce de vers de terre tropicale et l'une des plus répandues à Madagascar. En effet, elle s'adapte à divers types de végétation et ne présente pas d'exigences particulières quant aux propriétés physico-chimiques du sol. Elle est d'ailleurs répertoriée dans différents types de sol, y compris dans les Ferralsols (Razafindrakoto, 2012). En plus, cette espèce est considérée comme un vers idéal pour l'inoculation dans les sols cultivés en raison de son mode de vie endogé où elle consomme de grandes quantités de sol (Ratsiatosika *et al.*, 2021).

Les vers de terre endogés contribuent à améliorer les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol et favorisent ainsi la croissance et la santé des plantes. Leur comportement alimentaire, basé sur l'ingestion de sol et de matière organique augmente la disponibilité des nutriments, en particulier le phosphore pour les plantes (Trap *et al.*, 2021), ce qui a un effet positif direct sur la croissance et la productivité des cultures comme le riz (Ratsiatosika *et al.*, 2021). De plus, Blanchart et al (2020) ont également documenté le rôle des vers *P. corethrurus* dans la réduction de la gravité de la pyriculariose sur le riz. Ceux-ci incluent l'effet direct des vers de terre par l'ingestion d'agents pathogènes du sol ou indirectement par la modification des propriétés physiques et chimiques du sol (Loranger-Merciris *et al.*, 2012).

1.1.4 Les types de lombricomposts utilisés

Trois types de lombricomposts fabriqués par trois espèces différentes de vers de terre, ainsi qu'un pré-compost, ont été utilisés. Le pré-compost est le produit du pré-compostage, qui fait référence à la première phase de dégradation de la matière organique avant l'intervention des vers de terre dans le processus de lombricompostage. Il est généralement composé de matières organiques partiellement décomposées. (Frederickson, *et al.*, 2007)

Pour les trois types de lombricomposts, un même substrat de pré-compost produit par l'ONG AMADESE (Association Malagasy pour le Développement Economique, Social et Environnemental), partenaire du projet Innov'Earth, a servi de substrat de départ. Des études antérieures ont montré que la qualité des lombricomposts dépend à la fois du substrat organique initial et des espèces de vers impliquées dans le processus de lombricompostage (Andrianisaina, 2017 ; Vambe *et al.*, 2023). Ainsi, en utilisant ce même pré-compost comme substrat de départ, il a été possible d'isoler spécifiquement l'effet des différentes espèces de vers de terre sur les propriétés finales des trois types de lombricomposts obtenus.

Les trois espèces choisies pour la préparation des lombricomposts sont :

- *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) : espèce importée reconnue pour son efficacité en lombricompostage (Ratnasari 2023)
- *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867) et *Amyntas minimus* (Horst, 1893) : espèces répertoriées à Madagascar également appréciée pour leurs capacités de lombricompostage (Andriamady, 2001 ; Andrianisaina, 2017 ; Bagari *et al.*, 2017)

Ces trois espèces appartiennent au groupe écologique des vers épigés. Les espèces de vers épigés sont celles utilisées dans le lombricompostage grâce à leur forte capacité de dégradation de matières organiques. En effet, les vers épigés vivent généralement à la surface du sol, dans la litière où ils consomment les débris organiques en ingérant rarement de terre (Gupta *et al.*, 2014).

Des détails sur les caractéristiques écologiques et biologiques de ces trois espèces sont fournis en Annexe 3.

1.2 Méthodologie

1.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est similaire à l'étude de Randriantsoa (2022), qui a démontré avec succès une synergie bénéfique résultant de l'inoculation combinée de vers de terre et de lombricompost fabriqué par l'espèce *Eisenia fetida* sur la résilience climatique du riz pluvial. Son étude utilisait une technique de mésocosme en pots de plantation.

1.2.2 Facteurs étudiés et les modalités

Pour les lombricomposts, quatre modalités ont été évaluées :

- Lombricompost produit par le ver *Eisenia fetida* (**EIS**),
- Lombricompost issu du ver *Eudrilus eugeniae* (**EUD**),
- Lombricompost fabriqué par le ver *Amyntas minimus* (**AMY**) et
- Pré-compost (**PRE**), une matière organique partiellement décomposée.

Chacun de ces fertilisants organiques a été apporté à raison de 12,06 g par pot, ce qui équivaut à un épandage de 6 t.ha⁻¹. Ce dosage représente le double de la dose moyenne de 3 t.ha⁻¹ généralement appliquée par les agriculteurs des Hautes Terres pour la fertilisation organique de leurs cultures de riz pluvial. Le choix d'une dose d'épandage relativement élevée (6 t.ha⁻¹) se justifie par les pratiques réelles observées sur le terrain. En effet, des études menées dans la région ont montré que les quantités de fertilisants organiques apportées par les paysans sont très variables, pouvant atteindre jusqu'à 13 t.ha⁻¹ dans certains cas (SECURE, 2020). La dose testée de 6 t.ha⁻¹ se situe donc dans la fourchette haute mais réaliste des pratiques paysannes.

Avant le semis du riz, les 12,06 g de chaque fertilisant ont été soigneusement mélangés de manière homogène avec le sol (1,5 kg) préalablement tamisé. Le mélange obtenu a ensuite été transféré dans les pots expérimentaux correspondants.

La composition chimique des trois lombricomposts et celle du pré-compost sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Teneur en carbone et en azote des lombricomposts et quantités apportées par 12,06 g/pot

Types de lombricomposts	Teneur			Quantités	
	C (%)	N (%)	C/N	C (g)	N (g)
AMY	15,12	1,20	12,60	1,82	0,14
EIS	14,72	1,42	10,34	1,77	0,17
EUD	14,46	1,23	11,77	1,74	0,15
PRE	15,21	1,27	11,97	1,83	0,15

Pour les inoculations de vers de terre, les vers *Pontoscolex corethrurus* adultes ont été inoculés à trois densités différentes :

- Sans inoculation de vers de terre (**0D**),
- Simple densité avec 3 individus par pot (**1D**) et
- Double densité avec 6 vers par pot (**2D**).

Afin de mettre en évidence les effets bénéfiques des vers de terre sur la croissance des plantes, une densité minimale de 60 individus.m² est préconisée (Brown *et al.*, 1999). Ainsi, les densités de 150 et 300 individus.m², testées respectivement avec 3 et 6 individus par pot dans cette étude, répondent à ce critère (Kok *et al.*, 2014). En effet, la densité moyenne de vers de terre dans les Ferralsols malgaches avoisine 150 individus.m² (Rakotomanga *et al.*, 2016). Cependant, afin de simuler l'influence d'une forte population de vers de terre, un traitement à double densité (300 individus.m²) a également été mis en place. L'inoculation des vers de terre dans les pots expérimentaux a été réalisée à la date de germination du riz, survenue 6 jours après les semis, permettant ainsi aux vers d'interagir avec le système racinaire dès les premières phases du développement végétatif.

1.2.3 Condition de température

Les plantes ont été exposées à deux conditions thermiques :

- Condition de température normale jour/nuit de 26/18 °C (**TN**) et
- Condition de stress thermique avec des températures jour/nuit de 31°C/18°C (**TS**)

A partir de ces deux séries de température, l'expérimentation s'est déroulée en deux phases :

Phase 1 (du 02/03/2023 au 13/04/2023) : Croissance du riz en condition normale

Durant cette phase de cinq semaines, les plants de riz ont été cultivés dans des conditions de température normale (**TN**), avec des températures jour/nuit de 26°C et 18°C. Cette température a été choisie en se basant sur les conditions climatiques sur les Hautes Terres et sur le protocole standard proposé par Köhl (2015) pour cultiver du riz dans des environnements contrôlés.

Phase 2 (du 11/05/2023 au 22/06/2023) : Croissance du riz en condition de stress thermique

Cette seconde phase de cinq semaines visait à simuler un épisode de stress thermique tel qu'il pourrait survenir dans les zones d'étude. Les 2 premières semaines ont maintenu les températures jour/nuit à 26°C/18°C. Pendant les 2 semaines suivantes (semaines 3 et 4), la température diurne a été augmentée de 5°C par rapport à la normale pour atteindre 31°C, tandis que la température nocturne est restée à 18°C. Cette élévation reproduit l'augmentation susceptible de la température sur les Hautes Terres à cause du changement climatique (Barimalala *et al.*, 2021). Lors de la 5^{ème} semaine, les conditions sont revenues à la normale (26°C/18°C).

Des précautions ont été prises pour simuler des transitions réalistes entre périodes diurnes et nocturnes. La température nocturne était appliquée de 17h à 5h le lendemain. Une période de transition de 2 heures (5h-7h) permettait alors d'atteindre progressivement la température diurne souhaitée à partir de 7h du matin. Cette montée en température progressive, mimant les conditions naturelles, vise à éviter un choc thermique trop brutal pour les plantes. La température dans la salle était contrôlée grâce à un climatiseur réversible.

Tableau 2 : Température dans la salle d'expérimentation

Condition de T°	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Semaine 5
TN (T° jour/nuit)	26/18 °C	26/18 °C	26/18 °C	26/18 °C	26/18 °C
TS (T° jour/nuit)	26/18 °C	26/18 °C	31/18 °C	31/18 °C	26/18 °C

1.2.4 Mise en place des mésocosmes

L'échantillon de sol prélevé a été séché à température ambiante, puis broyé et tamisé à 2 mm. Ce sol tamisé a ensuite été soigneusement mélangé pour homogénéiser l'échantillon. Les mésocosmes consistaient en des pots en plastique : récipient de 3,5 l et 0,16 m de diamètre (Cliché 1). Les pots sont remplis de 1,5 kg de ce sol et 12,06 g de lombricompost par traitement. Cette quantité de sol était suffisante pour recréer un environnement édaphique représentatif à cette échelle. Le fond de chaque pot était percé de 3 trous de 1 cm de diamètre pour faciliter l'écoulement de l'eau puis recouvert d'un maillage fin d'environ 0,3 mm d'ouverture pour empêcher les vers de terre introduits d'en sortir. La densité d'ensemencement du riz est de 3 graines/pots. Ensuite, l'humidité du sol a été maintenue à 100% de la capacité au champ, en arrosant quotidiennement les pots tout au long de l'expérimentation.

L'expérience avait en tout 24 traitements issus de la combinaison des quatre modalités pour les types de lombricomposts, des trois modalités pour l'inoculation de vers de terre et des deux modalités pour la situation climatique (Tableau 3). Chaque traitement a été répété 4 fois, pour un total de 96 mésocosmes installés.

NB : Afin de conserver une qualité nutritionnelle équivalente des lombricomposts entre les deux séries d'expérimentations (TN et TS), les lombricomposts restants après application pour la série TN ont été conservés dans un endroit sec pour éviter toute minéralisation pouvant altérer leur teneur en éléments nutritifs. Également, les mêmes vers de terre ont été réutilisés pour les séries TN et TS.



Cliché 1 : Design des pots utilisés pour l'expérimentation

Tableau 3 : Liste des modalités croisées des trois facteurs étudiés (situation climatique, type de lombricompost et inoculation de vers de terre)

Type de lombricompost + Inoculation de vers	Situation climatique	
	Température normale	Stress thermique
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Amyntas minimus</i> + Sans inoculation de vers de terre	TN_Amy_0D	TS_Amy_0D
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Amyntas minimus</i> + Simple densité de vers de terre	TN_Amy_1D	TS_Amy_1D
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Amyntas minimus</i> + Double densité de vers de terre	TN_Amy_2D	TS_Amy_2D
Lombricompost produit par le vers <i>Eisenia fetida</i> + Sans inoculation de vers de terre	TN_EIS_0D	TS_EIS_0D
Lombricompost produit par le vers <i>Eisenia fetida</i> + Simple densité de vers de terre	TN_EIS_1D	TS_EIS_1D
Lombricompost produit par le vers <i>Eisenia fetida</i> + Double densité de vers de terre	TN_EIS_2D	TS_EIS_2D
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Eudrilus eugeniae</i> + Sans inoculation de vers de terre	TN_EUD_0D	TS_EUD_0D
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Eudrilus eugeniae</i> + Simple densité de vers de terre	TN_EUD_1D	TS_EUD_1D
Lombricompost fabriqué par le vers <i>Eudrilus eugeniae</i> + Double densité de vers de terre	TN_EUD_2D	TS_EUD_2D
Pré-compost + Sans inoculation de vers de terre	TN_PRE_0D	TS_PRE_0D
Pré-compost + Simple densité de vers de terre	TN_PRE_1D	TS_PRE_1D
Pré-compost + Double densité de vers de terre	TN_PRE_2D	TS_PRE_2D

1.2.5 Conditions expérimentales

Pour chaque condition de température (TN et TS), les pots ont été disposés aléatoirement sur une paillasse dans la salle d'incubation (Cliché 3). Afin d'assurer des conditions d'éclairage homogènes pour l'ensemble des plantes, un système d'éclairage artificiel composé de 8 lampes LED a été mis en place. Quatre lampes LED de 8000 lumens et quatre autres de 4000 lumens ont été installées de manière répartie au-dessus des pots de plantation. L'intensité lumineuse PPF (Photosynthetic Photon Flux Density) émise par une lampe LED de 8000 lumens est de $675,95 \pm 46,44 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et celle d'une LED 4000 lumens est de $315,05 \pm 27,17 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Entre les deux lampes, l'intensité lumineuse moyenne calculée est d'environ $457,15 \pm 74,01 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Malgré cette disposition aléatoire des lampes, une hétérogénéité de la répartition de la lumière au niveau des pots ne pouvait être totalement exclue. Pour pallier ce risque, tous les pots ont été déplacés selon une procédure de réarrangement fréquent des positions. Chaque pot change de ligne tous les jours.

Notons que ces intensités lumineuses appliquées (entre 315 et 675 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) sont en adéquation avec les recommandations de Köhl (2015) qui préconise des valeurs comprises entre 500 et 700 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour une croissance optimale du riz en conditions contrôlées. Grâce au dispositif d'éclairage et au déplacement régulier des pots, l'ensemble des plants a donc pu se développer sous des conditions d'éclairage favorables et homogènes. Les lampes LED étaient programmées pour fonctionner de 6h du matin à 18h du soir, fournissant ainsi une photopériode de 12 heures par jour. Concernant l'humidité relative de l'air dans la salle d'incubation, celle-ci a été maintenue en moyenne à $65 \pm 11,13 \%$ pendant toute la durée de l'expérimentation. Cette valeur respecte les recommandations de Köhl (2015) qui préconise une humidité relative comprise entre 50 et 80 % pour assurer une croissance normale du riz en conditions contrôlées. Selon Köhl (2015) une humidité trop faible (<50%) pourrait induire un stress hydrique, tandis qu'une humidité excessive (>80%) favoriserait le développement de pathogènes fongiques.

Afin de suivre en continu les paramètres climatiques (température, intensité lumineuse, humidité relative), une station climatique automatique (WatchDog Series Weather Stations, USA) a été installée dans la salle d'expérimentation. Cette station était positionnée sur l'estrade au niveau des pots et déplacée quotidiennement en même temps que les pots, afin d'enregistrer les données environnementales au plus près des conditions réellement perçues par les plantes.

1.3 Variables mesurées

Un ensemble de variables ont été mesurées pour caractériser la croissance du riz sous les différents traitements : la hauteur et le nombre de talles des plantes, les biomasses végétales, les deux indices de végétation (NDVI et PRI), les paramètres racinaires, les teneurs en nutriments (azote et phosphore) dans la plante ainsi que le phosphore assimilable dans le sol. Le taux de survie des vers de terre inoculés et l'émission de CO₂ du sol ont également été mesurés.

- **Hauteur et nombre de talles des plants** : la hauteur des plants a été mesurée tous les 3-4 jours à l'aide d'un mètre ruban, depuis le niveau du sol jusqu'à l'extrémité de la panicule la plus haute de chaque pot, tandis que le nombre de talles a été compté une fois à la fin de l'expérimentation.
- **Indices de végétation (NDVI et PRI)** : avant le démontage des pots, deux indices de végétation les plus couramment interprétés pour la détermination de la capacité de production des plantes ont été mesurés : l'indice différentiel normalisé de la végétation ou Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) et l'indice de réflectance photochimique ou Photochemical Reflectance Index (PRI). Ces indices varient entre -1 et 1. Les mesures de ces deux indices ont été réalisées conjointement pour chaque feuille à l'aide de deux appareils de mesures respectivement PlantPen NDVI300 et PlantPen PRI200. La valeur du NDVI proche de 1 indique une végétation dense et en bonne santé, tandis qu'une valeur proche de -1 pour le PRI peut signaler un stress chez la plante (Rouse, 1973).
- **Biomasse aérienne et racinaire et totale** : lors du démontage des mésocosmes, les parties aériennes et racinaires des plants ont été prélevées séparément, séchées à 60°C pendant 72h, puis pesées. Cela a permis de déterminer les biomasses aériennes et racinaires. La somme des deux qui constitue la biomasse totale a été calculé aussi.
- **Ratio shoot/root** : Le ratio biomasse aérienne/racinaire a également été calculé. Ce ratio représente l'allocation des ressources entre les parties aériennes et racinaires de la plante. Des valeurs élevées indiquent une allocation préférentielle vers les parties aériennes, siège de la photosynthèse et du rendement en grains
- **Taux de survie des vers de terre** : lors du démontage des pots, le nombre de vers survivants a été compté.
- **Longueur et nombre de racines primaires** : ces mesures ont été faites à la fin de l'expérimentation pour caractériser le développement du système racinaire. La racine primaire la plus longue a été mesurée à l'aide d'une règle graduée.

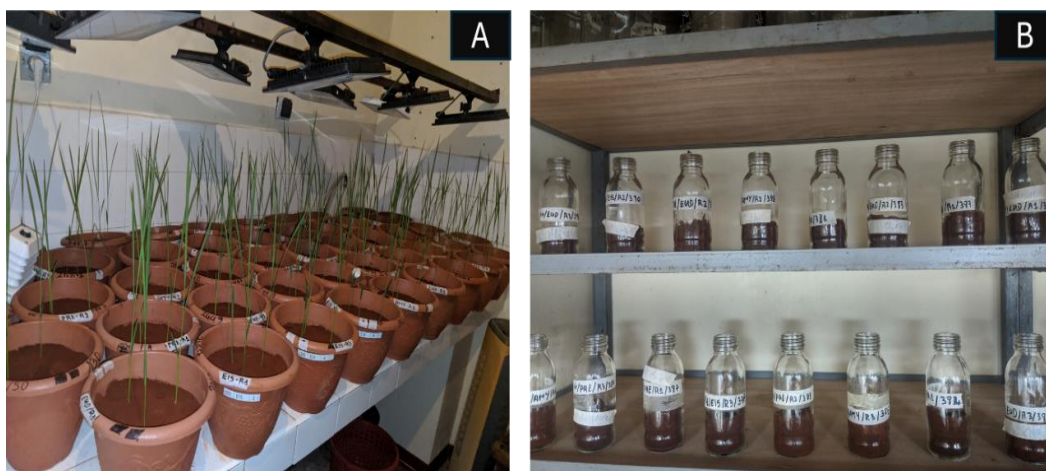
- **Teneurs en nutriments (azote et phosphore) dans les parties aériennes :** Les analyses de l'azote totaux ont été réalisées, par le laboratoire de l'UMR Eco&Sols à Montpellier, sur un analyseur élémentaire de type CHN.
Pour le phosphore, l'extraction a été réalisée au LRI en minéralisant un échantillon de 0,5 g de la partie aérienne de chaque traitement. Puis, le dosage a été fait au spectrophotomètre par la méthode au bleu.
- **Phosphore assimilable par les plantes dans le sol :** le phosphore que la plante peut extraire du sol a été mesuré par la méthode de résine échangeuse d'anions. L'analyse a été effectuée au Laboratoire des RadioIsotopes (LRI). Un échantillon de 2 g de sol tamisé à 0,02 mm a été mis sous agitation pendant 16 h en présence d'une bande de résine et de 30 ml d'eau distillée. La résine agit de la même façon que le système racinaire en absorbant le phosphore considéré comme assimilable par la plante. Le phosphore absorbé par les résines est ensuite agité pendant 2h dans 30 ml de solution de NaCl/HCl à 0,1M pour extraire le phosphore. Le dosage se fait ensuite par colorimétrie au vert de malachite.
- **Emission de CO₂ :** Le dioxyde de carbone dégagé par l'activité des microorganismes du sol a été mesuré périodiquement dans l'atmosphère confinée des bocaux en verre à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (Varian CP-4900) (Cliché 4). Cet appareil analytique sépare les différents gaz de l'échantillon selon leur conductivité thermique par rapport au gaz vecteur utilisé, en l'occurrence l'hélium. La mesure a été réalisée au LRI.

Bien que la mesure directe du CO₂ émis par les pots contenant les plants de riz n'ait pas pu être réalisée, des pots annexes ont été mis en place afin d'évaluer l'activité microbienne du sol selon les différentes conditions expérimentales (types de lombricompost, densité de vers de terre, stress appliqué). Ces pots annexes ne contenaient pas de riz, ce qui a permis d'isoler et de mesurer uniquement le CO₂ dégagé par la minéralisation du lombricompost dans le sol, sans l'interférence de la respiration de la plante. Pour le facteur de densité de vers de terre, les traitements à simple et double densité ont été regroupés en un seul traitement avec 1 individu par pot. Cela était nécessaire car les pots annexes ne pouvaient pas accueillir 3 ou 6 individus. Ainsi, l'effet des vers de terre est supposé être représenté par ce traitement avec 1 individu par pot. En conséquence, il n'y a que deux modalités pour la densité de vers de terre : 0D (sans vers de terre) et D (avec 1 individu par pot). Les 4 modalités du facteur types de lombricomposts sont restées inchangées. Les pots annexes étaient des bocaux en verre de 250 ml remplis de 100 g de sol sec, du même type que celui utilisé dans les pots de plantation, mélangé avec 0,08 g de lombricompost correspondant. Cela a permis de conserver les mêmes rapports entre la quantité de sol et de fertilisant que dans les pots de plantation. L'utilisation de ces pots annexes simplifiés a facilité les mesures de respiration microbienne, tout en recréant les conditions présentes dans les pots de plantation.

Les résultats détaillés sur l'évolution temporelle de l'émission de CO₂ durant les 5 semaines qu'a duré l'expérimentation sont présentés dans l'Annexe 4.



Cliché 2 : Pot de plantation et pot annexe



Cliché 3 : Disposition des pots dans la salle d'incubation du LRI

A : disposition des pots de plantation ; B : disposition des pots annexes



Cliché 4 : Mesure de l'émission de CO₂ avec un chromatographe en phase gazeuse

1.4 Analyses statistiques

Les données obtenues ont été analysées à l'aide du logiciel R version 4.3.3. La normalité et l'homogénéité des variances des données ont été vérifiées respectivement par le test de Shapiro-Wilk et le test de Levene. L'objectif principal des analyses statistiques était de tester les effets combinés des deux facteurs (types de lombricompost et densité de vers de terre) sur les paramètres de croissance (hauteur, tallage, biomasse végétale), la teneur en nutriments, les indices de végétation (NDVI et PRI), les paramètres racinaires et l'émission de CO₂ dans chaque condition de température (TN et TS). Pour les variables suivant une loi normale et présentant des variances homogènes, une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs a été utilisée. Cette analyse permet de comparer les moyennes entre les différents traitements pour chaque situation climatique (TN et TS). L'ANOVA a ensuite été complétée par un test de comparaison multiple par paires (Tukey-HSD). En revanche, lorsque les données ne suivaient pas une loi normale ou que les variances n'étaient pas homogènes, un test non-paramétrique, la PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance), a été appliquée. Après la PERMANOVA, un test de comparaison multiple pairwise avec correction de Wilcoxon a été réalisé pour déterminer quels groupes diffèrent significativement les uns des autres.

Un niveau significatif de p-value inférieur à 0,05 a été pris en compte tout au long de l'analyse.

2 RESULTATS

2.1 Taux de survie des vers de terre

Les résultats n'ont pas mis en évidence des effets significatives ni du type de lombricompost, ni de la densité de vers de terre ni leur interaction sur les taux de survie, que ce soit en conditions de température normale ou de stress thermique (Annexe 5). Ainsi, il y a une bonne survie générale des vers indépendamment des facteurs étudiés. La présence de turricules dans les pots confirme l'activité des vers tout au long de l'expérimentation, bien qu'aucun cocon n'ait été observé lors du démontage final. Une tendance se dégage en fonction de la condition de température. En effet, à température normale (TN), le taux de survie moyen est légèrement plus élevé pour les traitements avec une double densité comparés à ceux avec une simple densité (93,81 % pour 1D contre 94,69 % pour 2D). Sous stress thermique (TS), la tendance est inverse. Pour la simple densité, 95,88 % des vers initialement introduits ont survécu jusqu'à la fin de l'expérimentation, contre seulement 90,50% pour la double densité. Ces taux de survie globalement très satisfaisants témoignent de la bonne adaptation de l'espèce *P. corethrurus* utilisée aux conditions expérimentales de cette étude.

Tableau 4 : Récapitulatif du taux de survie

Mesure	Valeur (%)
Taux de survie moyen	93,72
Ecart-type	8,64
Taux de survie minimum	83,37
Taux de survie maximum	100

2.2 Hauteur

Les résultats illustrés dans la Figure 2 soulignent l'effet significatif du type de lombricompost, et donc de l'espèce de ver impliquée dans sa production, sur les performances de croissance en hauteur du riz pluvial, et ce quelle que soit la condition de température (p-value = 0,012 en TN et p-value = 0,004 en TS). Cependant, ni la densité de vers de terre ni l'interaction entre le type de lombricompost et la densité de vers de terre n'ont eu d'impact significatif sur ce paramètre (Annexe 5). En effet, la hauteur des plants de riz s'est avérée fortement influencée par le type de lombricompost.

En TN, la croissance en hauteur du riz variait significativement en fonction du type de lombricompost. Le riz pluvial fertilisé avec les lombricomposts EIS et AMY a atteint les hauteurs maximales, dépassant 60 cm en fin d'expérience. En revanche, celui fertilisé avec le pré-compost a présenté un léger retard de croissance significatif, à une hauteur moyenne de $59,19 \pm 3,19$ cm.

En TS, des tendances similaires ont été observées. De même, les lombricomposts EIS et AMY ont permis d'obtenir les plants les plus hauts, atteignant respectivement $59,66 \pm 4,86$ cm et $56,06 \pm 2,43$ cm en moyenne. Les hauteurs plus faibles obtenues avec les traitements EUD et PRE n'étaient pas significativement différentes entre elles, atteignant respectivement $54,98 \pm 3,65$ cm et $52,43 \pm 5,17$ cm.

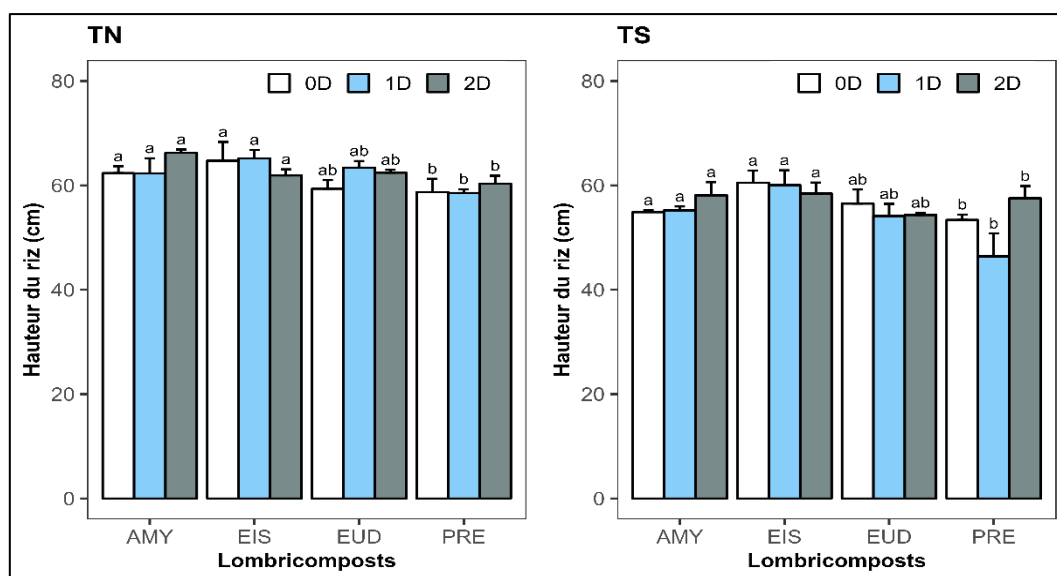


Figure 2 : Hauteur du riz à la fin de l'expérience

Légende : (TN) température normale jour/nuit de 26/18 °C, (TS) stress thermique avec des températures jour/nuit de 31°C/18°C, (AMY) lombricompost fabriqué par le vers *Amyntas minimus*, (EIS) lombricompost produit par le vers *Eisenia fetida*, (EUD) lombricompost issu du vers *Eudrilus eugeniae*, (PRE) pré-compost, (0D) sans inoculation de vers, (1D) simple densité avec 3 individus de vers de terre par pot, (2D) double densité avec 6 vers par pot

2.3 Nombre de talles

Si ni l'interaction des deux facteurs ni la densité de vers de terre seule n'ont pas eu d'effet significatif sur le tallage, le type de lombricompost s'est en revanche révélé déterminant et ce de manière significative dans les deux conditions de température testées (p -value = 0,043 en TN et p -value = 0,006 en TS). En fonction des différents lombricomposts, les résultats illustrés dans la Figure 3 ont mis en évidence une grande variabilité dans le nombre de talles du riz émises par les plants de riz, compris entre 4,75 et 8,5 talles par pot.

En TN, le tallage le plus important ($7,33 \pm 1,5$ talles en moyenne) a été obtenu avec le lombricompost EIS, de manière significativement supérieure au EUD ($5,66 \pm 1,6$ talles) et au pré-compost ($5,91 \pm 1,23$ talles). Le traitement avec le lombricompost AMY a induit une réponse intermédiaire de $6,58 \pm 1,43$ talles, inférieure au lombricompost EIS mais supérieure au lombricompost EUD et pré-compost.

En TS, des tendances similaires ont prévalu, avec une émission de talles significativement plus faible ($5,16 \pm 1,46$ talles) pour EUD comparé avec $7,16 \pm 1,7$ talles pour le EIS et $7,08 \pm 1,54$ pour le AMY. Alors, les lombricomposts issus des espèces *Eisenia fetida* et *Amyntas minimus* semblent ainsi particulièrement propices à un développement optimal du tallage, et ce quelle que soit la condition de température.

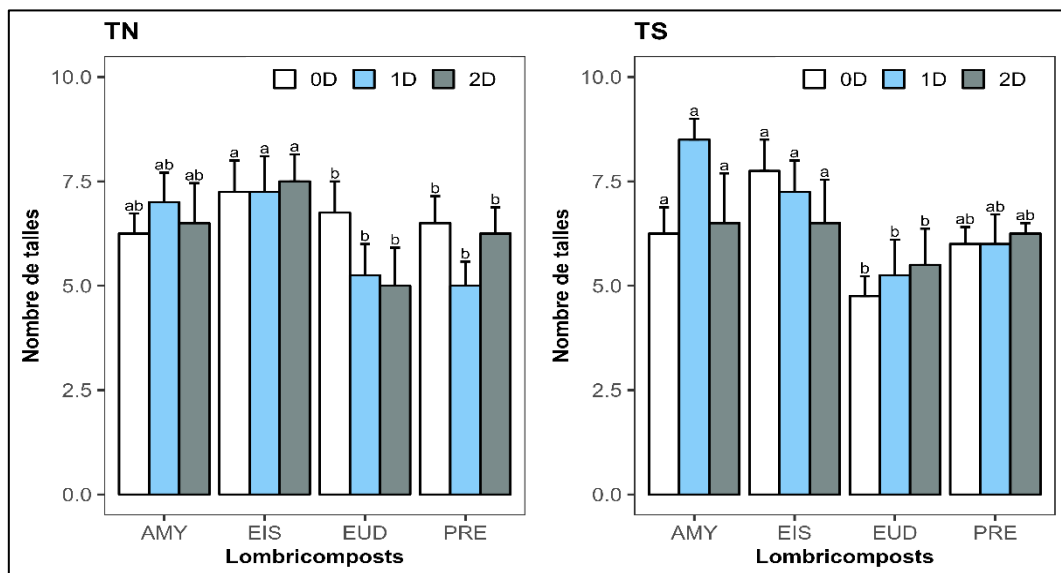


Figure 3 : Nombre de talles finals du riz

Légende : voir Figure 2

2.4 Indices de la végétation

En TN, ni le facteur densité de vers de terre, ni le type de lombricompost, ni leur interaction n'ont eu d'impact significatif sur le NDVI (Annexe 5). Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) présentait des valeurs moyennes de $0,74 \pm 0,01$ quelle que soit le traitement. Cependant en TS, seul le facteur type de lombricompost a influencé significativement le NDVI (p -value=0,029), avec des valeurs légèrement mais significativement supérieures pour le AMY ($0,71 \pm 0,01$) comparé au pré-compost ($0,70 \pm 0,008$). Les lombricomposts EIS et EUD ont induit des valeurs intermédiaires (Figure 4).

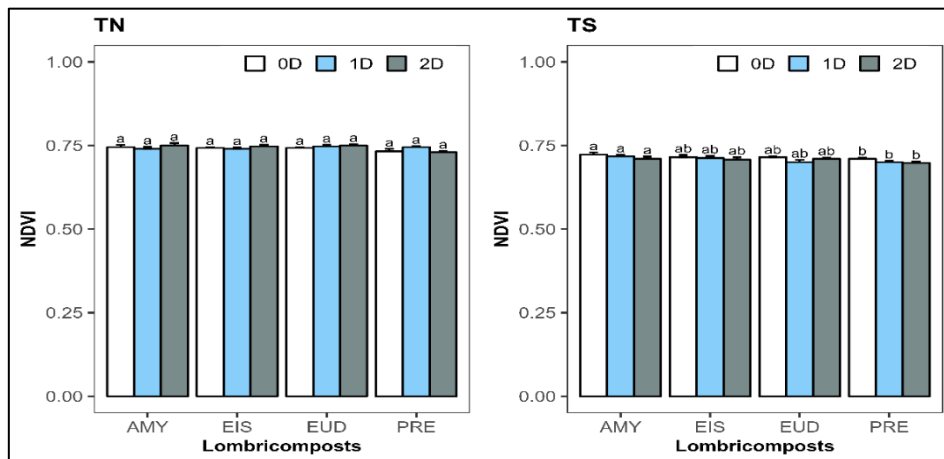


Figure 4 : Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Légende : Voir Figure 2

De même pour le PRI (Photochemical Reflectance Index), aucun des facteurs étudiés (types de lombricompost, densité de vers de terre et leur interaction) n'a pas démontré d'effet significatif en TN (Annexe 5). Cependant, en TS, seul le types de lombricompost a significativement influencé (p -value=0,001) ce paramètre. Les résultats indiquent que la valeur du PRI varie de $0,029 \pm 0,002$ pour le pré-compost jusqu'à $0,036 \pm 0,004$ pour les lombricomposts EIS et AMY.

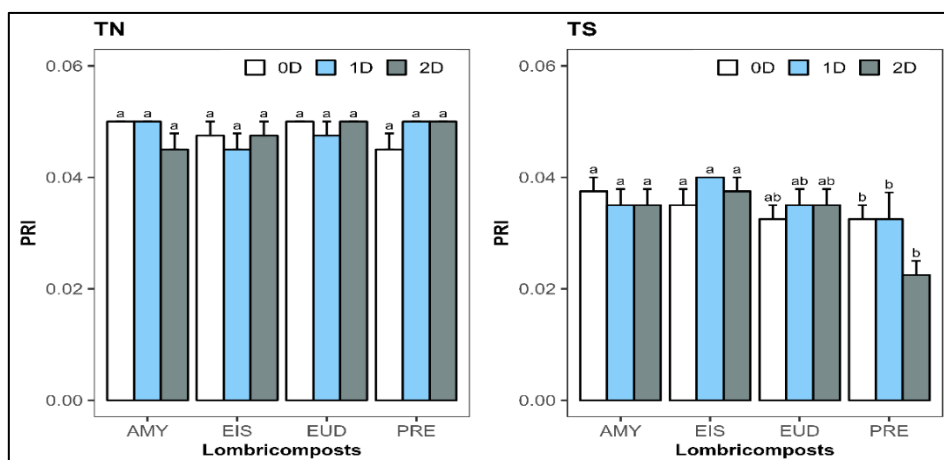


Figure 5 : Photochemical Reflectance Index (PRI)

Légende : Voir Figure 2

2.5 Biomasses végétales

Les biomasses végétales (aériennes, racinaires et totales) se sont révélées fortement dépendantes du type de lombricompost, que ce soit en conditions de température normale (p -value $<0,001$) ou de stress thermique (p -value $<0,001$ sauf p -value=0,015 pour la biomasse aérienne), tandis que la densité de vers de terre n'a pas eu d'effet significatif sur ces biomasses du riz pluvial. De même, l'interaction des deux facteurs n'a pas montré d'effet significatif sur ces paramètres.

En TN, le lombricompost EIS a permis une forte biomasse aérienne de $1,23 \pm 0,13$ g de MS contre $0,97 \pm 0,19$ g de MS pour AMY, $0,90 \pm 0,12$ g de MS pour EUD et $0,84 \pm 0,13$ g de MS pour PRE. De même, la biomasse racinaire est significativement plus élevée avec EIS ($0,42 \pm 0,05$ g de MS) par rapport à AMY ($0,33 \pm 0,04$ g de MS), EUD ($0,32 \pm 0,04$ g de MS) et PRE ($0,29 \pm 0,03$ g de MS). Étant la somme des biomasses aérienne et racinaire, les biomasses totales étaient alors logiquement plus élevées avec EIS ($1,65 \pm 0,18$ de MS).

En TS, la densité de vers n'a pas affecté significativement les biomasses aérienne et totale, mais a eu une influence sur la biomasse racinaire (p -value $<0,001$), tout comme le type de lombricompost (p -value $<0,001$). L'ordre suivant de la biomasse racinaire a été constaté en fonction de la densité de vers de terre : $1D < 2D < 0D$. En effet, la simple densité de vers (1D) a conduit à une réduction significative de la biomasse racinaire ($0,41 \pm 0,06$ g de MS) par rapport à la double densité et aux traitements sans inoculation de vers de terre (respectivement $0,52 \pm 0,08$ g de MS en 2D et $0,58 \pm 0,09$ g de MS en 0D) (Figure 6). En outre, les lombricomposts EIS et AMY ont induit des biomasses végétales significativement supérieures à celles du pré-compost et du lombricompost EUD (Figure 7).

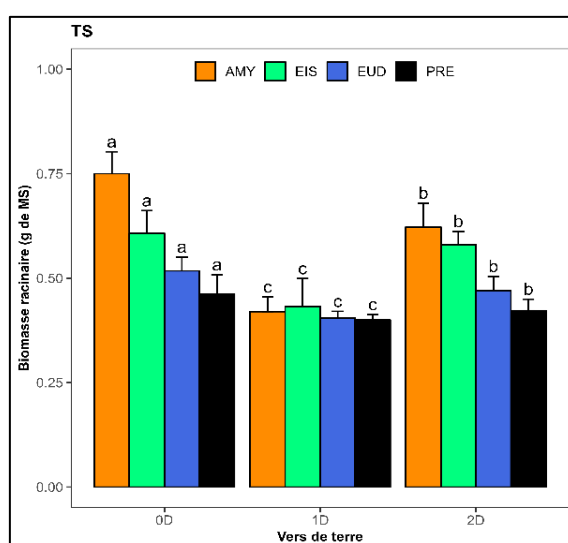


Figure 6 : Biomasses racinaires en condition de stress thermique

Légende : voir Figure 2

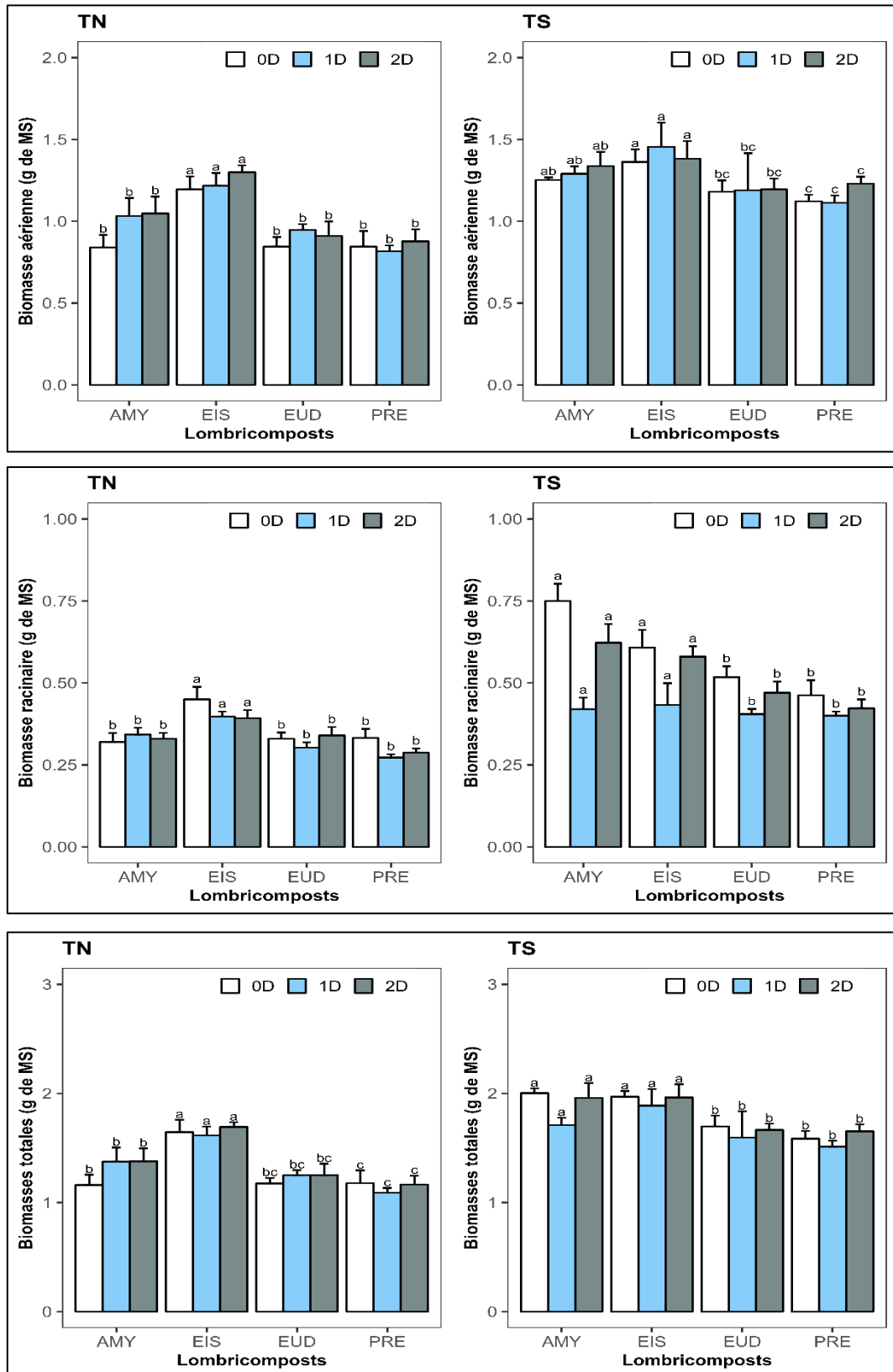


Figure 7 : Biomasses aériennes, racinaires et totales du riz

Légende : voir Figure 2

2.6 Ratio Shoot/Root

Dans l'ensemble, c'est uniquement le facteur densité de vers de terre qui a montré un effet significatif sur le ratio shoot/root dans les deux conditions de température (p-value=0,003 en TN ; p-value=0,001 en TS). Le type de lombricompost et l'interaction entre le type de lombricompost et la densité de vers de terre n'ont pas eu d'effet significatif sur ce ratio.

En TN, le ratio shoot/root est significativement plus faible avec le traitement sans vers de terre (0D : $2,61 \pm 0,41$) par rapport aux traitements avec une simple et une double densité de vers de terre (respectivement 1D : $3,05 \pm 0,29$ et 2D : $3,06 \pm 0,44$). Ainsi, la présence de vers de terre (modalités 1D et 2D) a entraîné une augmentation significative de 14% du ratio shoot/root comparé au traitement sans vers de terre (0D).

En TS, la densité de vers de terre a également eu un effet significatif sur le ratio shoot/root, mais avec des tendances différentes. Le ratio shoot/root reste significativement plus faible avec 0D ($2,20 \pm 0,41$) par rapport à 1D ($3,10 \pm 0,67$), mais la valeur de ce ratio pour 2D ($2,53 \pm 0,39$) n'est pas différente de 0D. Sur ces résultats, il y a une diminution globale du ratio shoot/root en condition de TS par rapport à la condition TN. Cette baisse est de 16% pour 0D et de 18% pour 2D, sauf pour les plants inoculés avec 1D. Dans ce cas, le ratio est resté similaire entre les deux conditions de température ($3,05 \pm 0,29$ en TN et $3,10 \pm 0,67$ en TS), témoignant d'une meilleure capacité d'adaptation du riz pluvial pour maintenir le développement aérien grâce à cette densité modérée de vers de terre.

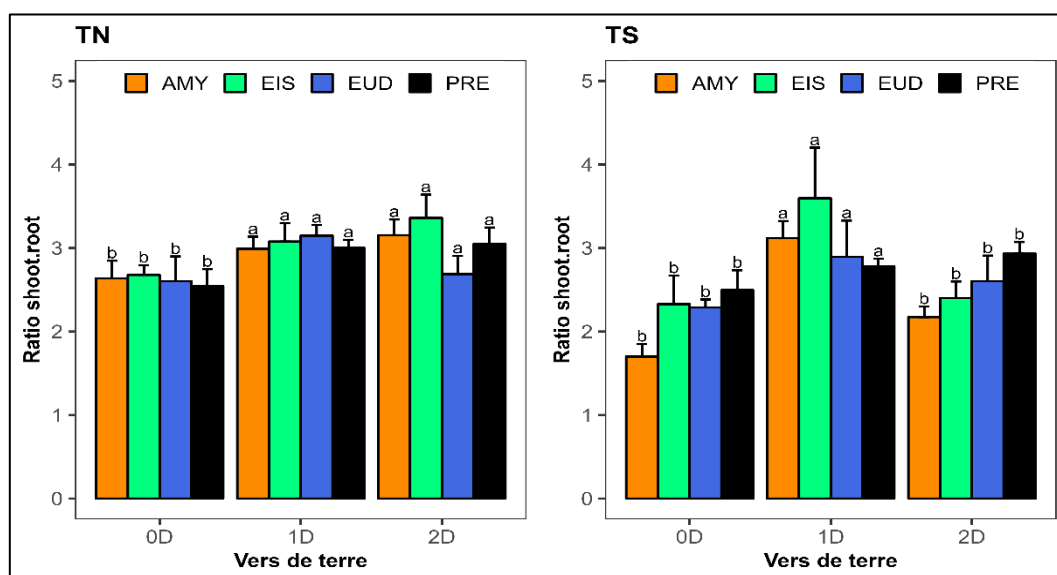


Figure 8 : Ratio shoot/root

Légende : voir Figure 2

2.7 Paramètres racinaires

La densité de vers s'est révélée être le seul facteur déterminant pour le développement du système racinaire du riz pluvial, avec un impact significatif sur les paramètres racinaires (le nombre et la longueur des racines primaires), observé dans les deux conditions de température (p -value $<0,001$ en TN ; p -value $<0,01$ en TS). Alors, ni le facteur types de lombricompost ni l'interaction entre le type de lombricompost et la densité de vers de terre n'ont eu d'impact significatif sur ces paramètres racinaires.

Plus la densité de vers de terre était importante, plus le nombre et la longueur des racines primaires étaient réduits. Ainsi, l'ordre suivant est constaté pour le nombre des racines primaires : double densité (2D) $<$ densité simple (1D) $<$ sans inoculation (0D). Cet ordre est valable dans les deux conditions de température. En TN, le nombre des racines primaires est respectivement de $50,62 \pm 6,24$ cm pour 2D, $56,18 \pm 6,29$ cm pour 1D et $62,43 \pm 6,76$ cm pour 0D. En TS, les valeurs sont de l'ordre de $44 \pm 5,52$ cm, $53,68 \pm 4,91$ cm et $60,18 \pm 6,24$ cm. Alors, la double densité de vers de terre (2D) réduit d'environ 10 cm le développement racinaire du riz en TN et de 15 cm en TS par rapport au traitement sans inoculation de vers de terre (0D) (Figure 9).

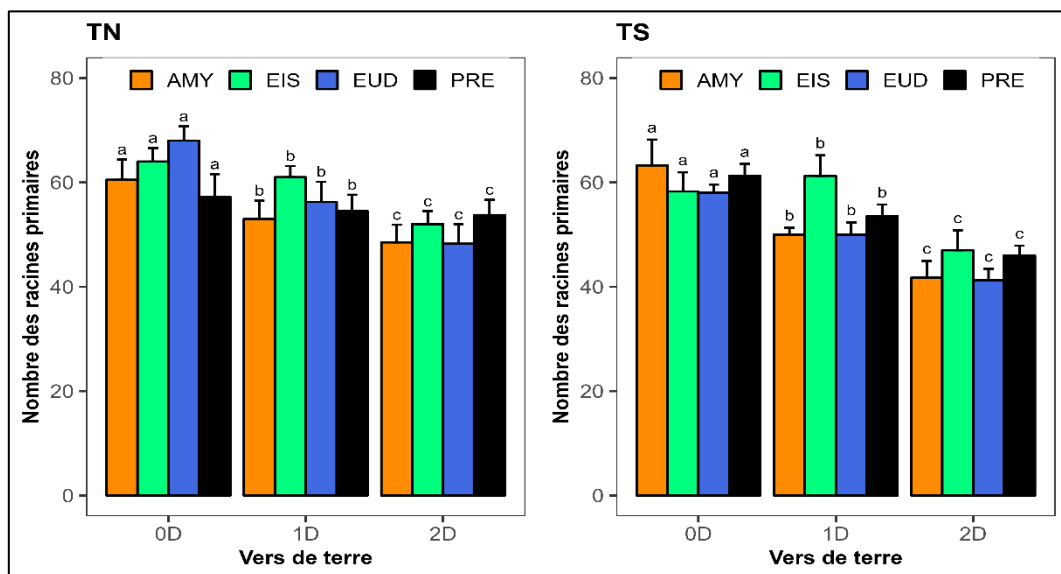


Figure 9 : Nombre des racines primaires

Légende : voir Figure 2

De même pour la longueur des racines primaires, une réduction significative d'environ 10 cm en TN et 5 cm en TS a été notée entre les traitements sans vers de terre et la double densité. En TN, la longueur moyenne des racines primaires était de $32,35 \pm 5,21$ cm pour 0D, contre $23,24 \pm 5,20$ cm pour 2D. Les traitements sans inoculation de vers (0D) et avec une simple densité (1D) ne présentent pas de différence statistiquement significative pour la longueur des racines primaires (Figure 10).

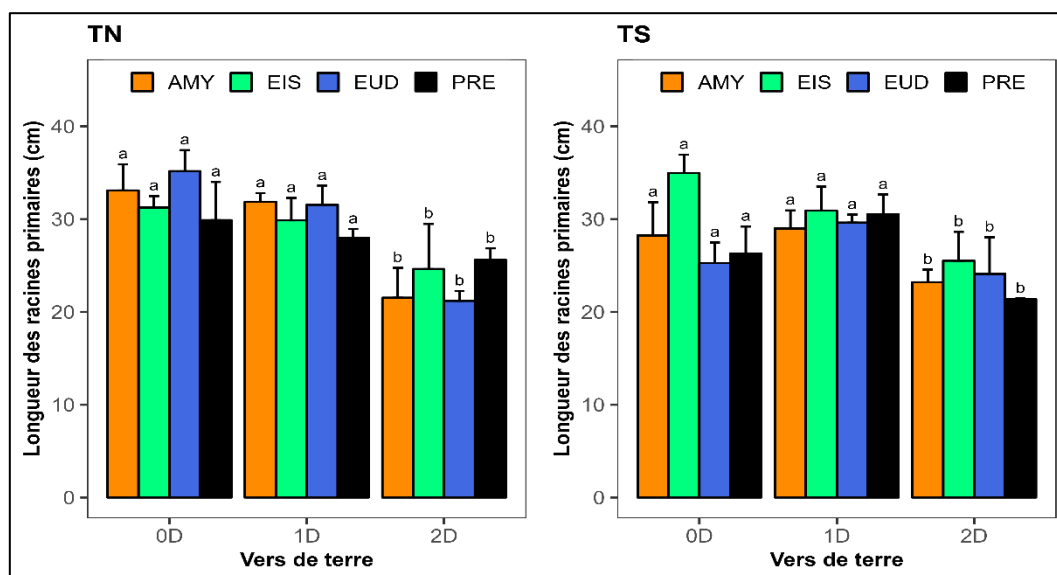


Figure 10 : Longueur des racines primaires

Légende : voir Figure 2

2.8 Quantité d'azote et de phosphore dans la biomasse aérienne

Le type de lombricompost était le seul facteur ayant un effet significatif sur les quantités d'azote et de phosphore dans la biomasse aérienne du riz, et ce dans les deux conditions de température testées (p -value < 0,001 en TN ; p -value < 0,05 en TS). Ainsi, ni la densité de vers de terre ni l'interaction entre le type de lombricompost et la densité de vers de terre n'ont eu d'impact significatif sur ce paramètre.

En TN, les plants de riz fertilisés avec le lombricompost EIS présentent des quantités d'azote total ($44,8 \pm 6,64$ mg N) et de phosphore total ($1,74 \pm 0,28$ mg P) significativement plus élevées que celles des autres traitements. En effet, les plants fertilisés avec les lombricompost AMY et EUD, ainsi que le pré-compost, ont respectivement $36,95 \pm 7,88$ mg N, $30,99 \pm 4,64$ mg N et $29,01 \pm 5,35$ mg N pour l'azote total, et respectivement $1,52 \pm 0,26$ mg P, $1,34 \pm 0,19$ mg P et $1,25 \pm 0,26$ mg P pour le phosphore total.

En TS, le lombricompost EIS tendait toujours à induire les quantités d'azote les plus élevées ($34,26 \pm 7,18$ mg N), sans différence significative cependant avec le lombricompost AMY ($30,44 \pm 4,79$ mg N) et le pré-compost ($28,94 \pm 4,94$ mg N). Le EUD se démarquait par des teneurs en azote significativement plus faibles ($25,31 \pm 4,5$ mg N). Pour le phosphore, les lombricomposts EIS ($1,20 \pm 0,25$ mg P) et AMY ($1,13 \pm 0,22$ mg P) ont permis de maintenir des quantités significativement supérieures (p -value=0,002) à celles obtenues avec le lombricompost EUD ($0,89 \pm 0,19$ mg P) et le pré-compost ($0,90 \pm 0,13$ mg P).

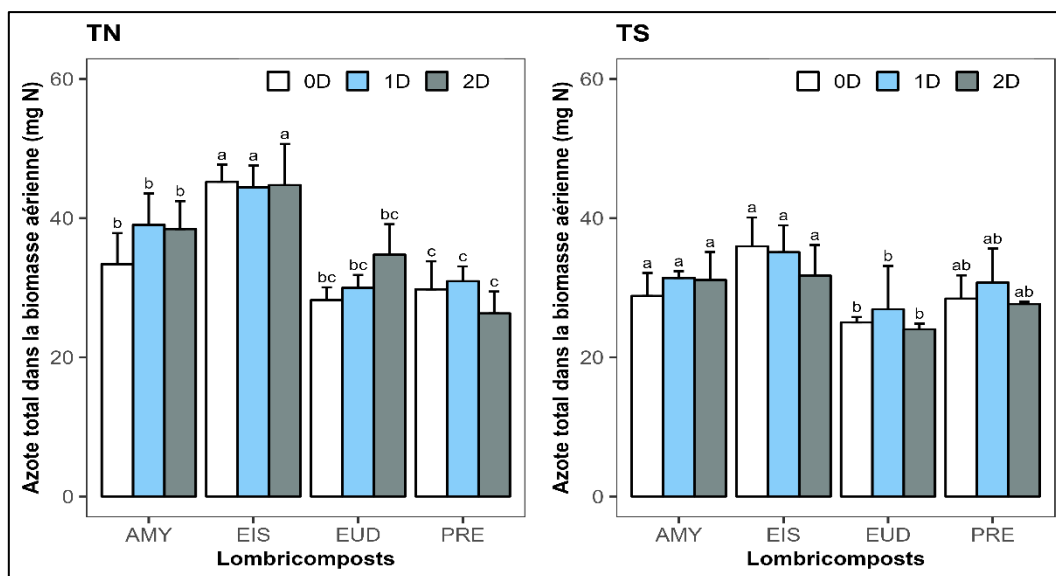


Figure 11 : Quantité d'azote dans la biomasse aérienne

Légende : voir Figure 2

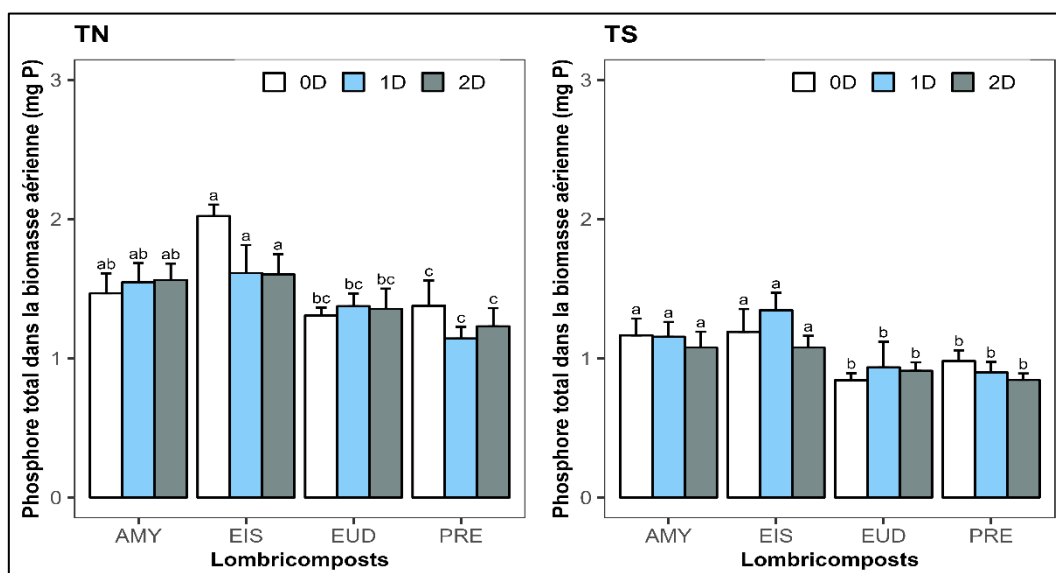


Figure 12 : Quantité de phosphore dans la biomasse aérienne

Légende : voir Figure 2

2.9 Biodisponibilité de phosphore dans le sol

En TN, une interaction significative des deux facteurs (types de lombricompost et densité de vers de terre) a été observée (p -value=0,002). La combinaison du lombricompost EIS avec la simple densité de vers de terre (1D) a permis d'obtenir les teneurs en phosphore assimilable les plus élevées ($1,95 \pm 0,19$ mg P kg⁻¹ sol) (Figure 13). À l'inverse, les teneurs les plus faibles ont été notées pour le pré-compost combiné à une double densité de vers, ainsi que pour le lombricompost AMY associé au traitement sans vers de terre (respectivement $1,25 \pm 0,03$ mg P kg⁻¹ sol et $1,26 \pm 0,11$ mg P kg⁻¹ sol).

En TS, si l'interaction n'est pas apparue significative (p -value=0,127), le type de lombricompost et la densité de vers ont eu individuellement un effet significatif sur la disponibilité du phosphore dans le sol (respectivement, p -value = 0,026 et p -value =0,022). Une tendance à la hausse a été observée en faveur du lombricompost EIS par rapport au lombricompost AMY ($1,40 \pm 0,33$ mg P kg⁻¹ sol vs $1,18 \pm 0,32$ mg P kg⁻¹ sol). Pourtant, le lombricompost EIS s'est démarqué en permettant des teneurs en phosphore disponible significativement supérieures au lombricompost EUD et au pré-compost (p -value=0,026, respectivement $1,05 \pm 0,15$ mg P kg⁻¹ sol et $1,07 \pm 0,22$ mg P kg⁻¹ sol) (Figure 13). Par ailleurs, le traitement sans vers de terre a favorisé significativement cette disponibilité du phosphore comparé aux traitements avec ceux en présence de vers de terre (p -value=0,022, $1,34 \pm 0,39$ mg P kg⁻¹ sol en 0D, $1,05 \pm 0,22$ mg P kg⁻¹ sol en 1D, $1,13 \pm 0,15$ mg P kg⁻¹ sol en 2D).

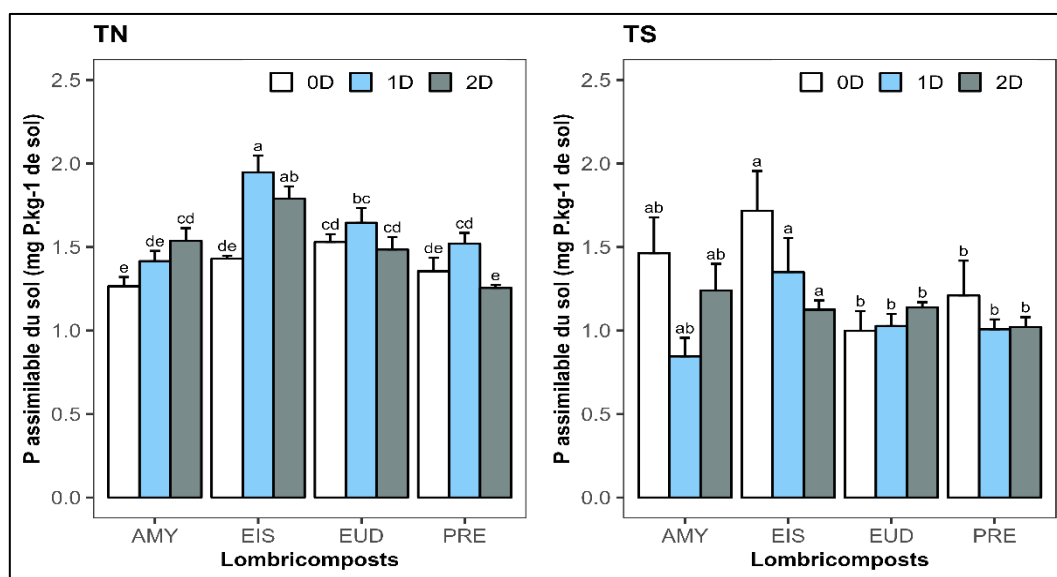


Figure 13 : Phosphore assimilable du sol

Légende : voir Figure 2

2.10 Emission de CO₂

En TN, l'interaction entre le type de lombricompost et la densité de vers de terre était significative sur l'émission de CO₂ (p-value=0,015). Spécifiquement, le pré-compost (PRE) combiné avec le traitement en présence de vers de terre (D) a entraîné un fort dégagement de CO₂, significativement plus élevé ($269,65 \pm 55,69 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol), tandis que le lombricompost EIS associé au traitement sans vers de terre (0D) représente la plus faible émission de CO₂ ($82,99 \pm 39,80 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol).

En TS, l'interaction entre les deux facteurs n'était pas significative, mais le type de lombricompost et la densité de vers de terre ont eu des effets individuellement significatifs sur l'émission de CO₂. En effet, le PRE a induit une émission de CO₂ plus élevée ($196,08 \pm 44,39 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol) et la valeur la plus faible pour le lombricompost AMY ($153,02 \pm 34,24 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol). De plus, le traitement avec vers de terre (D) a entraîné un fort dégagement de CO₂ ($205,89 \pm 51,35 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol) par rapport aux traitements sans vers de terre (0D) ($141,13 \pm 29,44 \mu\text{g CO}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de sol).

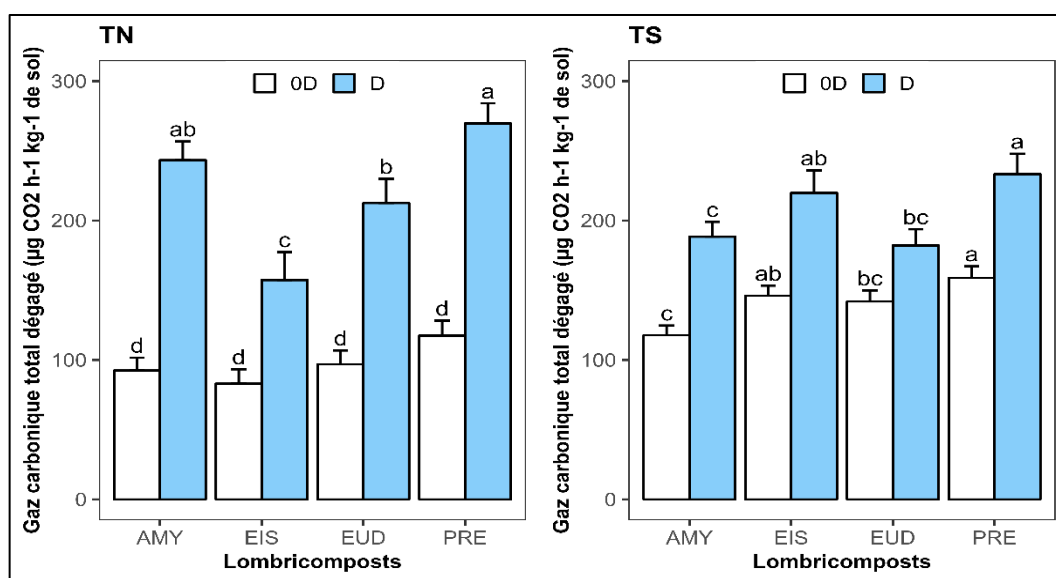


Figure 14 : Gaz carbonique dégagé

Légende : (TN) température normale jour/nuit de 26/18 °C, (TS) stress thermique avec des températures jour/nuit de 31°C/18°C, (AMY) lombricompost fabriqué par le vers *Amyntas minimus*, (EIS) lombricompost produit par le vers *Eisenia fetida*, (EUD) lombricompost issu du vers *Eudrilus eugeniae*, (PRE) pré-compost, (0D) sans inoculation de vers, (D) avec inoculation de 1 individu de vers de terre par pot annexe

3 DISCUSSIONS

3.1 Effets des lombricomposts et des vers de terre sur la croissance du riz pluvial en condition normale de température

3.1.1 Effets synergiques des lombricomposts et des vers de terre

Après cinq semaines de croissance en conditions normales de température (jour/nuit 26°/18°C), l'interaction des deux facteurs (types de lombricompost et densité de vers de terre) n'a pas eu d'effet significatif sur la croissance globale du riz. Elle a néanmoins amélioré la biodisponibilité du phosphore dans le sol ainsi que le flux de CO₂. Cette interaction souligne l'importance de la combinaison appropriée entre la fertilisation organique et l'activité biologique pour optimiser la disponibilité des nutriments. En effet, l'association du lombricompost produit par l'espèce *Eisenia fetida* avec une simple densité de vers de terre (3 individus/pots soit 150 individus.m⁻²) s'est avérée particulièrement efficace pour augmenter la teneur en phosphore assimilable. Ces résultats démontrent qu'une densité de peuplement modérée est plus bénéfique qu'une forte densité de vers de terre. Machfudz & Murwani (2017) ont confirmé dans leurs études l'efficacité de l'apport combiné du lombricompost et d'une population de *P. corethrurus* à une densité similaire, soit 100 individus.m⁻². En plus, les résultats suggèrent que la qualité du substrat organique, notamment sa teneur en azote, joue un rôle crucial dans la capacité des vers de terre à améliorer la disponibilité du phosphore. Il est à noter que le lombricompost EIS était plus riche en azote que les autres lombricomposts utilisés, soit 1,4% contre 1,2% (Tableau 1). Ces résultats sont aussi conformes à une étude récente utilisant également l'espèce *P. corethrurus* associée avec des fertilisants organiques (Ratsiatosika *et al.*, 2024). Cette étude récente a conclu que l'association des vers de terre avec un fertilisant organique de meilleure qualité chimique et biochimique tel que le lombricompost améliore la disponibilité du phosphore et du magnésium dans le sol. Cette synergie entre lombricompost et vers de terre pourrait s'expliquer par plusieurs mécanismes : i) le lombricompost riche en azote stimule l'activité microbienne, favorisant la minéralisation du phosphore organique (Le Bayon & Milleret, 2009) ; ii) les vers de terre, en se nourrissant du substrat enrichi, produisent des turricules plus riches en nutriments assimilables et des enzymes favorisant la solubilisation du phosphore inorganique du sol (Vos, 2022). Alors, la combinaison appropriée entre la fertilisation organique (lombricompost de haute qualité) et l'activité biologique (densité modérée de vers de terre) apparaît comme une stratégie prometteuse pour optimiser la disponibilité des nutriments dans le sol, en particulier le phosphore. L'amélioration de la disponibilité du phosphore revêt une importance particulière, étant donné son rôle essentiel dans de nombreux processus physiologiques et biochimiques chez les plantes, notamment dans le développement du système racinaire. En outre, le phosphore, composant clé de l'ATP (Adénosine Triphosphate), est impliqué dans la division et l'élongation cellulaires, processus indispensables à la croissance des plantes et au développement racinaire (Schachtman *et al.*, 1998).

Les résultats concernant l'émission de CO₂ apportent un éclairage supplémentaire sur le rôle des vers de terre dans la minéralisation des fertilisants organiques afin de libérer les nutriments dans le sol. Les pics élevés de flux de CO₂ observés sur les traitements avec vers de terre (Figure 14), témoignent de l'intensification de l'activité microbienne et de la décomposition de la matière organique en présence de vers de terre. Dans leur article de synthèse, Medina-Sauza et al. (2019) ont démontré l'augmentation systématique de la population microbienne et de l'activité de minéralisation dans les sols où les vers de terre sont présents. Ceci est cohérent avec les travaux de Postma-Blaauw et al. (2006), qui ont montré que les vers de terre stimulent l'activité microbienne dans le sol, accélérant ainsi la minéralisation de la matière organique. De plus, les résultats dans cette étude rejoignent les résultats trouvés par Chapuis-Lardy et al. (2010) qui ont démontré aussi que la présence de *P.corethrurus* dans un sol tropical (Ferralsols) a induit une augmentation significative des émissions de CO₂ et donc de la minéralisation grâce à l'activité microbienne. En outre, les résultats montrent qu'il y a un dégagement accru de CO₂ observé sur le pré-compost par rapport aux lombricompost. En effet, le pré-compost moins stable et plus riche en composés facilement dégradables a été minéralisé plus rapidement que le lombricompost, plus mature et stabilisé. Selon Bernal et al. (2009), le pré-compost contient une proportion plus élevée de composés organiques facilement biodégradables, ce qui entraîne une activité microbienne plus intense et, par conséquent, une libération plus importante de CO₂. En revanche, le lombricompost, ayant subi une transformation plus poussée par l'action des vers de terre, présente une structure moléculaire plus complexe et stable, résistant davantage à la décomposition microbienne rapide (Dominguez *et al.*, 2010). Cette forte émission de CO₂ dans le pré-compost indique que les éléments nutritifs ne sont pas immédiatement disponibles pour les plantes. Comme l'ont souligné Aira et al. (2007), le processus de minéralisation nécessite du temps pour transformer les composés organiques en formes assimilables par les plantes. Cette période de transformation explique la croissance plus lente, le tallage réduit et la production de biomasse inférieure pour les traitements avec pré-compost. En effet, Atiyeh et al. (2000) ont démontré que les plantes cultivées sur un substrat contenant du lombricompost présentent généralement une croissance plus rapide que celles cultivées sur un substrat contenant du compost traditionnel ou du pré-compost, en raison de la plus grande disponibilité immédiate des nutriments dans le lombricompost.

Ainsi, la première hypothèse qui stipule que « la croissance du riz sera meilleure avec l'apport combiné de lombricompost de meilleure qualité chimique produit par l'espèce *Eisenia fetida* et d'une plus forte densité de vers de terre en absence de stress thermique » n'est que partiellement validée.

3.1.2 Effets seuls des vers de terre

Dans cette étude, les effets positifs des vers de terre ont été principalement observés sur les paramètres racinaires (nombre et longueur des racines primaires) et le ratio shoot/root. Cependant, ces observations contrastent avec la littérature existante. En effet, plusieurs auteurs ont rapporté que l'effet des vers de terre endogés était plus prononcé sur certains paramètres de croissance aérienne du riz, notamment la biomasse aérienne, la hauteur et le tallage, sans effet significatif sur les paramètres racinaires (Bertrand *et al.*, 2015 ; Van Groenigen *et al.*, 2014 ; Coulis *et al.*, 2014). Cette divergence peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la durée relativement courte de l'expérimentation (5 semaines) pourrait être insuffisante pour observer les effets positifs des vers de terre sur la partie aérienne de la plante. En effet, les interactions entre les vers de terre et les plantes sont des processus complexes qui peuvent nécessiter plus de temps pour se manifester pleinement. De plus, les effets des vers de terre peuvent être masqués par les effets des lombricomposts utilisés dans cette étude. Les éléments nutritifs apportés au sol via ces fertilisants organiques ont vraisemblablement été suffisants pour nourrir le riz, rendant ainsi moins perceptible l'effet des vers de terre sur sa croissance aérienne.

Bien que les résultats obtenus diffèrent de ceux rapportés dans la littérature, ils mettent en lumière l'importance de considérer les effets des vers de terre sur différents aspects de la croissance des plantes, notamment le développement racinaire. Les données de cette expérimentation révèlent une tendance intéressante : le nombre et la longueur des racines primaires diminuent avec l'augmentation de la population des vers de terre introduite dans le sol (0D>1D>2D) (Figure 9 et 10). Cette modification de l'architecture racinaire en réponse à l'activité des vers de terre peut s'expliquer par plusieurs mécanismes complémentaires. Premièrement, les vers de terre endogés comme *P. corethrurus*, utilisés dans cette étude, modifient la structure du sol en créant un réseau complexe de galeries horizontales et verticales. Ces galeries jouent un double rôle crucial : i) elles agissent comme des voies préférentielles pour la croissance des racines, réduisant ainsi la résistance mécanique du sol (Lavelle *et al.*, 1997) ; ii) leurs parois, enrichies en nutriments et en microorganismes bénéfiques, constituent un milieu favorable à l'absorption des éléments nutritifs par les racines (Blouin *et al.*, 2013). Ainsi, les plants de riz pourraient développer moins de racines primaires tout en maintenant une absorption efficace des ressources. Cette hypothèse est renforcée par les travaux de Trap *et al.* (2021), qui ont démontré que l'espèce *P. corethrurus* peut augmenter la disponibilité du phosphore jusqu'à 76% de plus que le sol sans inoculation de vers de terre. La diminution du système racinaire, confirmée par les valeurs plus élevées du ratio shoot/root en présence des vers de terre (Figure 8), suggère une allocation différentielle des ressources chez le riz. En effet, bénéficiant d'un accès facilité aux nutriments, les plants peuvent allouer davantage de ressources au développement des parties aériennes. Ce résultat est en accord avec la théorie de Brouwer (1963), qui postule que les plantes moins contraintes par l'acquisition de nutriments peuvent investir moins d'énergie dans les racines et plus dans les parties aériennes.

Pour le riz en particulier, plusieurs auteurs ont rapporté cette allocation préférentielle de biomasse vers les parties aériennes dans des conditions similaires (Ratsiatosika *et al.*, 2021 ; Randriantsoa, 2022).

Malgré la diminution des paramètres racinaires avec l'augmentation de la densité de vers de terre, les résultats d'une forte population (6 individus/pots soit 300 individus/m²) sont semblables à ceux d'une simple densité (3 individus/pots soit 150 individus/m²), particulièrement en termes de biomasse racinaire (Figure 7) et de ratio shoot/root (Figure 8). Ces résultats montrent que les effets positifs des vers de terre sur la plante ne sont pas proportionnels à l'augmentation de la population de vers de terre. Ceci est soutenue par des études antérieures qui ont montré qu'à des densités de vers de terre plus élevées (> 350 individus par m², soit plus de 7 individus/pots), la croissance des vers de terre était plus lente et leur effet sur la croissance des plantes était retardé par rapport à leurs homologues à densité de peuplement plus faible (Kok *et al.*, 2014). Ce phénomène pourrait s'expliquer par une compétition accrue entre les vers de terre pour les ressources disponibles dans le sol à des densités élevées, limitant ainsi leur capacité à influencer positivement la croissance des plantes.

3.1.3 Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz pluvial

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence prépondérante des lombricomposts par rapport au pré-compost sur les différents paramètres de croissance du riz pluvial. Ces résultats corroborent les conclusions des études antérieures démontrant les effets bénéfiques des lombricomposts sur la croissance et la nutrition du riz (Sudhakar *et al.*, 2002). Le lombricompost, produit par l'action combinée des vers de terre et des micro-organismes sur la matière organique, améliore significativement la structure du sol, augmente sa capacité de rétention d'eau et favorise l'activité microbienne bénéfique, contribuant ainsi à une meilleure absorption des nutriments par les plantes et à leur croissance. Dans le cas du riz pluvial, culture dépendant entièrement des précipitations pour son approvisionnement en eau, le lombricompost joue un rôle crucial dans l'amélioration de la fertilité du sol. Parmi les lombricomposts étudiés, celui produit par l'espèce *Eisenia fetida* (EIS) s'est démarqué en favorisant une meilleure croissance du riz, notamment en termes de hauteur des plants, de tallage, et de biomasses végétales. De même, le lombricompost EIS a permis une meilleure nutrition azotée et phosphatée du riz pluvial. Cette supériorité du lombricompost EIS s'explique par sa composition chimique et biologique particulière, résultant du processus de digestion et d'excrétion spécifique à l'espèce *Eisenia fetida*. Cette espèce est reconnue pour son système digestif particulièrement efficace, capable de décomposer rapidement une grande variété de matières organiques, sa production de turricules riche en enzymes stimulant l'activité microbienne, et son taux de reproduction élevé, intensifiant ainsi le processus de lombricompostage (Sharmila *et al.*, 2019). Ainsi, l'espèce *Eisenia fetida* est capable à produire un lombricompost riche en nutriments biodisponibles favorisant la croissance des plantes.

Selon les résultats de Elsayed et al. (2022) et Begum et al. (2022), la teneur totale en NPK ont été améliorées dans tous les lombricomposts par rapport au traitement pré-compost, mais le lombricompost fabriqué par *Eisenia fetida* était le meilleur. Spécifiquement pour l'azote, élément essentiel pour la croissance végétative des plantes, le lombricompost EIS est plus riche en azote d'environ 0,2% que les deux autres lombricomposts (AMY et EUD). De plus, le lombricompost EIS présente le rapport C/N le plus faible (10,34), ce qui explique sa richesse en éléments nutritifs et sa capacité à les rendre facilement assimilables pour les plants de riz. Ainsi les plants du riz ont pu absorber les éléments nutritifs que ce lombricompost contient. Bien que le lombricompost EIS se distingue par sa richesse nutritionnelle, les deux autres lombricomposts (lombricompost produit par *Amyntas minimus* et celui fabriqué avec *Eudrilus eugeniae*) favorisent également la croissance du riz pluvial par des mécanismes complémentaires. En effet, ces lombricomposts pourraient induire des modifications bénéfiques des communautés microbiennes du sol. Ainsi, chaque type de lombricompost contribue positivement à la croissance du riz pluvial, que ce soit principalement par son apport nutritif direct ou indirectement par son influence sur la biologie du sol.

3.2 Effets des lombricomposts et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz pluvial en situation de stress thermique

L'analyse statistique n'a pas révélé d'effet significatif de l'interaction entre le type de lombricompost et la densité d'inoculation des vers de terre en condition de stress thermique. Alors, l'effet combiné de ces deux facteurs n'a pas eu d'influence sur la capacité d'adaptation du riz pluvial au stress thermique. Cependant, les deux facteurs ont montré des effets individuels positifs. D'une part, le lombricompost, riche en nutriments facilement assimilables, pourrait fournir les ressources nécessaires à la plante pour faire face au stress thermique (Ali *et al.*, 2024). Les nutriments supplémentaires apportés par le lombricompost permettent probablement au riz de mieux tolérer les températures élevées en mobilisant les ressources nécessaires pour ses processus physiologiques et métaboliques. D'autre part, les vers de terre, ont également des effets non-nutritionnels qui aident les plants de riz à mieux s'acclimater aux températures élevées (Blouin *et al.*, 2013). Ces effets non-nutritionnels peuvent inclure l'amélioration de la structure du sol, de la porosité et de la capacité de rétention d'eau, créant ainsi un environnement plus favorable pour la croissance du riz sous stress thermique. De ce fait, ces deux facteurs peuvent être utilisés de manière complémentaire pour améliorer la capacité d'adaptation du riz pluvial aux températures élevées.

Alors, les résultats obtenus en conditions de stress thermique n'ont pas permis de valider la deuxième hypothèse relevant que « l'application combinée de lombricompost de meilleure caractéristique chimique produit par l'espèce *Eisenia fetida* et d'une forte population de vers de terre permettra une meilleure résilience du riz pluvial en conditions de stress thermique ».

3.2.1 Effets seuls des vers de terre sur la résilience du riz pluvial sous stress thermique

Bien que l'interaction entre les facteurs n'ait pas montré d'effet significatif, la densité de vers de terre a, quant à elle, exercé une influence significative sur certains paramètres du riz pluvial, notamment sur les paramètres racinaires, sous stress thermique. Les racines jouent un rôle essentiel dans l'absorption, le transport et le stockage de l'eau et des nutriments, ainsi que dans l'ancrage des plantes. Face à la contrainte thermique, les vers de terre induisent des mécanismes d'adaptation sur le riz pluvial. Selon Lynch (2007), les plantes ajustent leur investissement racinaire en fonction des contraintes environnementales.

En effet, la présence de vers de terre, notamment à une densité modérée (3 individus/pot), a entraîné une diminution significative de la biomasse racinaire du riz en condition de stress thermique (Figure 6). Les vers de terre jouent un rôle clé dans la manière dont les plantes ajustent l'allocation de leurs ressources face aux stress environnementaux, comme le stress thermique. En effet, la réduction de la biomasse racinaire, comme observée en présence de vers de terre, se traduit par une augmentation du ratio shoot/root. Le ratio shoot/root représente le rapport entre les biomasses aériennes et les biomasses racinaires. Par conséquent, la présence de vers de terre a permis de maintenir un ratio shoot/root plus élevé en condition de stress, particulièrement à une simple densité. Avec cette densité modérée de vers de terre, les bénéfices apportés par les vers de terre semblent optimaux, sans risque de compétition pour les ressources du sol qui pourrait limiter les avantages pour la plante. Cette efficacité de la densité modérée est également observée sur la disponibilité du phosphore dans le sol. En effet, il n'y a pas eu de différence significative de disponibilité en phosphore entre la double densité et la densité modérée en situation de stress thermique (Figure 13).

Normalement, en réponse à un stress thermique, les plantes ont tendance à orienter davantage leurs ressources vers le développement racinaire, au détriment de la croissance des parties aériennes (Ren *et al.*, 2023). Les plantes investissent prioritairement dans un système racinaire plus important pour mieux capter l'eau et les nutriments. Cependant, la présence de vers de terre, via leur action sur la structure et la fertilité du sol (Sharma *et al.*, 2017), a permis de contrecarrer cette réponse naturelle de la plante. Autrement dit, la présence des vers de terre modifie la stratégie des plantes pour faire face aux contraintes environnementales. En effet, les résultats dans la Figure 8 montrent une meilleure allocation des ressources vers les parties aériennes, potentiellement bénéfique pour la photosynthèse en conditions de stress thermique. Un ratio shoot/root élevé qui se traduit par une forte biomasse aérienne en conditions de stress thermique est avantageux pour le riz pluvial. Les plants de riz peuvent maintenir une surface foliaire plus importante, favorisant ainsi les échanges gazeux pour la photosynthèse et les processus de transpiration essentiels à la thermorégulation de la plante. Ainsi, les vers de terre jouent un rôle clé dans l'adaptation du riz pluvial face au stress thermique.

3.2.2 Effets fertilisants des lombricomposts sur la résilience du riz pluvial sous stress thermique :

Si l'interaction des deux facteurs n'a pas montré d'effet significatif, les résultats ont néanmoins mis en évidence que le type de lombricompost a joué un rôle prépondérant dans la variation de plusieurs paramètres de croissance du riz pluvial sous stress thermique. Ainsi, les lombricomposts EIS et AMY ont permis de maintenir des croissances (hauteur des plants et biomasses végétales) et des indices de végétation (NDVI, PRI) significativement supérieurs à ceux obtenus avec le lombricompost EUD et le pré-compost en condition de stress.

La supériorité de ces deux lombricomposts (EIS et AMY) pourrait s'expliquer par leur teneur plus élevée en nutriments facilement assimilables et en phytohormones, comme suggéré par les travaux de Rehman et al. 2023 sur les mécanismes d'action des lombricomposts dans l'amélioration de la croissance et la résilience des plantes face aux stress abiotiques. Les effets positifs des lombricomposts s'inscrivent dans les conclusions de Toor et al. (2023), qui ont souligné les changements physiologiques des plantes en conditions de stress et le rôle du lombricompost dans l'adaptation à ce stress. L'effet bénéfique des lombricomposts peut être attribué à deux facteurs principaux : la disponibilité continue de macro et micronutriments, ainsi que les effets biologiques liés aux hormones végétales. D'une part, l'amélioration de la nutrition minérale par les lombricomposts joue un rôle crucial dans la résistance des plantes au stress thermique. En effet, la disponibilité accrue des macro et micronutriments, notamment l'azote, le phosphore et le potassium, résulte des activités microbiennes pendant le lombricompostage (Ruz-Jerez *et al.*, 1992 ; Parkin *et al.*, 1994). La meilleure nutrition azotée et phosphatée observée avec les lombricomposts EIS et AMY sous stress thermique est en accord avec les résultats de Ali et al. (2024), qui ont montré que l'amélioration de la nutrition minérale par les lombricomposts contribuait significativement à la résistance des plantes au stress thermique. L'azote, en particulier, joue un rôle crucial dans le maintien d'une photosynthèse efficace en favorisant la synthèse de chlorophylle. L'augmentation de la chlorophylle dans les plantes fertilisées au lombricompost est due à l'optimisation du prélèvement de l'azote, molécule constitutive des structures photosynthétiques, beaucoup plus disponible par ce type d'engrais. Cette nutrition optimisée permet donc aux plantes de mieux faire face aux conditions de stress en soutenant divers processus physiologiques essentiels, y compris le maintien d'une activité photosynthétique efficace comme observé à travers les indices NDVI et PRI. Pour tous les traitements, les valeurs du NDVI sont supérieures à 0,7 et celles du PRI sont au-dessus de 0,03. Cette positivité est particulièrement importante car elle indique que les plantes ont maintenu une activité photosynthétique significative malgré la condition défavorable (Evans, 1989).

Ces résultats soulignent l'importance des lombricomposts dans le soutien des processus physiologiques essentiels, notamment la photosynthèse, qui sont cruciaux pour la résistance des plantes au stress thermique.

D'autre part, l'application de lombricompost constitue un apport exogène d'hormones végétales telles que les auxines, les cytokinines et les gibbérellines (Ravindran *et al.*, 2016). Les phytohormones dans les lombricomposts proviennent principalement de deux sources. Elles sont produites à la fois par l'activité microbienne et le métabolisme des vers de terre. Les microorganismes présents dans le lombricompost, comme les bactéries des genres *Pseudomonas* et *Bacillus*, sont capables de produire des phytohormones (Pirog *et al.*, 2018). Par exemple, Ravindran *et al.* (2016) ont montré que l'activité microbienne dans les lombricomposts contribue significativement à la production d'acide indole-3-acétique (AIA), une auxine importante qui peut stimuler la croissance racinaire et améliorer l'absorption des nutriments sous stress abiotique. De plus, les vers de terre eux-mêmes produisent des substances similaires aux auxines lors de la dégradation de la matière organique (Makkar *et al.*, 2023). Cette production de phytohormones par les vers de terre résulte de l'activité enzymatique lors du passage de la matière organique à travers leur tube digestif (Muscolo *et al.*, 1999). L'apport de ces hormones végétales par les lombricomposts constitue un autre mécanisme clé dans l'amélioration de l'adaptation des plantes au stress thermique parce que ces phytohormones jouent un rôle crucial dans la croissance et du développement des plantes, particulièrement en conditions de stress. Elles agissent en synergie avec l'amélioration nutritionnelle précédemment pour renforcer la résistance des plantes au stress thermique. Ces effets hormonaux, combinés à l'amélioration de la nutrition minérale fournie par les lombricomposts, contribuent à une amélioration des processus physiologiques des plants de riz sous stress thermique, renforçant ainsi leur capacité d'adaptation et leur productivité dans des conditions environnementales défavorables.

3.3 Limites et suggestions d'améliorations

L'étude réside dans une durée relativement courte de 5 semaines. Cette période, bien qu'informatrice, pourrait s'avérer insuffisante pour observer pleinement les effets des lombricomposts et des vers de terre sur la croissance du riz. En effet, les interactions complexes entre les plantes, le sol et la faune édaphique nécessitent souvent plus de temps pour se manifester complètement. Par exemple, l'influence des vers de terre sur le développement du système racinaire est un processus graduel. La formation et la stabilisation des galeries et des turricules améliorent la porosité du sol, la rétention d'eau et la circulation des nutriments, mais leurs effets sur la croissance des racines et l'absorption des nutriments peuvent prendre plusieurs semaines, voire des mois, pour se manifester pleinement. De même, les impacts des lombricomposts sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol évoluent progressivement. La libération progressive des nutriments et l'amélioration de la structure du sol sont des processus qui s'étendent bien au-delà de la période d'étude de 5 semaines.

Pour pallier cette limitation, il serait donc intéressant de prolonger l'expérimentation sur une période plus longue, couvrant l'ensemble du cycle cultural du riz. Cela permettrait de mieux appréhender les bénéfices à long terme de cette approche agroécologique notamment sur le rendement final et la qualité des grains face aux stress environnementaux.

En outre, l'étude a été menée en conditions contrôlées de laboratoire. Bien que les conditions expérimentales en chambre thermostatée aient permis de simuler de manière réaliste les stress thermiques susceptibles d'affecter les cultures de riz pluvial dans les Hautes Terres malgaches, elles peuvent ne pas refléter la complexité des interactions qui se produisent dans les écosystèmes agricoles réels. Les autres aspects tels que la variabilité climatique, les interactions biotiques et l'hétérogénéité du sol mériteraient d'être examinés. Pour adresser ces limitations, il serait pertinent de situer cette étude en conditions de plein champ. De plus, une évaluation économique permettrait de déterminer la viabilité de cette approche. Cela permet d'affiner les recommandations en vue d'une adoption à grande échelle par les agriculteurs des Hautes Terres malgaches.

3.4 Perspectives d'applications pratiques de l'étude

Les résultats de cette étude démontrent que l'association du lombricompost produit par l'espèce *Eisenia fetida* et une densité modérée de vers de terre endogés (*Pontoscolex corethrurus*) constitue une approche prometteuse pour améliorer la résilience du riz pluvial face aux stress thermiques induits par le changement climatique. Cette stratégie de fertilisation bio-organique permet non seulement de mieux nourrir les plantes, mais aussi de stimuler l'activité biologique du sol, favorisant ainsi une meilleure disponibilité des nutriments essentiels comme le phosphore. Les paysans des Hautes Terres devraient donc être encouragés à adopter cette pratique agroécologique combinant l'apport de lombricompost de bonne qualité produit localement à l'aide de l'espèce *Eisenia fetida* et l'inoculation d'une population modérée de vers de terre endogés de types *P. corethrurus*. Cette solution repose sur des ressources naturelles localement disponibles, permettant ainsi aux paysans de s'affranchir progressivement des intrants chimiques coûteux et néfastes pour l'environnement. La production de lombricompost offre aux paysans un moyen accessible d'améliorer la fertilité de leurs sols et de s'adapter avec succès aux nouvelles conditions environnementales.

CONCLUSION

Cette étude a démontré l'efficacité de la fertilisation bio-organique combinant lombricomposts et vers de terre pour améliorer la productivité et la résilience du riz pluvial face aux défis du changement climatique dans les Hautes Terres de Madagascar. L'effet synergique de l'association lombricompost-vers de terre se manifeste principalement sur la disponibilité du phosphore dans les Ferralsols, un nutriment souvent limitant dans ces sols. En outre, une simple densité de vers de terre (1D) s'est avérée optimale pour maximiser les bénéfices sur la biodisponibilité des nutriments. L'augmentation de la densité de vers de terre (6 individus/pot) n'a pas apporté de bénéfices supplémentaires significatifs. Cette observation est particulièrement pertinente pour l'optimisation des pratiques agricoles, car elle indique qu'il n'est pas nécessaire d'introduire une grande quantité de vers de terre pour obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi, l'apport combiné du lombricompost produit par l'espèce *Eisenia fetida* et une simple densité de vers de terre (TN_EIS_1D) s'est avéré particulièrement bénéfique pour stimuler la disponibilité du phosphore dans le sol. De plus, les deux facteurs « types de lombricompost et densité de vers de terre » ont également démontré des effets bénéfiques individuels importants. D'une part, les lombricomposts ont contribué à une meilleure nutrition minérale et à un apport de phytohormones, soutenant ainsi les processus physiologiques essentiels du riz sous stress thermique. D'autre part, les vers de terre, particulièrement à une simple densité, ont joué un rôle déterminant dans l'adaptation du riz en modulant l'allocation préférentielle des ressources vers les parties aériennes. Cette stratégie d'investissement différentiel, caractérisée par un ratio shoot/root plus élevé, a favorisé le maintien d'une activité photosynthétique efficace sous stress thermique, comme en témoignent les valeurs positives des indices NDVI et PRI. Ces résultats soulignent l'importance des interactions complexes entre les vers de terre et les lombricomposts dans l'amélioration de la capacité d'adaptation du riz pluvial face aux contraintes environnementales liées au changement climatique.

Cette approche innovante, basée sur l'utilisation des ressources naturelles locales, représente une solution prometteuse pour renforcer la productivité et la résilience de l'agriculture familiale dans un contexte de changement climatique. Pour consolider et élargir la portée de ces résultats, il serait pertinent d'étendre cette étude à d'autres cultures vivrières importantes dans les Hautes Terres malgaches, comme le maïs et le manioc. Ces cultures, qui font face aux mêmes contraintes climatiques que le riz pluvial, pourraient bénéficier de manière similaire de cette fertilisation bio-organique. Une telle extension de l'étude permettrait d'évaluer la polyvalence de cette solution innovante à l'échelle du système de production agricole dans son ensemble. En développant des pratiques durables pour un éventail plus large de spéculations, les paysans seraient mieux équipés pour maintenir une production agricole diversifiée, contribuant ainsi à améliorer la sécurité alimentaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed, Azza R., M. A. Bayoumi, H.M. Khalil, et M.S. Awaad. 2011. « Role of bio and organic fertilization on sustaining nitrogen requirements for rice production ». *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering* 2 (1): 43-57. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55095>.
- Aira, Manuel, Fernando Monroy, et Jorge Domínguez. 2007. « Earthworms Strongly Modify Microbial Biomass and Activity Triggering Enzymatic Activities during Vermicomposting Independently of the Application Rates of Pig Slurry ». *Science of the Total Environment*, 385(1-3), 252-261
- Ali, Muhammad Aslam, S. K. Md. Fazlay Rabbi, Md. Abdul Baten, Hafsa Jahan Hiya, Shah Tasdika Auyon, Md. Shamsur Rahman, Deboki Kundu, 2024. « Response of Rice Cultivars to Elevated Air Temperature and Soil Amendments: Implications towards Climate Change Adaptations and Mitigating Global Warming Potentials ». *American Journal of Climate Change* 13 (03): 406-26. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133019>.
- Altieri, Miguel A., Clara I. Nicholls, Alejandro Henao, et Marcos A. Lana. 2015. « Agroecology and the Design of Climate Change-Resilient Farming Systems ». *Agronomy for Sustainable Development* 35 (3): 869-90. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Andriamady V.T. 2001. Expérimentation agronomique basée sur la fabrication de lombricompost en vue de l'amélioration de la fertilité des sols. Mémoire de fin d'études à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Agriculture. Université d'Antananarivo. 85p
- Andrianisaina, F. 2017. Production de lombricomposts par des espèces locales de vers de terre et effets de ces fertilisants sur la croissance du riz pluvial. Mémoire de fin d'études à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Agriculture et Développement Durable, Université d'Antananarivo. 80p
- Atiyeh, R M, S Subler, C A Edwards, G Bachman, J D Metzger, et W Shuster. 2000 « Effects of Vermicomposts and Composts on Plant Growth in Horticultural Container Media and Soil ». *Pedobiologia*, 44(5), 579-590
- Bagari G. And Biradar PM. 2017. Analysis of compost and vermicompost produced by the epigeic earthworm, *Eudriluseugeniae* out of different organic wastes. *International journal of current research* 9 (7) : 53875-53879
- Barimalala, R., Raholijao, N., Pokam, W. & Reason, C.J.C. 2021. Potential impacts of 1.5C, 2C global warming levels on temperature and rainfall over Madagascar. *Environmental Research Letters*, 16(4), 044019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abeb34>
- Bayon, Renée-Claire Le, et Roxane Milleret. 2009 « Effects of Earthworms on Phosphorus Dynamics – A Review », n° 2.
- Begum, K S, M A Kashem, et M M H Sarker. 2022 « Effect of Feeding Materials on Productivity and Quality of Vermicompost Produced by Two Earthworms Species ».
- Bernal, M P, J A Alburquerque, et R Moral. 2009. « Composting of Animal Manures and Chemical Criteria for Compost Maturity Assessment. A Review ». *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453.

- Berkes, F., Folke, C. & Colding, J., 2000, Linking social and ecological systems : management practices and social mechanisms for building resilience, *Cambridge University Press*
- Bertrand, Michel, Sébastien Barot, Manuel Blouin, Joann Whalen, Tatiana De Oliveira, et Jean Roger-Estrade. 2015. « Earthworm Services for Cropping Systems. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 35 (2): 553-67. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0269-7>.
- Blanchart E., Raharijaona S., Razafindrakoto M., Becquer T., Bernard L., Trap J., Razafimbelo T., 2019 - « Les sols et notre environnement », une animation diversifiée et interactive sur les services rendus par les sols, dans le cadre de l'Année Internationale des Sols, à Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 26 (1), p. 115-123
- Blanchart, E., O. Ratsiatosika, H. Raveloson, T. Razafimbelo, M. Razafindrakoto, M. Sester, T. Becquer, L. Bernard, et J. Trap. 2020. « Nitrogen Supply Reduces the Earthworm-Silicon Control on Rice Blast Disease in a Ferralsol ». *Applied Soil Ecology* 145 (janvier): 103341. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.003> .
- Blouin, M, Mark Edward Hodson, E A Delgado, G Baker, L Brussard, K R Butt, J Dai, 2013 « A Review of Earthworm Impact on Soil Function and Ecosystem Services » *European Journal of Soil Science*, 64(2), 161-182.
- Bouché, M.B., 1977, Stratégies lombriciennes, *Ecological Bulletins*, pp 122-132
- Brown, G.G.; Pashanasi, B.; Villenave, C.; Patron, J.C.; Senapati, B.K.; Giri, S.; Barois, I.; Lavelle, P.; Blanchart, E.; Blakemore, R.J. Effects of Earthworms on Plant Production in the Tropics. in Earthworm Management. In Tropical Agroecosystems; Lavelle, P., Brussaard, L., Hendrix, P., Eds.; CABI Publishing: Wallingford, UK, 1999; pp. 87–148 [http://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90161-P](http://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90161-P)
- Chapuis-Lardy, L., A. Brauman, L. Bernard, A.L. Pablo, J. Toucet, M.J. Mano, L. Weber., 2010. « Effect of the Endogeic Earthworm *Pontoscolex Corethrurus* on the Microbial Structure and Activity Related to CO₂ and N₂O Fluxes from a Tropical Soil (Madagascar) ». *Applied Soil Ecology* 45 (3): 201-8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.04.006>.
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S., 2016. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland : IUCN. 97 p
- Coulis, M., L. Bernard, F. Gérard, P. Hinsinger, C. Plassard, M. Villeneuve, et E. Blanchart. 2014. « Endogeic Earthworms Modify Soil Phosphorus, Plant Growth and Interactions in a Legume–Cereal Intercrop ». *Plant and Soil* 379 (1-2): 149-60. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2046-4>.
- Dominguez, Jorge, Manuel Aira, et Maria Gomez-Brandon. 2010 « Vermicomposting: Earthworms Enhance the Work of Microbes » *Microbes at work: from wastes to resources*, 93-114
- Elsayed, A., N. Mahmoud, M. Abdel-Mageed, et M. Abd El-Rahim. 2022. « Impact of Earthworm Species and Growth Habitats on the Quality of Vermicompost ». *Archives of Agriculture Sciences Journal* 0 (0): 288-304. <https://doi.org/10.21608/aasj.2023.179910.1136>.
- Evans, J., 1989, Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants, *Oecologia*, 78 (1), pp 9-19
- FAO, 2018. The 10 elements of agroecology guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. Rome, Italy. 12 p.

- Farooq, Ahsan, Nageen Farooq, Haseeb Akbar, Zia Ul Hassan, et Shabbir H. Gheewala. 2023. « A Critical Review of Climate Change Impact at a Global Scale on Cereal Crop Production ». *Agronomy* 13 (1): 162. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010162> .
- Frederickson, J., Howell, G., & Hobson, A., 2007, Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics, *European Journal of Soil Biology*, 43, pp 320 - 326
- Griffon M. (2013) Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive? Editions Quæ, 220 p
- Gupta, Renuka, Anoop Yadav, et V. K. Garg. 2014. « Influence of Vermicompost Application in Potting Media on Growth and Flowering of Marigold Crop ». *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 3 (1): 47. <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0047-1> .
- Harvey, Celia A., Zo Lalaina Rakotobe, Nalini S. Rao, Radhika Dave, Hery Razafimahatratra, Rivo Hasinandrianina Rabarijohn, Haingo Rajaofara, et James L. MacKinnon. 2014. « Extreme Vulnerability of Smallholder Farmers to Agricultural Risks and Climate Change in Madagascar ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 369 (1639): 20130089. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0089> .
- Kikstra, Jarmo S., Zebedee R. J. Nicholls, Christopher J. Smith, Jared Lewis, Robin D. Lamboll, Edward Byers, Marit Sandstad., 2022. « The IPCC Sixth Assessment Report WGIII Climate Assessment of Mitigation Pathways: From Emissions to Global Temperatures ». *Geoscientific Model Development* 15 (24): 9075-9109. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-9075-2022> .
- Köhl K., 2015. Growing rice in controlled environments: Rice in controlled environments. *Annals of Applied Biology*. 167 (2): 157-77. <https://doi.org/10.1111/aab.12220>
- Kok HY, Azwady AA, Loh KE, Muskhazli M, Zulkifli SZ. 2014. Optimal stoking density for culturing tropical soil-dwelling earthworm, *Pontoscolex corethrurus*. *Sains Malaysian* 43 (2):169-173
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33, 159-193
- Loranger-Merciris, G., Y.-M. Cabidoche, B. Deloné, P. Quénéhervé, et H. Ozier-Lafontaine. 2012. « How Earthworm Activities Affect Banana Plant Response to Nematodes Parasitism ». *Applied Soil Ecology* 52 (janvier): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.10.003> .
- Lynch, J. P. 2007. Les racines de la deuxième révolution verte. *Journal australien de botanique*, 55(5), 493-512
- Machfudz, Masyhuri, et Indiyah Murwani. 2017. « combined effect of vermicompost and earthworm *Pontoscolex Corethrurus* inoculationon »
- Makkar, Cinny, Jaswinder Singh, Chander Parkash, Sharanpreet Singh, Adarsh Pal Vig, et Salwinder Singh Dhaliwal. 2023. « Vermicompost Acts as Bio-Modulator for Plants under Stress and Non-Stress Conditions ». *Environment, Development and Sustainability* 25 (3): 2006-57. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02132-w>.
- Mandimbiniaina H., 2009, Risques climatiques et activités agricoles dans les deux fokontany Antsampanimahazo et Amberobe, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Géographie, Faculté des Lettres et Sciences humaines, 77 p

- Medina-Sauza, Regina M., Marycruz Álvarez-Jiménez, Alix Delhal, Frédérique Reverchon, Manuel Blouin, José A. Guerrero-Analco, Carlos R. Cerdán, Roger Guevara, Luc Villain, et Isabelle Barois. 2019. « Earthworms Building Up Soil Microbiota, a Review ». *Frontiers in Environmental Science* 7 (juin):81. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00081>.
- Muscolo, A, F Bovalo, F Gionfriddo, et S Nardi. 1999. « Earthworm Humic Matter Produces Auxin-like Effects on *Daucus Carota* Cell Growth and Nitrate Metabolism ». *Soil Biology and Biochemistry*.
- Manyuchi M.M., Kadzungura L., Phiri A., Muredzi P., 2013. Effect of Vermicompost, Vermiwash and Application Time on *Zea Mays* Growth. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 2 : 638-641.
- Odum, E. P., 1971, Fundamentals of ecology. *Printing Company Ltd*.
- Oliveira L., Coroller M., Perrin A., Martin G. G., 2019. Résilience des systèmes agricoles : Définition. INRAE. Dictionnaire d'Agroécologie. <https://doi.org/10.17180/pzfp-0p53>
- PAM, 2018. L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde : renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition. 198 p
- Parkin, T.B.; Berry, E.C. Nitrogen transformations associated with earthworm casts. *Soil Biol. Biochem.* 1994, 26, 1233–1238. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90148-1)
- Peng, Shaobing, Jianliang Huang, John E. Sheehy, Rebecca C. Laza, Romeo M. Visperas, Xuhua Zhong, Grace S. Centeno, Gurdev S. Khush, et Kenneth G. Cassman. 2004. « Rice Yields Decline with Higher Night Temperature from Global Warming ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101 (27): 9971-75. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403720101> .
- Pirog. T. P. 2018. « Microbial synthesis of phytohormones ». *Biotechnologia Acta* 11 (1): 5-24. <https://doi.org/10.15407/biotech11.01.005>.
- Postma-Blaauw, Maria B., Jaap Bloem, Jack H. Faber, Jan Willem Van Groenigen, Ron G.M. De Goede, et Lijbert Brussaard. 2006. « Earthworm Species Composition Affects the Soil Bacterial Community and Net Nitrogen Mineralization ». *Pedobiologia* 50 (3): 243-56. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.02.001>.
- Rabeharisoa L. 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences naturelles. 199p
- Raboin, Marie, Alain Ramanantsoanirina, Luc Dzido, Julien Frouin, Tendro Radanielina, Didier Tharreau, Julie Dusserre, et Nourullah Ahmadi. 2013 « Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection ».
- Raharimala S. & Audouin S. (2021) SECuRE, compte rendu synthétique des ateliers de restitution des résultats issus de l'évaluation paysanne croisée avec les indicateurs scientifiques. Rapport interne, <https://agritrop.cirad.fr/598333/>
- Raharison, T. S., Andrianariseheno, M., Randriamihary, S., Bélières, J. F., et Raharimalala, S., 2022, « Le lombricompost dans la pratique des agriculteurs : adoption et adaptation par les EAF de Vakinankaratra », *Journal de l'agroécologie* (14), p. 23 – 41

- Rakotomanga, Diane, Éric Blanchart, Bodovololona Rabary, Richard Randriamanantsoa, Malaladiana Razafindrakoto, et Patrice Autfray. 2016. « Diversité de la macrofaune des sols cultivés sur les Hautes-Terres de Madagascar ». *BASE*, 495-507. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13314> .
- Raminoarison, Manoa, Tantely Razafimbelo, Tovohery Rakotoson, Thierry Becquer, Eric Blanchart, et Jean Trap. 2020. « Multiple-Nutrient Limitation of Upland Rainfed Rice in Ferralsols: A Greenhouse Nutrient-Omission Trial ». *Journal of Plant Nutrition* 43 (2): 270-284. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676906> .
- Ranaivoarisoa, Holy, Solofoniaina Ravoninjiva, Sylvain Ramanarivo, et Romaine Ramanarivo. 2016. « Vermiculture for Sustainable Organic Agriculture in Madagascar ». *Horticulturae* 3 (1): 2. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3010002>.
- Randriamarolaza, Luc Yannick Andréas, et Enric Aguilar. 2023. « Rainy Season and Crop Calendars Comparison between Past (1950–2018) and Future (2030–2100) in Madagascar ». *Meteorological Applications* 30 (5): e2146. <https://doi.org/10.1002/met.2146>.
- Randriantsoa, T. 2022. Potentiel du lombricompost et des vers de terre à améliorer la résilience climatique du riz pluvial : Essai en situation contrôlé. Mémoire de fin d'études à l'École Supérieure des Sciences Agronomiques, Mention Agriculture et Développement Durable, Université d'Antananarivo. 73p
- Ratnasari, Anisa. 2023. « A Review of the Vermicomposting Process of Organic and Inorganic Waste in Soils: Additives Effects, Bioconversion Process, and Recommendations ».
- Ratsiatosika, Onja, Malaladiana Razafindrakoto, Tantely Razafimbelo, Michel Rabenarivo, Thierry Becquer, Laetitia Bernard, Jean Trap, et Eric Blanchart. 2021. « Earthworm Inoculation Improves Upland Rice Crop Yield and Other Agrosystem Services in Madagascar ». *Agriculture* 11 (1): 60. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010060> .
- Ratsiatosika, O., J. Trap, V. Herinasandratra, T. Razafimbelo, L. Bernard, et E. Blanchart. 2024. « Earthworms Enhance the Performance of Organic Amendments in Improving Rice Growth and Nutrition in Poor Ferralsols ». *Soil Biology and Biochemistry* 195 (août):109477. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109477>.
- Razafindrakoto M., 2012. Etude des Oligochètes de Madagascar : Taxonomies, écologies et distributions. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, spécialité : Biologie Animale, 151p
- Ravindran, Balasubramani, Jonathan W.C. Wong, Ammayappan Selvam, et Ganesan Sekaran. 2016. « Influence of Microbial Diversity and Plant Growth Hormones in Compost and Vermicompost from Fermented Tannery Waste ». *Bioresource Technology* 217 (octobre):200-204. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.032>.
- Rehman, Sami Ur, Federica De Castro, Alessio Aprile, Michele Benedetti, et Francesco Paolo Fanizzi. 2023. « Vermicompost: Enhancing Plant Growth and Combating Abiotic and Biotic Stress ». *Agronomy* 13 (4): 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>.
- Ren, H., Bao, J., Gao, Z., Sun, D., Zheng, S. & Bai, J., 2023, How rice adapts to high temperatures, *Frontiers in plant science*, 14, 1137923
- Rouse, J.W., 1973, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, vol. 1. Third ERTS Symposium, NASA, Washington, DC, pp 309 – 317

- Ruz-Jerez, B.; Ball, P.R.; Tillman, R. Laboratory assessment of nutrient release from a pasture soil receiving grass or clover residues, in the presence or absence of *Lumbricus rubellus* or *Eisenia fetida*. *Soil Biol. Biochem.* 1992, 24, 1529–1534
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90145-N](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90145-N)
- Sarthou, J.P., 2016, Santé des sols, *Dictionnaire d'Agroécologie*
- Sharma, S., Pradhan, K., Satya, S., & Vasudevan, P. (2005). Potentiality of earthworms for waste management and in other uses—A review. *The Journal of American Science*, 1(1), 4-16
- SECURE, 2020. Gestion comparée de la fertilité au niveau des exploitations agricoles familiales du Moyen-Ouest de la région Vakinankaratra et des Hautes-Terres de la région Itasy à Madagascar. Avril 2020. 23 p. Razafindrakoto M., 2012. Etude des Oligochètes de Madagascar : Taxonomies, écologies et distributions. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, spécialité : Biologie Animale, 151p
- Sudhakar, G, P Subbian, et A Velayutham. 2002 « Effect of vermicompost application on the soil properties, nutrient availability, uptake and yield of rice - a review ».
- Tittonell, P., 2014, Ecological intensification of agriculture-sustainable by nature, *Current Opinion in environmental sustainability*, 8, pp 53-61
- Toor, Muhammad Danish, Abdurrahman Ay, Izhar Ullah, Salih Demirkaya, Rıdvan Kızılkaya, Adil Mihoub, Adil Zia,. 2024. « Vermicompost Rate Effects on Soil Fertility and Morpho-Physio-Biochemical Traits of Lettuce ». *Horticulturae* 10 (4): 418.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae10040418>.
- Trap, Jean, Eric Blanchart, Onja Ratsiatosika, Malaladiana Razafindrakoto, Thierry Becquer, Andry Andriamananjara, et Christian Morel. 2021. « Effects of the Earthworm *Pontoscolex Corethrurus* on Rice P Nutrition and Plant-Available Soil P in a Tropical Ferralsol ». *Applied Soil Ecology* 160 (avril): 103867.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103867> .
- Vambe, McMaster, Roger M. Coopoosamy, Georgina Arthur, et Kuben Naidoo. 2023. « Potential Role of Vermicompost and Its Extracts in Alleviating Climatic Impacts on Crop Production ». *Journal of Agriculture and Food Research* 12 (juin): 100585.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100585> .
- Van Groenigen, Jan Willem, Ingrid M. Lubbers, Hannah M. J. Vos, George G. Brown, Gerlinde B. De Deyn, et Kees Jan Van Groenigen. 2014. « Earthworms Increase Plant Production: A Meta-Analysis ». *Scientific Reports* 4 (1): 6365.
<https://doi.org/10.1038/srep06365>.
- Vos, Hannah M.J. 2022. « Earthworm-Enhanced Phosphorus Availability in Soil : From Unravelling the Mechanisms to Assessing Its Significance ». Wageningen University.
<https://doi.org/10.18174/567878>.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. R., 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environ. Exp. Bot.* 61 : 199–223.
- World Reference Base for Soil Resources 2014. In International Soil Classification System for Naming soils and Creating Legends for Soil Maps; World Soil Resources Reports No.106; FAO: Rome, Italy, 2014
- Yoshida S., 1973. Effects of temperature on growth of the rice plant (*Oryza sativa* L.) in a controlled environment. *Soil Science and Plant Nutrition.* 19: 299 – 310

LISTES DES ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérimentation.....	viii
Annexe 2 : Caractéristiques morphologiques et agronomiques de la variété Chhomrong Dhan	ix
Annexe 3 : Caractéristiques écologiques et biologiques des trois espèces de vers de terre	x
Annexe 4 : Dynamique des flux de CO2 issus des pots annexes	xi
Annexe 5 : Résultats des tests statistiques (p-value) des analyses de la variance des principaux effets (types de lombricomposts et densité de vers de terre) et leur interaction sur les variables mesurées	xii

Annexe 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérimentation

PARAMETRES	UNITES	VALEURS
Eléments		
N total	g kg ⁻¹	2,07
P total	g kg ⁻¹	1,43
K échangeable	cmol ⁺ kg ⁻¹	0,06
CEC	cmol ⁺ kg ⁻¹	1,73
Ca échangeable	cmol ⁺ kg ⁻¹	0,42
Mg échangeable	cmol ⁺ kg ⁻¹	0,15
Al échangeable	cmol ⁺ kg ⁻¹	0,59
C total	g kg ⁻¹	29,2
P Olsen	mg kg ⁻¹	3,76
P résine	mg kg ⁻¹	0,47
Acidité		
pH _{eau}		4,70
pH _{KCl}		4,09
Distribution granulométrique		
Argile + limon fin	%	71,3
Limon grossier	%	15,3
Sable fin	%	8,6
Sable grossier	%	4,6
Oxydes		
Fe ₂ O ₃ total	%	31,43
Al ₂ O ₃ total	%	28,13
SiO ₂ total	%	10
Contenus minéraux		
Kaolinite	mg kg ⁻¹	112,48
Gibbsite	mg kg ⁻¹	201,26

Source : Raminoarison, *et al.*, 2020

Annexe 2 : Caractéristiques morphologiques et agronomiques de la variété Chhomrong Dhan

Chhomrong Dhan								
Nom commun	Nom botanique	Dénomination	Nature génétique	Origine (code)	Obtenteur	Référence (collection FOIFA)	Année d'introduction (collection)	Mainteneur
Riz	<i>Oryza Sativa</i>	Chhomrong Dhan	Lignée introduite	Népal	FOIFA / CIRAD	4368	1995	FOIFA



CARACTERES MORPHOLOGIQUES

PANICULE	
• Longueur	: moyenne
• Type	: ouvert
FEUILLE	
• Longueur et largeur des feuilles	: 24 cm * 1,3 cm
GRAIN	
• Couleur des glumelles	: bicolore (jaune/rouge)
• Couleur de l'apex	: violet foncé
• Couleur du péricarpe	: rouge
• Longueur du grain vêtu	: 7,4 mm
• Largeur du grain vêtu	: 3,1 mm
• Poids de 1000 grains (paddy)	: 26 g
• Type de grain	: demi-rond
• Translucidité	: bonne




CARACTERES AGRONOMIQUES

• Aptitude culturale	: pluviale
• Aire de culture	: 1000 -1800 m
• Hauteur du plant	: intermédiaire
• Cycle à 50% de floraison	: 130 jours
• Cycle (à maturité)	: 165 jours
• Tallage	: fort
• Rendement moyen	: 5,3 t/ha
• Résistance au froid (% épislets fertiles)	: 85 %
• Verse	: sensible
• Egrenage	: moyen

Comportement vis-à-vis des bioagresseurs

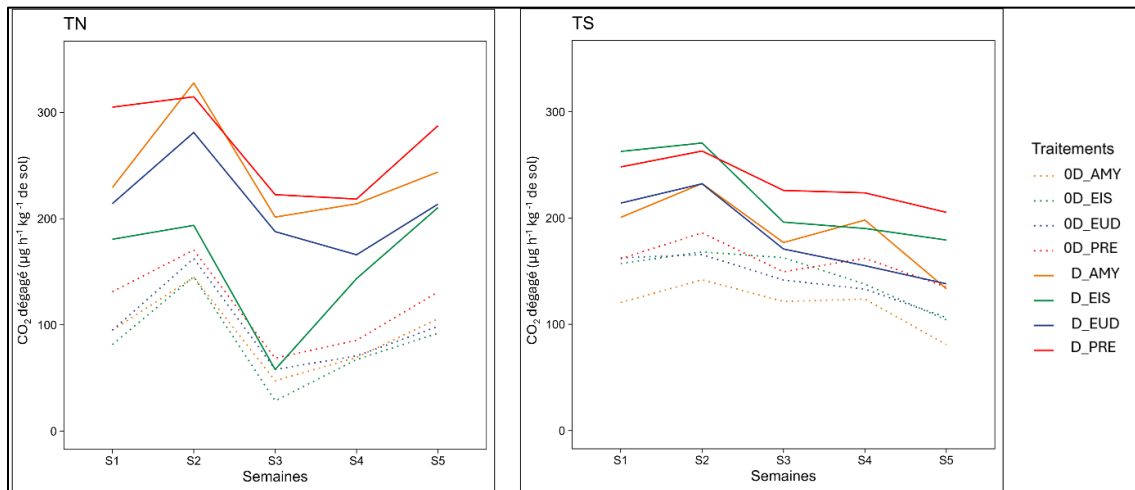
• Résistance à la pyriculariose du cou	: résistant
--	-------------

Annexe 3 : Caractéristiques écologiques et biologiques des trois espèces de vers de terre

Espèce	<i>Eisenia fetida</i> (Savigny, 1826)	<i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867)	<i>Amyntas minimus</i> (Horst, 1893)
Famille	Lumbricidae	Eudrilidae	Megascolecidae
Longueur (mm)	50 à 100	90 à 185	15 à 30
Diamètre (mm)	4 à 8	4 à 8	1,5 à 2,5
Segments	105	161 à 211	74 à 100
Masse (g)	0,55	1	0,05
Couleur	Rouge rayé	Rouge brun	Brun
Origine	Europe	Ouest-Afrique	Asie
Durée de vie (an)	1,5 à 5	1 à 3	Non défini (ND)
Maturité sexuelle (jour)	28 à 30	35 à 50	ND
Image			

Source : Andrianisaina, 2017

Annexe 4 : Dynamique des flux de CO2 issus des pots annexes



Légende : (TN) température normale jour/nuit de 26/18 °C, (TS) stress thermique avec des températures jour/nuit de 31°C/18°C, (AMY) lombricompost fabriqué par le vers Amyntas minimus, (EIS) lombricompost produit par le vers Eisenia fetida, (EUD) lombricompost issu du vers Eudrilus eugeniae, (PRE) pré-compost, (0D) sans inoculation de vers, (D) avec inoculation de 1 individu de vers de terre par pot annexe, (S1, S2, S3, S4, S5) les 5 semaines de l'expérience, de la première à la cinquième semaine

Annexe 5 : Résultats des tests statistiques (p-value) des analyses de la variance des principaux effets (types de lombricomposts et densité de vers de terre) et leur interaction sur les variables mesurées

Variables	Résultats des tests statistiques (p value)					
	Types de lombricomposts		Densité de vers de terre		Interaction	
	TN	TS	TN	TS	TN	TS
Taux de survie des vers	0,222 ^{ns}	0,255 ^{ns}	0,637 ^{ns}	0,283 ^{ns}	0,292 ^{ns}	0,835 ^{ns}
Hauteur des plants 7 ^{JAG}	0,122 ^{ns}	0,356 ^{ns}	0,380 ^{ns}	0,873 ^{ns}	0,753 ^{ns}	0,316 ^{ns}
Hauteur des plants 15 ^{JAG}	0,001 ^{**}	0,054 ^{ns}	0,121 ^{ns}	0,772 ^{ns}	0,468 ^{ns}	0,069 ^{ns}
Hauteur des plants 21 ^{JAG}	0,001 ^{**}	0,092 ^{ns}	0,256 ^{ns}	0,093 ^{ns}	0,598 ^{ns}	0,582 ^{ns}
Hauteur des plants 28 ^{JAG}	0,001 ^{**}	<0,001 ^{***}	0,324 ^{ns}	0,807 ^{ns}	0,160 ^{ns}	0,801 ^{ns}
Hauteur des plants 35 ^{JAG}	0,012 ^{**}	0,004	0,527 ^{ns}	0,147 ^{ns}	0,377 ^{ns}	0,152 ^{ns}
Nombre de talles 35 ^{JAG}	0,043.	0,006 [*]	0,454 ^{ns}	0,477 ^{ns}	0,503 ^{ns}	0,446 ^{ns}
NDVI	0,056 ^{ns}	0,029.	0,561 ^{ns}	0,049.	0,241 ^{ns}	0,761 ^{ns}
PRI	0,470 ^{ns}	0,002 [*]	0,989 ^{ns}	0,245 ^{ns}	0,110 ^{ns}	0,132 ^{ns}
Biomasse aérienne	<0,001 ^{***}	0,015.	0,146 ^{ns}	0,656 ^{ns}	0,800 ^{ns}	0,973 ^{ns}
Biomasse racinaire	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	0,178 ^{ns}	<0,001 ^{***}	0,411 ^{ns}	0,078 ^{ns}
Biomasse totale	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	0,455 ^{ns}	0,153 ^{ns}	0,743 ^{ns}	0,946 ^{ns}
Ratio shoot-root	0,554 ^{ns}	0,131 ^{ns}	0,003 [*]	<0,001 ^{***}	0,619 ^{ns}	0,191 ^{ns}
Nombre des racines primaires	0,254 ^{ns}	0,121 ^{ns}	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	0,338 ^{ns}	0,245 ^{ns}
Longueur des racines primaires	0,955 ^{ns}	0,160 ^{ns}	<0,001 ^{***}	0,003 [*]	0,412 ^{ns}	0,623 ^{ns}
Azote total	<0,001 ^{***}	0,033.	0,701 ^{ns}	0,670 ^{ns}	0,794 ^{ns}	0,990 ^{ns}
Phosphore total	<0,001 ^{***}	0,002.	0,467 ^{ns}	0,388 ^{ns}	0,467 ^{ns}	0,847 ^{ns}
Phosphore assimilable	<0,001 ^{***}	0,026.	<0,001 ^{***}	0,022.	0,002.	0,127 ^{ns}
Emission de CO ₂	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	<0,001 ^{***}	0,015 [*]	0,339

JAG : jour après germination

Significations codes : 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

ANOVA : noir ; PERMANOVA : vert