



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques  
Mention Agriculture Tropicale & Développement Durable  
Parcours Biofonctionnement des Sols et Environnement



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur Agronome au grade Master 2

# **Production de lombricomposts par des espèces locales de vers de terre et effets de ces fertilisants sur la croissance du riz pluvial**

Présenté par **ANDRIANISAINA Fanilo**

Promotion ANDRISA (2012-2017)

Soutenu le 22 mai 2017

Devant le jury composé de :

Mr Razafimahatratra Hery

Docteur en Sciences Agronomiques

Président

Mme Razafindramanana Nororsoa

Docteur en Sciences Agronomiques

Examinatrice

Mme Razafindrakoto Malalatiana

Docteur en Sciences de la Vie

Maître de stage

Mr Andriamaniraka Harilala

Docteur HDR en Sciences Agronomiques

Tuteur





*Dédié à ma défunte grand-mère*

*Ravaotsirofo Albertine*

## REMERCIEMENTS

Nos premiers mots s'adressent à toutes les personnes sans lesquelles ce travail n'aurait pu être réalisé. Ainsi, nous aimerions exprimer notre profonde gratitude, particulièrement envers :

➤ Monsieur Razafimahatratra Hery, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), qui nous a fait l'honneur de présider le jury ;

➤ Madame Razafindramanana Norosoa, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'ESSA, qui a accepté d'examiner le travail ;

➤ Madame Razafindrakoto Malalatiana, Docteur en Sciences de la vie, Spécialiste en Ecologie du sol et Taxonomie des vers de terre, Chercheur au Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), qui nous a octroyé des conseils et des appuis prestigieux nécessaires à l'achèvement du travail ;

➤ Monsieur Andriamaniraka Harilala, Docteur HDR en Sciences Agronomiques, Enseignant-Chercheur à l'ESSA, Responsable de la Mention Agriculture Tropicale & Développement Durable (AT2D) à l'ESSA, qui a suivi toutes les réalisations du travail des préparations jusqu'à la rédaction malgré ses nombreuses responsabilités ;

➤ Monsieur Blanchart Eric, Docteur HDR en Ecologie du sol, Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) dans l'UMR Eco&Sols de Montpellier, qui n'a pas ménagé ses efforts aussi bien dans l'encadrement sur le terrain que dans la correction de la rédaction.

Nous aimerions également dédier nos sincères remerciements à :

➤ L'IRD qui nous a appuyés dans nos recherches ;

➤ Tout le personnel du LRI qui nous ont chaleureusement accueillis et offerts leurs aides pour la réalisation du travail ;

➤ Tout le personnel administratif et pédagogique de l'ESSA, notamment de la Mention AT2D sans lequel nous ne serions pas arrivés à ce mémoire de fin d'études ;

Enfin, nous aimerions remercier toute la famille, tous les amis et les proches qui nous ont soutenus tout au long des années d'études.

Merci,  
Fanilo Andrianisaina

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
TABLE DES MATIERES .....	ii
LISTE DES ILLUSTRATIONS .....	v
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vi
RESUME .....	vii
ABSTRACT .....	viii
FINTINA .....	ix
INTRODUCTION .....	1
MATERIELS ET METHODES .....	3
1. Sites expérimentaux .....	3
1.1. Laboratoire des RadioIsotopes .....	3
1.2. Parcelles à Lazaina .....	4
2. Expérimentation I : Fabrication des lombricomposts .....	4
2.1. Lombricompostières .....	4
2.2. Matériels biologiques .....	4
2.2.1. Vers de terre .....	4
2.2.1.1. <i>Eisenia fetida</i> (Savigny, 1826) .....	5
2.2.1.2. <i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867) .....	5
2.2.1.3. <i>Amyntas minimus</i> (Horst, 1893) .....	5
2.2.1.4. <i>Dichogaster saliens</i> (Beddard, 1893) .....	5
2.2.2. Matières organiques .....	6
2.2.2.1. Bouse de vache .....	7
2.2.2.2. Paille de riz .....	7
2.2.2.3. Feuilles de jacinthe d'eau .....	7
2.2.2.4. Feuilles de bananier .....	7
2.2.2.5. Déchets ménagers .....	7
2.3. Préparation des substrats .....	8
2.4. Dispositif expérimental .....	8
2.5. Récolte des lombricomposts .....	9
2.6. Collecte et traitement des données .....	9
2.6.1. Caractéristiques de la lombriculture .....	9
2.6.2. Caractéristiques du lombricompostage .....	10
2.6.3. Caractéristiques du lombricompost .....	10
3. Expérimentation II : Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz .....	10
3.1. Prélèvement du sol .....	10
3.2. Préparation des mésocosmes .....	10

3.3.	Matériel biologique : semences .....	10
3.4.	Dispositif expérimental .....	11
3.5.	Collecte des données .....	11
3.5.1.	Survie des plantes .....	11
3.5.2.	Hauteur des plantes .....	11
3.5.3.	NDVI et PRI .....	12
3.5.4.	Biomasses aériennes et biomasses racinaires .....	12
3.5.5.	Teneur en phosphore total.....	12
3.6.	Traitements des données .....	12
RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....		13
1.	Capacité des vers de terre locaux à lombricomposter différents résidus organiques .....	13
1.1.	Variation de la population de vers de terre .....	13
1.1.1.	Nombre de vers de terre adultes.....	13
1.1.2.	Nombre de cocons et de vers juvéniles.....	14
1.2.	Caractéristiques des lombricomposts .....	14
1.2.1.	Rendement en lombricompost .....	14
1.2.2.	Teneur en éléments majeurs dans les lombricomposts .....	15
1.2.2.1.	Teneur en carbone total.....	15
1.2.2.2.	Teneur en azote total.....	16
1.2.2.3.	Teneur en phosphore total.....	16
1.2.3.	Rapport C/N des lombricomposts .....	17
2.	Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz pluvial.....	17
2.1.	Survie des plants de riz.....	17
2.2.	Hauteurs des plants de riz.....	18
2.2.1.	Evolution des hauteurs du 10 au 45 <sup>e</sup> jour .....	18
2.2.2.	Hauteur au 45 <sup>e</sup> jour .....	19
2.3.	Biomasses végétales.....	20
2.3.1.	Biomasse aérienne .....	20
2.3.2.	Biomasse racinaire .....	21
2.3.3.	Rapport entre biomasse aérienne et biomasse racinaire (Shoot/Root) .....	22
2.4.	Indices physiologiques de la végétation.....	22
2.4.1.	Indice différentiel normalisé de la végétation ou NDVI.....	22
2.4.2.	Indice de réflectance photochimique ou PRI.....	23
2.5.	Teneur en phosphore total des plantes .....	24
3.	Relations entre les caractéristiques des lombricomposts et les propriétés des plants de riz	24
3.1.	Corrélations entre les différents paramètres.....	25
3.2.	Synthèse des effets des lombricomposts sur la croissance du riz .....	27

3.2. Synthèse des effets des lombricomposts sur la croissance du riz .....	27
DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	29
1. Capacité des vers de terre locaux à lombricomposter différents résidus organiques .....	29
1.1. Population de vers de terre .....	29
1.1.1. <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> .....	29
1.1.2. <i>Amyntas minimus</i> et <i>Dichogaster saliens</i> .....	29
1.2. Décomposition des matières organiques .....	30
1.2.1. Effets des vers de terre .....	30
1.2.2. Effets des substrats organiques .....	30
1.3. Teneur en éléments majeurs des lombricomposts .....	31
1.3.1. Effets des vers de terre .....	31
1.3.2. Effets des substrats organiques .....	31
2. Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz pluvial .....	32
2.1. Comparaison des effets des lombricomposts avec les témoins .....	32
2.2. Comparaison entre les lombricomposts .....	33
2.2.1. Effets sur la hauteur et les biomasses végétales .....	33
2.2.2. Effets sur les indices physiologiques de la végétation .....	33
2.2.3. Effets sur la teneur en phosphore total .....	34
3. Perspectives d'applications et de recherches .....	34
3.1. Applications pratiques de l'étude .....	34
3.1.1. Autoproduction individuelle de lombricomposts .....	34
3.1.2. Gestion des déchets ménagers par leur valorisation communautaire .....	34
3.2. Limites du travail et suggestions d'amélioration .....	35
3.2.1. Fiabilité des résultats du lombricompostage .....	35
3.2.2. Applicabilité des résultats pour les agriculteurs .....	35
3.2.3. Possibilités d'études supplémentaires .....	36
CONCLUSION .....	37
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES .....	I
LISTE DES ANNEXES .....	VII

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Compositions chimiques des matières organiques .....	7
Tableau 2: Quantité de matières organiques (en g MS) pour chaque lombricompostière .....	8
Tableau 3: Les différents traitements du lombricompostage.....	9
Tableau 4 : Nombre de cocons et de vers juvéniles à la fin de l'expérience pour les espèces <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> .....	14
Tableau 5 : Pourcentage de décomposition des substrats (en % MS) .....	15
Tableau 6 : Rapport C/N des lombricomposts .....	17
Tableau 7 : Matrice de corrélation de Pearson sur les différents paramètres .....	25

### Liste des figures

Figure 1: Localisation des sites expérimentaux.....	3
Figure 2 : Les vers de terre utilisés dans l'expérimentation .....	6
Figure 3 : Variation du nombre de vers de terre adultes après 54 jours d'élevage .....	13
Figure 4 : Teneur en carbone total dans les lombricomposts .....	15
Figure 5 : Teneur en azote total dans les lombricomposts .....	16
Figure 6: Teneur en phosphore total dans les lombricomposts .....	16
Figure 7 : Pourcentage des plantes vivantes parmi les plantes levées.....	18
Figure 8 : Evolution des hauteurs des plants de riz pendant 45 jours .....	19
Figure 9 : Hauteur des plants de riz au 45 <sup>e</sup> jour .....	20
Figure 10 : Biomasse aérienne des plants de riz.....	21
Figure 11: Biomasse racinaire des plants de riz .....	21
Figure 12: Rapport entre biomasse aérienne et biomasse racinaire des plants de riz.....	22
Figure 13: Indice différentiel normalisé de la végétation des plants de riz.....	23
Figure 14: Indice de réflectance photochimique des plants de riz .....	23
Figure 15 : Teneur en phosphore total dans les plants de riz .....	24
Figure 16 : NDVI et PRI du riz en fonction de la quantité d'azote apporté dans le sol.....	26
Figure 17 : Paramètres du riz en fonction de quantité de phosphore apporté dans le sol.....	26
Figure 18 : Effets des lombricomposts sur les paramètres du riz.....	27
Figure 19 : Indice agronomique des différents traitements .....	28

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>ACP</b>	Analyse en Composantes Principales
<b>ANOVA</b>	ANalysis Of VAriance
<b>AT2D</b>	Agriculture Tropicale & Développement Durable
<b>BD FTM</b>	Base de Données du Foiben-Tsaritanin'i Madagasikara
<b>ESSA</b>	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
<b>FAO</b>	Food and Agricultural Organisation
<b>FJKM</b>	Fianganan'I Jesoa Kristy eto Madagasikara
<b>FLAEF</b>	Ferme Lombricole AgroEcosystèmes Farihitsara
<b>FOFIFA</b>	FOibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
<b>IRD</b>	Institut de Recherche pour le Développement
<b>LRI</b>	Laboratoire des RadioIsotopes
<b>MS</b>	Matière Sèche
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index
<b>Pr</b>	Probabilité
<b>PRI</b>	Photochemical Reflectance Index
<b>SAF</b>	Sampan'Asa ho amin'ny Fampandrosoana
<b>TATA</b>	Tontolo Arovana Tany sy Ala

## RESUME

Le lombricompost est un engrais organique qui améliore la fertilité des sols en modifiant leurs propriétés physico-chimiques et biologiques. Toutefois, le lombricompostage est faiblement exploité à Madagascar, en partie puisque les vers de compost appelés *Eisenia fetida* coûtent chers pour les petits paysans. L'objectif de la présente étude est de montrer que des vers de terre trouvés gratuitement dans la nature, peuvent produire des lombricomposts favorables à la riziculture. L'essai s'est déroulé au Laboratoire des RadioIsotopes en produisant vingt lombricomposts issus de la combinaison de quatre espèces de vers de terre : *E. fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus* et *Dichogaster saliens* et de cinq types de matières organiques : bouse de vache + paille de riz, jacinthe d'eau, feuilles de bananier, déchets ménagers, mélange des matières. Ensuite, ces lombricomposts ont été apportés à raison de 10 tonnes/ha sur du riz pluvial de variété B22 cultivé sur sol ferrallitique, dans des pots avec quatre répétitions. Les résultats du lombricompostage ont montré une forte augmentation du nombre d'*A. minimus* et une mortalité élevée de *D. saliens*. Quant aux paramètres de croissance du riz, les hauteurs des plantes, les biomasses aérienne et racinaire, les indices physiologiques de la végétation sont deux fois plus élevées pour les traitements avec *D. saliens* et ceux avec « mélange des matières », grâce à de plus fortes teneurs en N et P dans les lombricomposts (1,4 - 2,4 % N, 0,4 - 0,6 % P), par rapport aux traitements avec *E. eugeniae* et ceux avec « bouse de vache + paille » qui sont moins riches (0,7 - 1,1 % de N, 0,2 - 0,4 % de P). Ces expérimentations ont montré que les vers de terre locaux peuvent fabriquer des lombricomposts à forte valeur fertilisante à partir de différents substrats organiques facilement disponibles chez les agriculteurs.

Mots-clés : Engrais organique, *Eisenia fetida*, Déchets ménagers, Paramètres de croissance

## ABSTRACT

Vermicompost is an organic fertilizer that has positive effect on soil physical, chemical and biological properties and improves soil fertility. In Madagascar, vermicomposting is not highly practiced by small farmers due to expensive price of *Eisenia fetida*, the vermicompost earthworm usually used. This study aims to show that epigeic earthworms, easily found in nature, can produce good vermicomposts for rice crop. Handled at the Laboratoire des RadioIsotopes, experimentations involve twenty treatments from combination of four species of earthworms: *E. fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus* et *Dichogaster saliens* and five sorts of organic substrates : cow dung + rice straw, water hyacinth, banana leaves, household wastes, association of all substrates. Then, the effects of these vermicomposts on plant growth were tested on upland rice. A 10 tonnes/ha dose of vermicompost was applied on ferrallitique soil to cultivate *Oryza sativa* var. B22 in pots with four replications. During vermicomposting, we found that *A. minimus* had high and speed reproduction rate in organic matter, in contrast with *D. saliens* with high mortality. About rice growth parameters, the vermicomposts produced by *D. saliens* and those from « association of all substrates » gave the best results on height, biomass and vegetation index, while those from *E. eugeniae* and « cow dung + rice straw » show the worst ones. Various contents of nutrients like nitrogen and phosphorus in vermicomposts explain these results (1,4 - 2,4 % N, 0,4 - 0,6 % P for the first and 0,7 - 1,1 % N, 0,2 - 0,4 % P for the second). From this investigation, we can conclude that some local species of earthworms are suitable for vermicomposting different organic substrates easily found by farmers, and can produce good fertilizer.

Keywords: Organic fertilizer, *Eisenia fetida*, Household wastes, Growth parameters

## FINTINA

Ny fampiasana zezika kankana izay zezika organika, dia misy fiantraikany eo amin'ny toetra fizika, simika ary bilojikan'ny tany, ary manatsara ny tsiron-tany. Na izany aza dia mbola vitsy ny famokarana zezika kankana eto Madagasikara noho ny halafon'ireo kankana fampiasa antsoina hoe *Eisenia fetida* ka tsy takatry ny fahafaha-mividin'ny tantsaha. Ny tanjon'ity fikarohana ity dia hampiseho fa misy karazan-kankana hita eto an-toerana sy tsy mila vidiana, kanefa mahavita manamboatra zezika afaka hampitombo ny voka-bary. Ny andrana natao tao amin'ny Laboiraire des RadioIsotopes dia nampiasana karazana zezika roapolo isa, azo avy amina karazana kankana efatra: *E. fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus* et *Dichogaster saliens* sy karazana akora organika dimy: tain'omby + mololom-bary, tsikafona, ravin'akondro, fakon-tokantrano ary fifangaroan'ireo akora rehetra. Rehefa vita ny zezika dia nentina tamina voly vary an-tanety tamina fatra 10 taonina/ha. Ny fambolena dia natao anaty tavy misy tany feralitika ary nampiasana ny karazam-bary B22, naverina in'efatra avy. Ny vokatry ny fikarohana dia nampiseho fa *A. minimus* dia nitombo sy namokatra zezika be, saingy *D. saliens* dia maty ny ankamaroany. Teo amin'ny fitombon'ny voly vary kosa, ny halavany, ny lanjany ary ny famantarana ny faniriny dia avo roa heny tamin'ireo zezika vitan'ny *D. saliens* sy ireo avy amin'ny « fifangaroan'ireo akora rehetra » oharina amin'ireo novokarin'ny zezika namboarin'ny *E. eugeniae* sy ireo avy amin'ny « tain'omby + mololom-bary ». Ny tahan'ireo singa anaty zezika samy hafa no mahatonga izany (1,4 - 2,4 % N, 0,4 - 0,6 % P ilay voalohany, 0,7 - 1,1 % N, 0,2 - 0,4 % P ilay faharoa). Izany andrana natao izany dia naneho fa misy karazan-kankana mahavita zezika tsara avy amina karazana akora organika mora hita ho an'ny tantsaha.

Teny fototra: Zezika organika, *Eisenia fetida*, Fakon-tokantrano, Fitombon'ny voly

## INTRODUCTION

Madagascar figure dans la liste des pays à faible revenu et à déficit alimentaire établie par l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO, 2015). Le pays souffre d'une insuffisance en riz, qui est pourtant la filière la plus dominante avec 87% des ménages agricoles pratiquant la riziculture (Sourisseau *et al.*, 2016). La production nationale, estimée à environ 2,6 millions de tonnes de riz usiné en 2016, n'arrive pas à couvrir les besoins de 24,9 millions d'habitants (Ibrahima & Rakotonirainy, 2016). Ce déficit est dû au faible rendement en paddy inférieur à 2,7 tonnes/ha (FAOSTAT, 2014), alors que le rendement potentiel est de 10 tonnes/ha (FAO, 2004). La fertilité des sols tend à se dégrader, accentuant la baisse de rendement. Les sols des pentes ou « tanety » sont les plus affectés par cette dégradation (Sourisseau *et al.*, 2016). Pourtant, la gestion de la fertilité des sols par l'utilisation d'engrais minéraux est extrêmement faible. En 2014, elle était de 5,5 kg/ha, alors que la moyenne mondiale est de 138 kg/ha (Banque Mondiale, 2017).

Sachant que l'apport d'engrais et le rendement de récolte sont étroitement liés, il est primordial de trouver des sources d'engrais plus disponibles, moins chers, durables et améliorant la production agricole, dont le lombricompost (Ranaivoarisoa *et al.*, 2017). Le lombricompostage est un processus mésophile de décomposition aérobie des matières organiques par l'action combinée des microorganismes et des vers de terre spécialisés dits « épigés » (Edwards & Arancon, 2004). Le lombricompost désigne le produit obtenu qui est un fertilisant organique, riche en nutriments immédiatement disponibles pour les plantes et contient des régulateurs biologiques de croissance (Edwards *et al.*, 2004). Il a une teneur en azote 2 fois plus élevée, un rapport C/N 3 fois plus faible (Bhadauria *et al.*, 2014) et il augmente de 1,2 fois le rendement des cultures (Guo *et al.*, 2015), par rapport au compost conventionnel. Comparé aux engrais chimiques, il permet d'augmenter de 1,5 (Arancon *et al.*, 2003 ; Kandan & Akshmi, 2015) à 2 fois le rendement des cultures (Achshah & Prabha, 2013). Il est généralement utilisé pour l'horticulture, le maraîchage ou l'arboriculture à cause des quantités produites limitées. Pourtant, il pourrait remplacer les engrais chimiques en riziculture (Prasad *et al.*, 2002). Le problème réside principalement dans les investissements élevés requis pour le coût des vers de terre et pour le travail d'élevage (Munroe, 2005).

A Madagascar, même si le lombricompostage commence à se diffuser par des organisations comme TATA, FLAEF, SAF/FJKM, Haingonala, etc., il est encore faiblement pratiqué à cause de la méconnaissance des agriculteurs (Ranaivoarisoa *et al.*, 2017).

Le ver de compost ou ver rouge de Californie (*Eisenia fetida*, Lumbricidae), importé à Madagascar, est l'espèce la plus utilisée grâce à sa forte potentialité en lombricompostage (FLAEF, 2010). Mais il existe d'autres espèces épigées comme *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus*, *Amyntas corticis*, *Dichogaster saliens*, existant naturellement à Madagascar (Razafindrakoto *et al.*, 2010) qui pourraient être exploitées plus facilement par les agriculteurs.

Par ailleurs, les substrats couramment utilisés par les initiateurs du lombricompostage sont généralement peu variés (Morisset, 2012), alors que plusieurs sources de matières organiques, notamment des déchets organiques, peuvent être lombricompostées et transformées en des fertilisants riches (Sinha, 2002).

Cette étude aborde les questions de sécurité alimentaire à Madagascar en proposant des innovations agricoles qui amélioreraient la fertilité des sols des tanety, permettant ainsi une production agricole accrue et durable. Ces innovations reposent sur la production de lombricompost à partir de ressources localement abondantes. Mais, est-ce que le lombricompost produit à partir d'espèces locales de vers de terre et de matières organiques à la portée des agriculteurs, serait-il un bon fertilisant pour la culture de riz pluvial ?

L'objectif de cette étude consiste à analyser la production de lombricomposts par différentes espèces locales de vers de terre à partir de différents résidus organiques et à déterminer la valeur fertilisante des lombricomposts obtenus sur le riz pluvial.

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

- OS1 : Tester la capacité de différentes espèces de vers de terre naturellement présents à Madagascar à transformer différents types de matières organiques en lombricomposts.
- OS2 : Déterminer les effets fertilisants de ces lombricomposts sur la croissance du riz.

Les hypothèses émises en réponse à ces objectifs sont :

- H1 : Différentes espèces locales, épigées, de vers de terre sont capables de se développer et de fabriquer du lombricompost à partir de différents types de matières organiques.
- H2 : Les effets des lombricomposts sur la croissance du riz varient en fonction des vers de terre utilisés et en fonction du type de matières organiques.

Dans cet ouvrage seront exposés, en premier lieu, les matériels et méthodes pour les expérimentations, ensuite les résultats montrant les issues du lombricompostage et la comparaison de leurs effets sur la croissance du riz et en dernier lieu, les discussions et recommandations sur le sujet.

## MATERIELS ET METHODES

De novembre 2016 jusqu'en mars 2017, deux expérimentations ont été menées (Annexe 4). La première étape a été la fabrication des lombricomposts et la seconde, la culture de riz pluvial en mésocosmes<sup>1</sup> suite à une fertilisation par ce type d'engrais.

### 1. Sites expérimentaux

Deux zones sont considérées comme sites : l'une est le lieu de déroulement des manipulations au laboratoire, l'autre est le terrain d'où provient le sol utilisé pour la culture de riz (Figure 1).

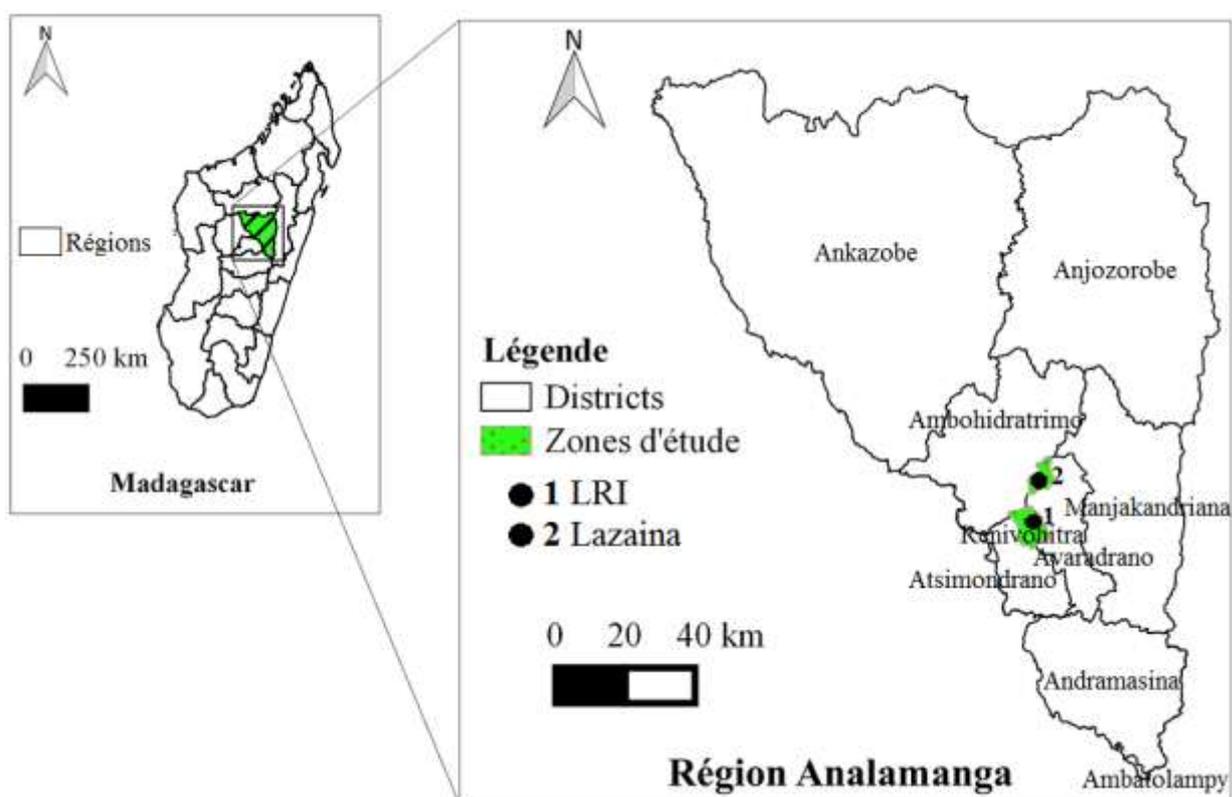


Figure 1: Localisation des sites expérimentaux

Source : BD 200, FTM

#### 1.1. Laboratoire des RadioIsotopes

Les expérimentations ont été menées au Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), qui se trouve dans la Région Analamanga, District Antananarivo Renivohitra, Commune Urbaine d'Antananarivo, Fokontany Ampandrianomby, sur la route d'Andraisoro.

Géographiquement, le laboratoire est localisé sur une latitude de 18°53'54,268" Sud et une longitude de 47°32'50,773" Est, à une altitude de 1303 m (GoogleMap, 2016).

<sup>1</sup> Le mésocosme est un dispositif expérimental de taille moyenne dans lequel les conditions naturelles sont reproduites.

## **1.2. Parcelles à Lazaina**

Lazaina est un village au nord de la ville d'Antananarivo où les sols d'expérimentation ont été prélevés.

C'est un site d'expérimentations géré par le LRI qui se trouve à 12 km de la capitale, dans la Région Analamanga, District Antananarivo Avaradrano, Commune Rurale Ambohimanga, Fokontany Ambolotara. Il se trouve à une altitude de 1274 m, sur la latitude 18°46'55.59" Sud et la longitude 47°32'46.3" Est (GoogleMap, 2016).

## **2. Expérimentation I : Fabrication des lombricomposts**

Cette première partie consistait à produire des lombricomposts (Annexe 1) à partir de vers de terre de diverses espèces et de matières premières de différentes qualités.

### **2.1. Lombricompostières**

Un lombricompostière est un récipient contenant les vers de terre et les matières organiques pour la fabrication de lombricompost.

Dans l'étude, nous avons utilisé des pots en plastique de 25 cm de diamètre et 25 cm de hauteur, dont le fond était perforé de 6 trous de 1,5 cm de diamètre et le sommet recouvert par un tapis d'*Aristida sp.* Cette disposition a permis de conserver l'humidité du substrat, ni en excès ni en défaut, mais adéquate entre 50 et 90 % tout au long du processus (Dominguez & Edwards, 2004). Les pots ont été placés à l'extérieur pour recevoir les eaux de pluie. En l'absence de pluies, nous les avons régulièrement arrosés pour un bon développement des vers de terre.

De fines voiles à mailles serrées ont été placés au fond et sur le dessus des lombricompostières pour empêcher la fuite des vers de terre. Une couche de 2 cm de sol a été mise au fond des pots, notamment pour les vers de terre qui vivent à l'interface entre le sol et la matière organique.

Le lombricompostage exige des conditions aérobies à une température ambiante variant de 25 à 30°C selon l'espèce (Dominguez & Edwards, 2004). Ainsi, une toiture d'ombrage a été installée pour éviter les trop fortes chaleurs.

### **2.2. Matériels biologiques**

#### **2.2.1. Vers de terre**

Les vers de terre utilisés appartiennent à la catégorie écologique des épigés (Annexe 2). Les vers de terre épigés vivent dans la litière en surface du sol ou dans des amas organiques (Card *et al.*, 2004).

Ils ne creusent pas de galerie et ingèrent rarement du sol, contrairement aux espèces endogées et anéciques, mais ils ingèrent de grandes quantités de matières organiques (Pathma & Sakthivel, 2012).

Quatre espèces ont été choisies pour notre fabrication de lombricomposts (Figure 2) : l'espèce importée (*Eisenia fetida*) et trois espèces appartenant aux vers de terre répertoriés à Madagascar (*Eudrilus eugeniae*, *Amyntas minimus*, *Dichogaster saliens*).

Les vers de terre provenaient d'un élevage préalable dans un substrat de déchets de jardin décomposés effectué près du LRI. Les détails sur leurs caractéristiques sont trouvés dans l'Annexe 3a.

#### **2.2.1.1. *Eisenia fetida* (Savigny, 1826)**

L'espèce *E. fetida* est un spécialiste en lombricompostage avec *Eisenia andrei* (Dominguez & Edwards, 2004). Elle vient des régions tempérées, mais peut s'élever dans presque toutes les régions du monde. Elle est très ubiquiste, tolérante, résistante et elle s'adapte rapidement à tous types de matières organiques. Elle est capable de manger une quantité de matières organiques équivalente de sa masse individuelle en un jour et de doubler sa population en 4 mois (Edwards & Arancon, 2004). Ces vers de terre sont importés d'Europe et se vendent à 400.000 ariary/kg.

#### **2.2.1.2. *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867)**

C'est une espèce tropicale classée parmi les vers de terre spécialistes en lombricompostage (Blakemore, 2015), en raison de sa grande taille, sa capacité à ingérer plus de matières organiques et à se reproduire rapidement. Elle peut vivre aussi bien dans le sol que dans des matières organiques (Paradis, 2012).

#### **2.2.1.3. *Amyntas minimus* (Horst, 1893)**

Les vers de terre du genre *Amyntas* sont appelés en malagasy « kankan-jila » parce qu'ils bougent beaucoup dès qu'on les touche. *A. minimus* a une petite taille, comme son nom l'indique. Il est épigé, mais se retrouve dans du sol riche en matières organiques, souvent en sympatrie avec l'espèce endogée *Pontoscolex corethrurus* (Razafindrakoto, 2012).

#### **2.2.1.4. *Dichogaster saliens* (Beddard, 1893)**

L'espèce *D. saliens* a été récemment recensée à Madagascar (Razafindrakoto *et al.*, 2010) mais que l'on retrouve dans de nombreuses localités. Espèce tropicale écologiquement classée épi-endogée, elle est petite et son habitat se trouve généralement dans la rhizosphère qui est riche en matières organiques (Razafindrakoto, 2012).

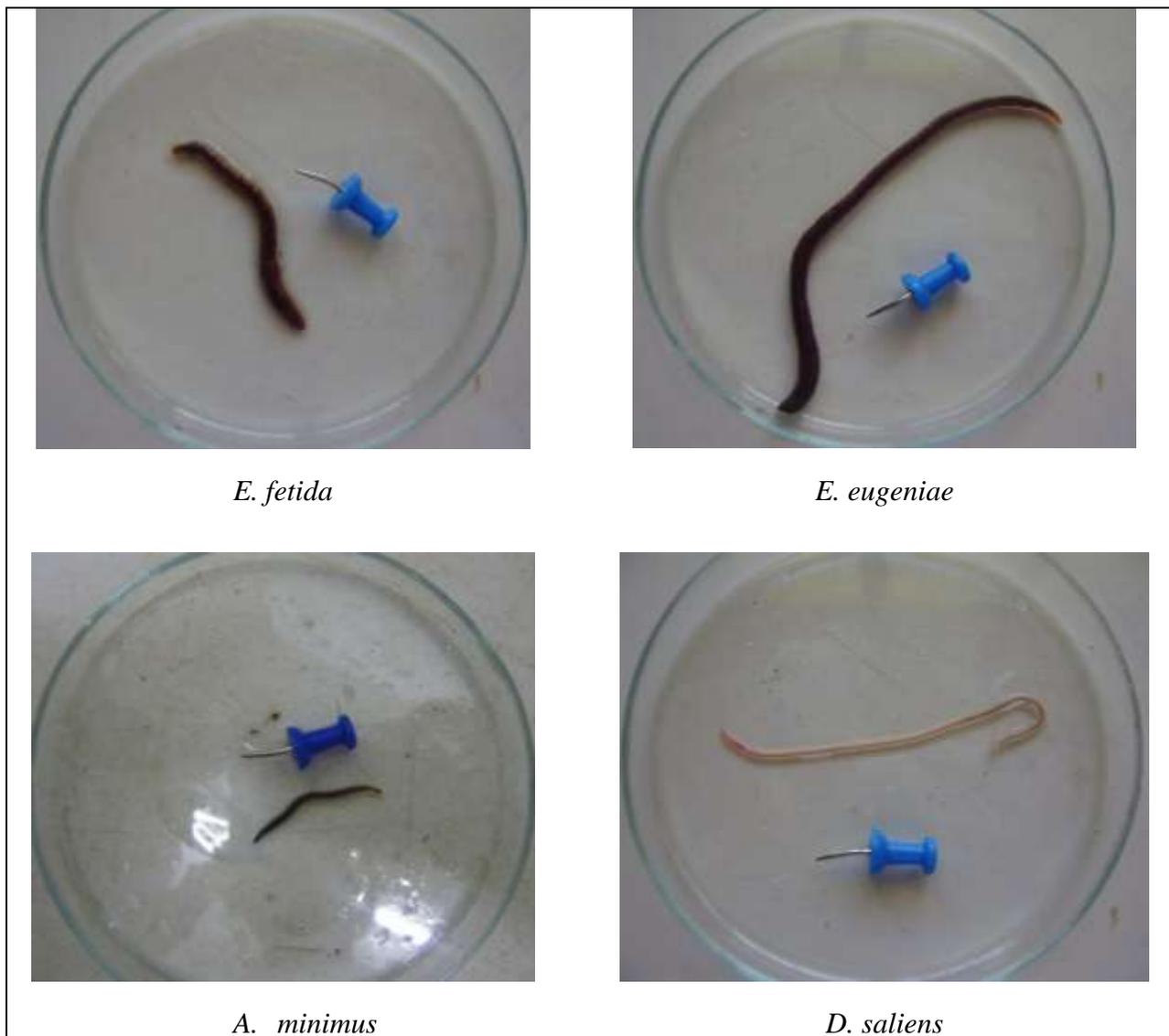


Figure 2 : Les vers de terre utilisés dans l'expérimentation

### 2.2.2. Matières organiques

Pour être accessibles par les agriculteurs, les matières organiques à lombricomposter doivent être des matières premières facilement disponibles, tout en étant riches en nutriments.

Comme l'étude vise à valoriser des matières organiques qui, bien qu'abondantes, sont peu utilisées, les matières choisies ont été : des feuilles de jacinthe d'eau, des feuilles de bananier et des déchets ménagers. Nous avons également utilisé une matière organique de base constituée de bouse de vache mélangée avec de la paille de riz.

Ces matières organiques ont été collectées chez des paysans à Ambohitrimanjaka, à part la jacinthe d'eau qui provenait du marais Masay. Leurs principaux constituants chimiques sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Compositions chimiques des matières organiques

	Bouse	Paille	Jacinthe	Banane	Déchets
MS (%)	40	90	5	20	50
C (%)	25,0	57,7	47,8	10,5	
N (%)	2,0	0,5	1,6	0,2	Non
P (%)	0,7	0,4	0,5	0,1	défini car
K (%)	0,5	0,9	1,4	0,1	trop
C/N	21,5	115,4	59,6	65,6	variable

Sources: El-Haddad et al., 2014 ; Zirbes et al., 2011 ; Kavitha et al., 2010

#### 2.2.2.1. Bouse de vache

La bouse est constituée d'excréments de zébus non mélangés avec la litière. La bouse de vache que nous avons utilisée était âgée de deux semaines. La bouse de vache contient plusieurs microorganismes qui accélèrent le processus de décomposition des matières organiques, ajuste le pH et les constituants chimiques du substrat pour être favorable aux vers de terre et améliore les propriétés nutritives du lombricompost (Suthar, 2009).

#### 2.2.2.2. Paille de riz

La paille de riz est une matière carbonée permettant d'équilibrer le mélange avec la bouse de vache. En plus, elle est la matière la plus utilisée par les producteurs de lombricompost.

#### 2.2.2.3. Feuilles de jacinthe d'eau

La jacinthe d'eau ou *Eichhornia crassipes* est une plante aquatique envahissante des lacs, des étangs et des marais. Elle cause souvent des problèmes écologiques. A Madagascar, elle est surtout utilisée pour l'alimentation des zébus. Abondante et présentant une valeur nutritive élevée, elle pourrait être mieux valorisée par le lombricompostage.

#### 2.2.2.4. Feuilles de bananier

Le bananier ou *Musa sp.* est une plante herbacée vivace avec de larges feuilles. Ses fruits sont consommés tandis que ses feuilles sont utilisées en alimentation animale ou traditionnellement comme emballage. Le compostage des stipes et des feuilles de bananier est usuel, mais le lombricompostage pourrait donner de meilleurs résultats en termes de fertilisation (Sannigrahi, 2009). De plus, un bananier donne une seule fois un fruit, alors la souche mère est souvent coupée après la récolte. Le lombricompostage permettrait de valoriser cette souche mère de bananier.

#### 2.2.2.5. Déchets ménagers

Les déchets ménagers regroupent tout ce qui est déchets de cuisine (épluchures de fruits et légumes, coquilles d'œufs, marc de café, ...), déchets de jardin (feuilles mortes, résidus de plantes, ...) et déchets de bureaux (papiers,...). Les déchets ménagers sont nombreux et au lieu de les jeter, ils pourraient être valorisés en lombricompostage.

### 2.3. Préparation des substrats

Un substrat est un mélange de matières organiques aux proportions bien définies, qui sera mis dans une lombricompostière.

Les matières organiques ont été préalablement préparées afin d'optimiser le lombricompostage. Pour cela, toutes les matières organiques ont été coupées en morceaux d'une taille inférieure à 2 ou 5 cm pour faciliter leur décomposition (El-Haddad *et al.*, 2014).

Cinq types de substrats à tester ont été préparés. Nous avons pris comme référence la matière de base (bouse de vache + paille de riz) qui est couramment utilisée par les producteurs locaux. Ensuite, cette matière de base a été associée respectivement avec de la jacinthe d'eau, des feuilles de bananier et des déchets ménagers. Enfin, un substrat est composé du mélange de toutes les matières organiques, à part la bouse de vache, au cas où cette dernière ne serait pas disponible. Pour obtenir 500 g de substrats en matières sèches dans chaque lombricompostière, les quantités de matières organiques sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2: Quantité de matières organiques (en g MS) pour chaque lombricompostière

Substrats	Matières organiques	Bouse	Paille	Jacinthe	Bananier	Déchets
Bouse de vache + paille (BP)		150	350	-	-	-
BP + Jacinthe d'eau		150	100	250	-	-
BP + Feuilles de bananier		150	100	-	250	-
BP + Déchets ménagers		150	100	-	-	250
Mélange des matières		-	125	125	125	125

Les matières ont été mélangées selon une proportion de matières sèches constituées de 50 % de matières organiques de base (bouse de vache + paille) selon Zirbes *et al.* (2011). Donc, un substrat était composé en masse sèche : de 30 % de bouse de vache (Singh *et al.*, 2013), de 20 % de paille de riz et de 50 % du type de matières organiques selon le traitement.

Une fois mis en pot, les substrats ont été laissés pendant 12 jours pour un précompostage. Ce précompostage est un compostage thermophile qui permet d'éliminer certains pathogènes (Ali *et al.*, 2015), d'anticiper une forte température qui serait fatale pour les vers de terre (Abul-Soud *et al.*, 2009) et d'avancer le niveau de décomposition des matières organiques pour être mieux et rapidement colonisées par les vers de terre.

### 2.4. Dispositif expérimental

Notre dispositif a été mis en place le 15 novembre 2016. L'expérience avait en tout 20 traitements issus de la combinaison des quatre modalités pour les vers de terre et des cinq modalités pour les substrats (Tableau 3).

Tableau 3: Les différents traitements du lombricompostage

Substrats	Vers de terre	<i>E. fetida</i>	<i>E. eugeniae</i>	<i>A. minimus</i>	<i>D. saliens</i>
Bouse de vache + paille (BP)	Fet_BP	Eug_BP	Amy_BP	Dicho_BP	
BP + Jacinthe d'eau	Fet_Jac	Eug_Jac	Amy_Jac	Dicho_Jac	
BP + Feuilles de bananier	Fet_Ban	Eug_Ban	Amy_Ban	Dicho_Ban	
BP + Déchets ménagers	Fet_Déch	Eug_Déch	Amy_Déch	Dicho_Déch	
Mélange des matières	Fet_MO	Eug_MO	Amy_MO	Dicho_MO	

Si l'on prend en compte qu'un kilogramme de vers de terre peut consommer quotidiennement 0,75 kg de matières organiques (Ndegwa *et al.*, 2000), la quantité de vers de terre introduits pour composter les 500 g de substrats pour une durée prévue de 68 jours, était de 0,010 kg, soit 10 g par lombricompostière.

Les vers de terre étant de taille différente, le nombre d'individus équivalent à 10 g par lombricompostière diffère, tel que : 30 pour *E. fetida*, 20 pour *E. eugeniae*, 50 pour *A. minimus* et 80 pour *D. saliens*. Les vers de terre adultes utilisés ont été tirés au hasard de l'élevage.

## 2.5. Récolte des lombricomposts

Les lombricomposts ont été récoltés après que la plupart des matières sont visuellement qualifiées de mures. Un lombricompost est mure lorsqu'il se présente en une matière homogène finement broyée, de couleur brune et de structure granulaire (Dominguez & Edwards, 2011).

Au 54<sup>e</sup> jour du processus, les lombricomposts mures ont été séparés des restes de matières organiques peu ou pas décomposées. Dans le même temps, les vers de terre et les cocons ont été récoltés manuellement pour être identifiés et comptés.

Les lombricomposts ainsi récoltés ont été séchés à l'air libre, pesés et broyés finement pour servir aux analyses chimiques et à l'expérimentation de fertilisation.

## 2.6. Collecte et traitement des données

Les informations sur la fabrication de lombricompost ont été notées, telles que les caractéristiques de l'élevage de vers de terre, les caractéristiques de la dégradation des matières organiques et les caractéristiques des produits finaux. Mais les données obtenues ne sont pas soumises à des analyses statistiques à cause de l'absence de répétition.

### 2.6.1. Caractéristiques de la lombriculture

Les vers de terre dans tous les lombricompostières ont été comptés au début et à la fin de l'expérience afin de déterminer leur croissance et leur mortalité (Annexe 5a). Le nombre de cocons à la fin du processus a également été relevé pour les deux espèces dont il a été possible de compter les cocons (*E. fetida* et *E. eugeniae*) afin de déterminer la reproduction.

### **2.6.2. Caractéristiques du lombricompostage**

Les substrats initiaux et les produits finaux ont été pesés afin de calculer le rendement en lombricompost, qui est le rapport entre la quantité finale de lombricompost et la quantité initiale du substrat.

### **2.6.3. Caractéristiques du lombricompost**

Les teneurs en carbone total et en azote total dans les lombricomposts (Annexe 5b) ont été analysées au laboratoire de l'UMR Eco&Sols à Montpellier en prenant 0,003 g d'échantillon sec pour chaque traitement. La teneur en phosphore total a été analysée au LRI par une extraction à l'acide perchlorique de 0,1 g d'échantillon et un dosage au spectrophotomètre par la méthode au bleu (longueur d'ondes de 882 nm).

## **3. Expérimentation II : Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz**

Afin de tester la valeur fertilisante des lombricomposts produits, ils ont été apportés à une culture en mésocosmes de riz pluvial, effectuée au LRI.

Le riz pluvial a été choisi parce que cette plante-test permet d'obtenir rapidement des résultats sur les paramètres de croissance et elle est très cultivée par les agriculteurs Malagasy.

### **3.1. Prélèvement du sol**

Le sol utilisé provient d'un terrain situé à Lazaina. Il s'agit d'un sol ferrallitique de tanety, représentatif des Hautes-Terres Centrales de Madagascar (Rabeharisoa, 2004). Seul l'horizon 0-10 cm a été prélevé sur le terrain. Le sol a ensuite été broyé et tamisé à 2 mm.

### **3.2. Préparation des mésocosmes**

Les pots de culture ont chacun 16 cm de diamètre et 13 cm de hauteur. Chaque pot était perforé de deux trous bouchés par des cotons hydrophiles, permettant à l'eau excédentaire de s'écouler. La dose de fertilisation est équivalente à celle utilisée par les agriculteurs, soit 10 tonnes/ha. Dans notre étude, nous avons apporté 20 g de lombricompost par pot. Cette quantité d'engrais a été bien mélangée avec 1 kg de sol. Une quantité de 350 ml d'eau a été versée dans chaque pot pour permettre l'humectation adéquate du sol à 80% de sa capacité de rétention en eau.

### **3.3. Matériel biologique : semences**

La variété à cycle court B22 (*Oryza sativa japonica*) a été choisie en se référant à des études qui révélaient que B22 est très cultivée sur les Haute-Terres Centrales (URP SCRiD, 2009). Par ailleurs, elle est très sensible à l'effet des propriétés, notamment nutritives, du sol (Annexe 3b).

Les semences utilisées sont des semences données au LRI par le Centre national malgache de recherches appliquées au développement rural ou FOFIFA pour effectuer les recherches. La densité d'ensemencement est de 3 graines/pot.

### **3.4. Dispositif expérimental**

Pour l'expérimentation, il s'est avéré nécessaire d'avoir comme référence un témoin absolu, c'est-à-dire du sol sans aucun apport d'engrais, et un témoin avec apport de fumier puisque le fumier est l'engrais organique le plus utilisé par les agriculteurs.

Pour 20 lombricomposts et 2 témoins avec 4 répétitions, il y a eu en tout 88 pots de culture.

Les pots ont été installés sur une plate-forme en bois dans la cour du LRI. L'ensemble était recouvert d'une toiture en voile à mailles fines destinée à réduire l'impact des gouttes de pluie et de la chaleur sur les plantes, sans compromettre l'ensoleillement. La disposition des pots sur l'étagère s'est faite de manière aléatoire, avec une permutation toutes les semaines.

Le semis a été effectué le 27 janvier 2017. Les plantes ont bénéficié de l'eau de pluie, mais également d'arrosages à l'eau du robinet en cas d'insuffisance.

### **3.5. Collecte des données**

La culture en mésocosmes a duré 45 jours, une période correspondant au stade plantule jusqu'au début du tallage du riz (Lacharme, 2001). Les paramètres mesurés pour caractériser la croissance du riz sont : les hauteurs des plantes à différentes dates ; les biomasses aérienne et racinaire, les indices physiologiques de la végétation et la teneur en phosphore dans la partie aérienne de la plante à la fin de l'expérience.

#### **3.5.1. Survie des plantes**

A partir de la date de semis, le nombre de grains levés et les dates d'apparition des plantules ont été enregistrés. Au cours de la culture, la mortalité des plantes a été notée afin d'évaluer la vigueur et la survie des plantes en fonction des lombricomposts. Le taux de survie est égal au rapport entre le nombre de plantes vivantes à la fin de l'expérience et le nombre de plantes qui ont levé. Il permet de déterminer les différentes anomalies qui ont causé une faible croissance, voire une dégénérescence de certaines plantes.

#### **3.5.2. Hauteur des plantes**

La hauteur de chacune des plantes a été mesurée à partir du 10<sup>e</sup> jour et tous les trois et quatre jours. Seules les hauteurs des plantes vivantes ont été retenues. Un traitement est caractérisé par la moyenne des hauteurs de toutes les plantes vivantes parmi les 12 semées.

### **3.5.3. NDVI et PRI**

Aux derniers jours avant le démontage des mésocosmes, deux indices de végétation les plus couramment interprétés pour la détermination de la capacité de production des plantes ont été mesurés : l'indice différentiel normalisé de la végétation ou Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) et l'indice de réflectance photochimique ou Photochemical Reflectance Index (PRI). Le NDVI est égal à la différence de réflectance de la chlorophylle dans le visible et des structures cellulaires dans le proche infrarouge. Il permet d'apprécier la capacité photosynthétique des plantes. Quant au PRI, il est influencé par les caroténoïdes, le taux d'absorption de carbone et le régime hydrique. Il peut donc caractériser la productivité des plantes et les éventuels stress.

Dans notre étude, le NDVI a été mesuré à l'aide de l'appareil appelé PlantPen model NDVI300 et le PRI à l'aide d'un PlantPen model PRI200. Huit mesures par pot sont effectuées sur les feuilles de riz les plus larges, mais seule la valeur maximale est retenue pour chaque pot.

### **3.5.4. Biomasses aériennes et biomasses racinaires**

A la fin de l'expérimentation, nous avons séparé la partie aérienne de la partie racinaire dans chaque pot. Elles ont été séchées dans l'étuve à 60° C pendant trois jours, ensuite pesées pour obtenir les biomasses sèches aériennes et racinaires. Les valeurs sont ramenées au nombre de plantes vivantes dans un pot pour avoir la biomasse moyenne d'une plante de ce pot. Ensuite, le rapport entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire, appelé rapport shoot/root, a été calculé.

### **3.5.5. Teneur en phosphore total**

Les teneurs en phosphore total dans les feuilles de riz ont été analysées au LRI. L'extraction s'est faite par la minéralisation d'un échantillon de 0,05 g de la partie aérienne de chaque pot. Puis, le dosage a été fait au spectrophotomètre par la méthode au bleu.

## **3.6. Traitements des données**

Les données collectées (Annexe 5c-d) ont été analysées avec le logiciel statistique XLSTAT 2008. Les résultats représentés pour NDVI et PRI sont la moyenne des valeurs maximales issues de chacune des quatre répétitions, tandis que ceux pour les hauteurs, les biomasses et les teneurs en phosphore sont la moyenne de toutes les mesures.

L'analyse de variance (ANOVA) et l'analyse de la somme des carrées de type III a permis d'interpréter les effets des facteurs étudiés sur les paramètres. Ensuite, un test de Tukey HSD au seuil de signification  $\alpha = 0,05 \%$  a été appliqué aux résultats pour les comparaisons par pair et le regroupement des traitements (Annexe 5e).

Pour déterminer l'indice agronomique des différents traitements, toutes les valeurs moyennes des paramètres de croissance du riz ont été ramenées à une même unité comprise entre 0 et 1. Ensuite, la moyenne de ces indices permet de caractériser l'effet global du traitement sur la croissance du riz (Annexe 5f). Enfin, les données sont évaluées en Analyse en Composantes Principales (ACP).

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 1. Capacité des vers de terre locaux à lombricomposter différents résidus organiques

La fabrication de lombricomposts par les vers de terre est caractérisée par le nombre final d'individus, la quantité et les propriétés nutritives des lombricomposts produits.

#### 1.1. Variation de la population de vers de terre

##### 1.1.1. Nombre de vers de terre adultes

Le nombre de vers de terre introduits au début du lombricompostage est comparé avec le nombre vers de terre comptés à la fin pour observer la variation de la population (Figure 3).

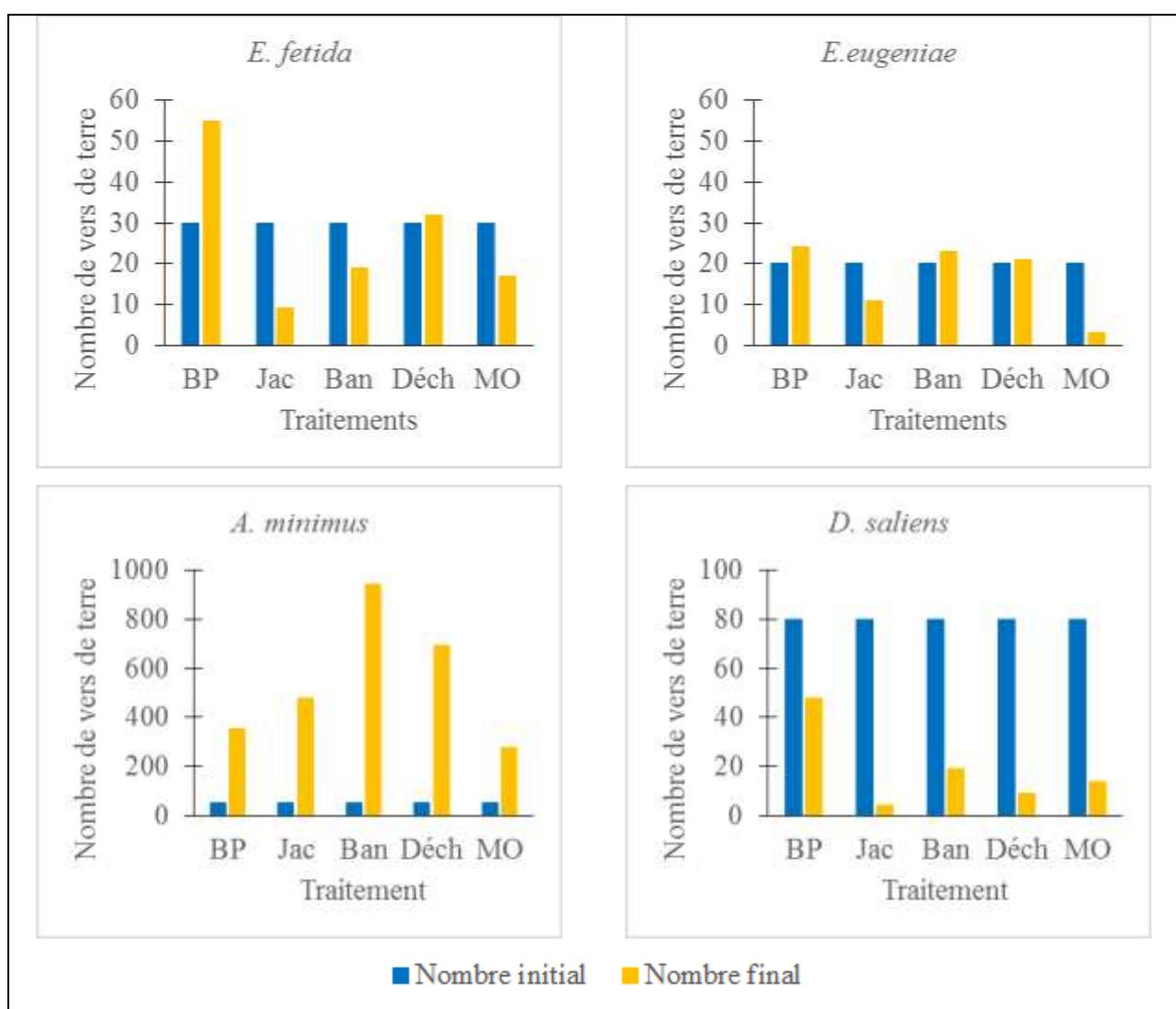


Figure 3 : Variation du nombre de vers de terre adultes après 54 jours d'élevage  
(Légende : BP = Bouse de vache + paille ; Jac = Jacinthe d'eau ; Ban = Feuilles de bananier ;  
Déch = Déchets ménagers ; MO = Mélange des matières)

Le nombre d'*E. fetida* et d'*E. eugeniae* a augmenté dans la « bouse de vache + paille » et dans les « déchets ménagers », mais a diminué dans la « jacinthe d'eau » et dans le « mélange des matières ». Le nombre d'individus de l'espèce *A. minimus* a augmenté considérablement entre le début et la fin de l'expérience quel que soit le substrat, passant de 50 à plus de 352 vers de terre par pot. Cependant, sur 80 individus de *D. saliens* initialement présents, nous n'en avons retrouvé que 4 à 48 vers restants selon le substrat.

Il est à remarquer qu'au comptage, nous avons retrouvé quelques individus d'*A. minimus* dans tous les lombricompostières.

### 1.1.2. Nombre de cocons et de vers juvéniles

Les espèces *E. fetida* et *E. eugeniae* ont donné différents nombre de cocons et de vers juvéniles à la fin de l'expérience (Tableau 4).

Tableau 4 : Nombre de cocons et de vers juvéniles à la fin de l'expérience pour les espèces

<i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i>					
Substrats	Vers de terre	<i>E. fetida</i>		<i>E. eugeniae</i>	
		Cocons	Juvéniles	Cocons	Juvéniles
Bouse de vache + paille		194	150	155	318
Jacinthe d'eau		102	241	104	214
Feuilles de bananier		112	541	208	326
Déchets ménagers		108	359	203	270
Mélange des matières		145	228	3	7

Concernant *E. fetida*, la valeur maximale du nombre de cocons est donnée par la « bouse de vache + paille » et celle du nombre de vers juvéniles par les « feuilles de bananier ». Avec *E. eugeniae*, il y a le plus de descendants dans les « feuilles de bananier » et le moins dans le « mélange des matières ».

## 1.2. Caractéristiques des lombricomposts

### 1.2.1. Rendement en lombricompost

Le rendement en lombricompost représente le pourcentage de matières organiques décomposées et correspond au rapport entre la masse finale du lombricompost (laissant de côté le substrat non transformé par les vers de terre) et la masse initiale du substrat (Tableau 5).

Ces valeurs sont confrontées à des marges d'erreur non définies à cause de la difficulté à séparer le lombricompost du substrat.

Tableau 5 : Taux de décomposition des substrats (en % MS)

Vers de terre	<i>E. fetida</i>	<i>E. eugeniae</i>	<i>A. minimus</i>	<i>D. saliens</i>
Substrats				
Bouse de vache + paille	60	93	85	79
Jacinthe d'eau	100	100	100	66
Feuilles de bananier	100	100	98	81
Déchets ménagers	100	100	91	77
Mélange des matières	100	100	100	100

Après 54 jours de lombricompostage, la masse du produit obtenu varie entre 60 % et 100 % de celle du substrat introduit. Les traitements avec *E. fetida* et *E. eugeniae* ont des rendements plus élevés que ceux avec *D. saliens* et *A. minimus*. Quant aux substrats, aucun traitement utilisant la « bouse de vache + paille » n'arrive à atteindre 100 %, contrairement au « mélange des matières » qui donne un lombricompostage total. Ensuite, « feuilles de bananier », « déchets ménagers » et « jacinthe d'eau » sont dans l'ordre décroissant de pourcentage de décomposition.

## 1.2.2. Teneur en éléments majeurs dans les lombricomposts

### 1.2.2.1. Teneur en carbone total

La teneur en carbone dans les lombricomposts varie de 14,99 % pour l'interaction *E. eugeniae* + jacinthe d'eau, à 29,63 % pour l'interaction *D. saliens* + mélange des matières (Figure 4).

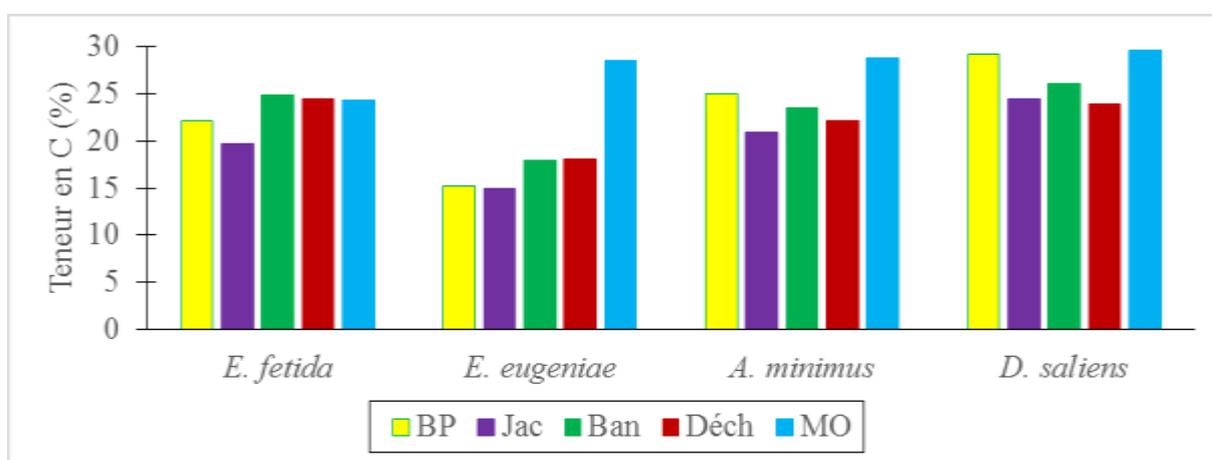


Figure 4 : Teneur en carbone total dans les lombricomposts

(Légende : cf. Figure 3)

Dans un ordre croissant de teneur en carbone, nous avons *E. eugeniae*, *E. fetida*, *A. minimus* et *D. saliens* concernant les vers de terre et « jacinthe d'eau », « déchets ménagers », « feuilles de bananier », « bouse de vache + paille » et « mélange des matières » concernant les substrats.

### 1.2.2.2. Teneur en azote total

La teneur en azote dans les lombricomposts varie de 0,73 % pour *E. eugeniae* + bouse de vache + paille jusqu'à 2,44 % pour *D. saliens* + mélange des matières (Figure 5).

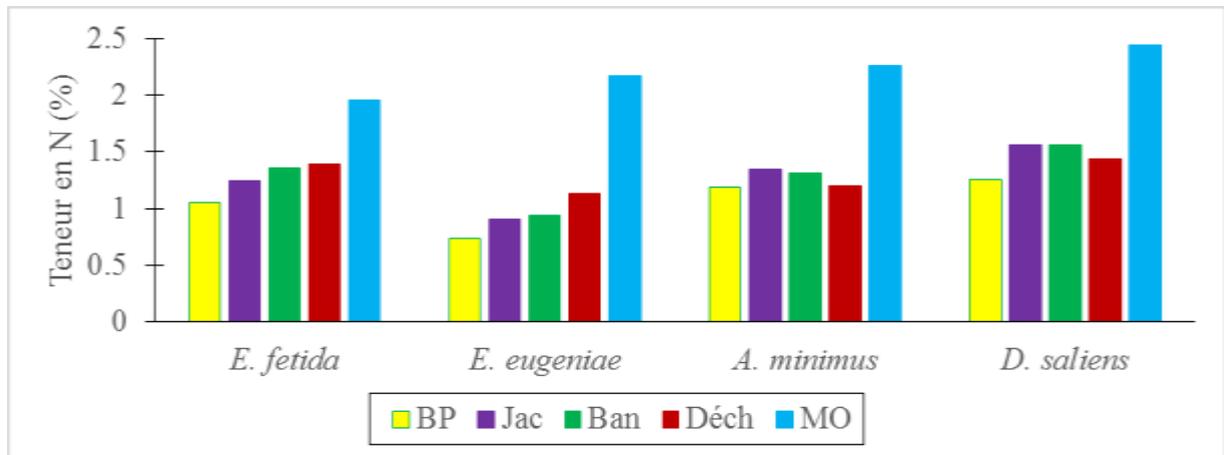


Figure 5 : Teneur en azote total dans les lombricomposts  
(Légende : cf. Figure 3)

Les lombricomposts avec *E. eugeniae* ont généralement des teneurs en azote plus faibles, contrairement à ceux de *D. saliens* qui montrent des valeurs légèrement plus élevées. *E. fetida* et *A. minimus* donnent des lombricomposts à teneurs en azote semblables.

Concernant les substrats, la teneur en azote tend à croître de « bouse de vache + paille », « jacinthe d'eau », « feuilles de bananier », « déchets ménagers », « mélange de matières ».

### 1.2.2.3. Teneur en phosphore total

La teneur en phosphore dans les lombricomposts varie de 0,20 % pour *E. eugeniae* + bouse de vache avec paille jusqu'à 0,58 % pour *D. saliens* + jacinthe d'eau (Figure 6).

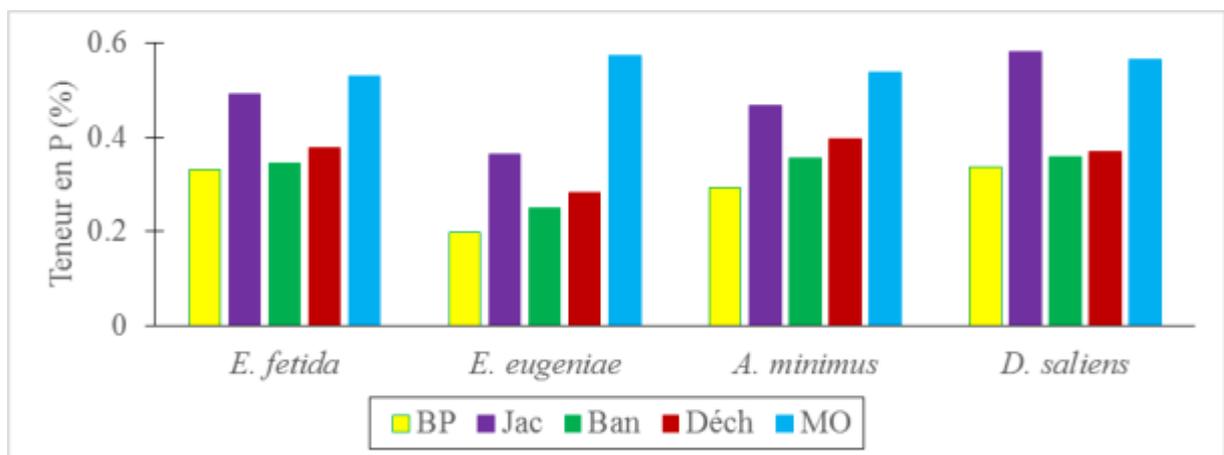


Figure 6: Teneur en phosphore total dans les lombricomposts  
(Légende : cf. Figure 3)

Les teneurs en phosphore sont plus faibles dans les lombricomposts issus d'*E. eugeniae*, mais plus ou moins similaires dans ceux issus des trois autres espèces.

En ce qui concerne les substrats, les teneurs en phosphore sont plus faibles dans « bouse de vache avec paille », « feuilles de bananier » et « déchets ménagers », alors qu'elles sont élevées dans « jacinthe d'eau » et « mélange des matières ».

### 1.2.3. Rapport C/N des lombricomposts

Les rapports C/N des différents lombricomposts varient de 12,1 pour *D. saliens* + mélange des matières jusqu'à 23,2 pour *D. saliens* + bouse de vache + paille (Tableau 6).

Tableau 6 : Rapport C/N des lombricomposts

Vers de terre	<i>E. fetida</i>	<i>E. eugeniae</i>	<i>A. minimus</i>	<i>D. saliens</i>
Substrats				
Bouse de vache + paille	20,9	20,8	21,0	23,2
Jacinthe d'eau	15,8	16,7	15,6	15,6
Feuilles de bananiers	18,3	19,0	17,9	16,7
Déchets ménagers	17,5	15,8	18,5	16,6
Mélange des matières	12,4	13,1	12,7	12,1

Aucune grande différence n'est observée entre les rapports C/N en fonction des vers de terre. Concernant les substrats, les rapports C/N des lombricomposts issus de la « bouse de vache + paille » sont les plus élevés de l'ordre de 21, ceux du « mélange des matières » sont plus les faibles d'environ 12 et les restes ont des valeurs moyennes variant autour de 17.

## 2. Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz pluvial

Le taux de germination des semences de riz est de 94,3 %. Les différents traitements n'ont eu aucun effet sur la germination. La levée des plantules a commencé au cinquième jour du cycle.

### 2.1. Survie des plants de riz

Des anomalies ont été observées sur certaines plantes dès les premiers jours de levée. A partir du 17<sup>e</sup> jour, quelques feuilles ont fané jusqu'à en mourir. Le pourcentage des plantes qui ne sont pas mortes parmi les plantes qui ont poussé est montré dans la figure 7.

Les traitements n'influencent pas ce taux de survie. Toutefois, nous pouvons constater que tous les pots ont perdu au moins une plante, sauf ceux avec les lombricomposts issus d'*A. minimus* dans trois substrats et de *D. saliens* + feuilles de bananier. Le taux de survie est le plus faible dans les traitements avec *D. saliens* et *E. fetida* et le plus faible dans « bouse de vache + paille ».

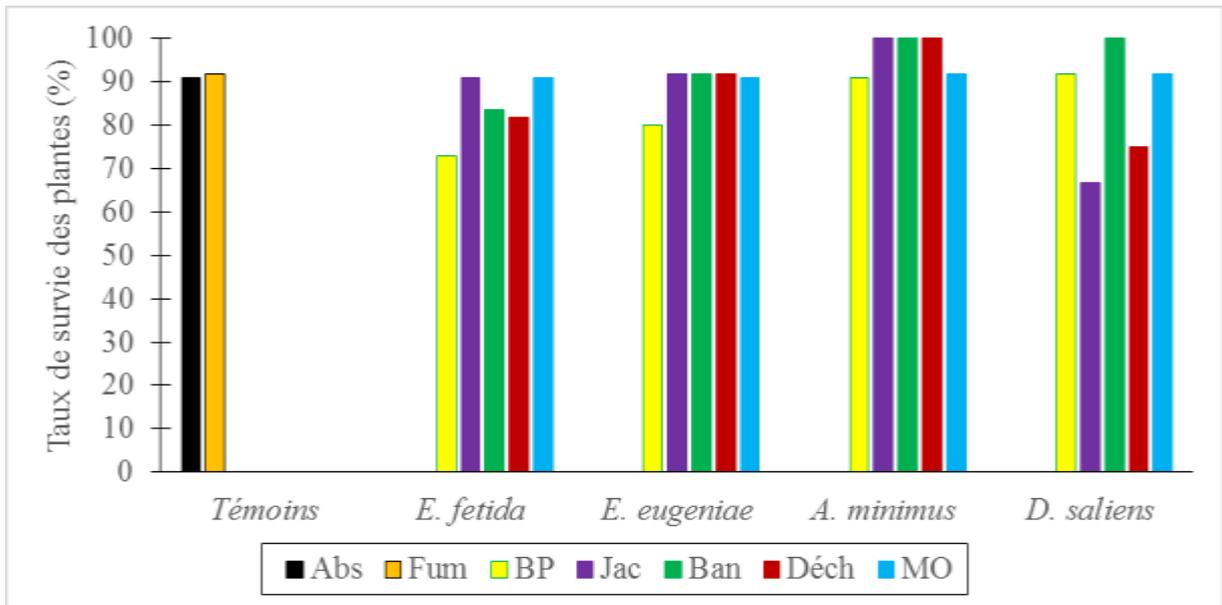


Figure 7 : Pourcentage des plantes vivantes parmi les plantes levées

(Légende : Abs = Absolu ; Fum = Fumier ; BP = Bouse de vache + paille ; Jac = Jacinthe d'eau ; Ban = Feuilles de bananier ; Déch = Déchets ménagers ; MO = Mélange des matières)

## 2.2. Hauteurs des plants de riz

Les hauteurs mesurées à partir du 10<sup>e</sup> jour et tous les trois ou quatre jours, suivent une évolution logarithmique jusqu'au 45<sup>e</sup> jour. Les différences entre les traitements ne sont très concrètes qu'à partir du 20<sup>e</sup> jour. A partir du 31<sup>e</sup> jour, les plantes ne croissent plus que de très petits centimètres.

### 2.2.1. Evolution des hauteurs du 10 au 45<sup>e</sup> jour

Afin d'observer les différences entre les lombricomposts et de les comparer avec les témoins, la figure 8 illustre globalement l'évolution des hauteurs en fonction des vers de terre et des substrats.

La plupart des traitements donnent un meilleur résultat par rapport aux témoins (témoin absolu et témoin avec fumier) en termes de hauteur des plants de riz, à l'exception des lombricomposts issus de la « bouse de vache + paille » qui ont les mêmes effets que les témoins, voire des effets plus faibles comme c'est le cas pour *E. eugeniae*.

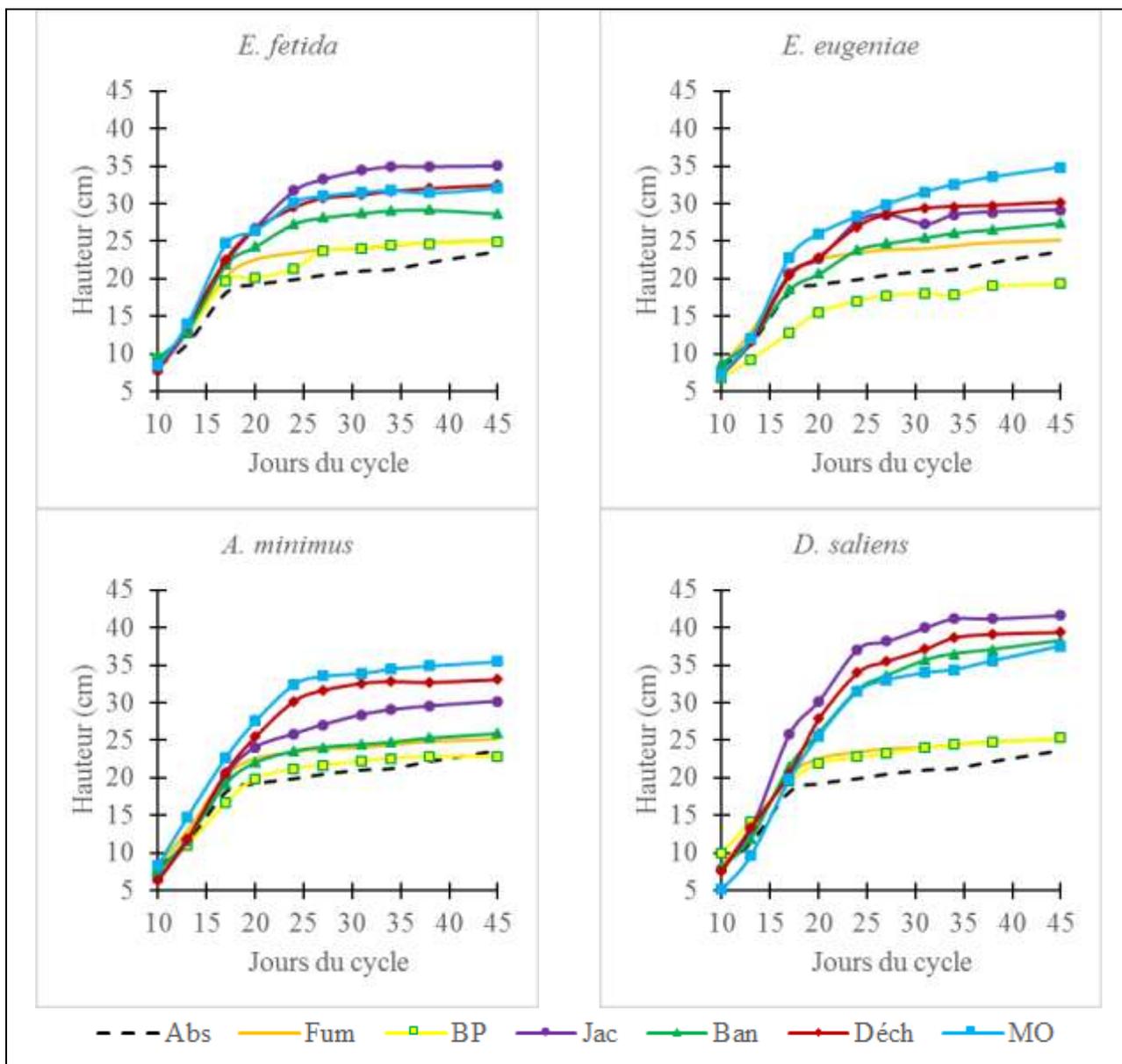


Figure 8 : Evolution des hauteurs des plants de riz pendant 45 jours  
(Légende : cf. Figure 7)

### 2.2.2. Hauteur au 45<sup>e</sup> jour

Pour observer les différences significatives entre les traitements, seules les dernières hauteurs mesurées ont été comparées (Figure 9).

Parmi les lombricomposts, l'effet des vers de terre ainsi que celui des substrats sont tous significatifs ( $Pr < 0,0001$ ) sur les hauteurs des plantes. *D. saliens* a donné les plantes les plus significativement hautes atteignant plus de 40 cm en fin d'expérience, tandis que les valeurs obtenues des autres espèces ne sont pas significativement différentes entre elles.

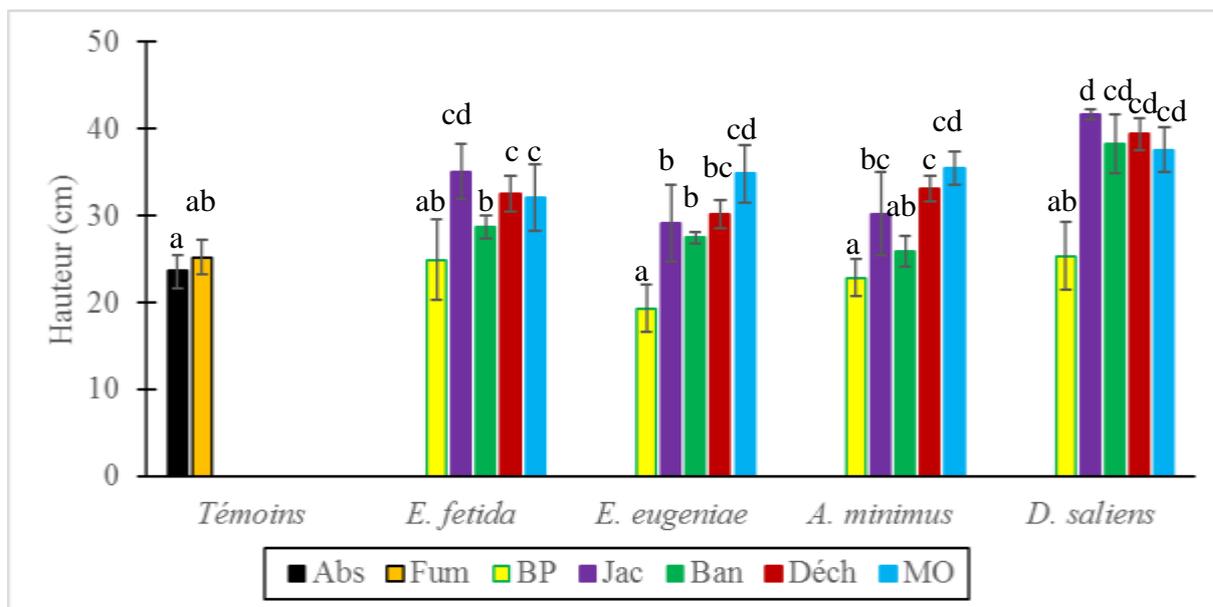


Figure 9 : Hauteur des plants de riz au 45<sup>e</sup> jour  
(Légende : cf. Figure 7)

Quant aux substrats, la « bouse de vache + paille » donne la plus faible hauteur, suivie des « feuilles de bananier ». Les « déchets ménagers », la « jacinthe d'eau » et le « mélange des matières » ne sont pas différents significativement et donnent des hauteurs élevées. L'effet des interactions vers-substrats avec une valeur de  $Pr = 0,021$  indique que le lombricompost obtenu avec *E. eugeniae* + bouse de vache + paille donne la plus faible hauteur ( $19,3 \pm 2,7$  cm), à l'opposé de *D. saliens* + jacinthe d'eau ( $41,6 \pm 0,6$  cm).

### 2.3. Biomasses végétales

Les biomasses aériennes et les biomasses racinaires moyennes par plant ont été calculées à partir de la biomasse totale dans un pot, ramenée au nombre de plants vivants comptés dans le pot. Ensuite, le rapport entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire donne le ratio appelé shoot/root.

#### 2.3.1. Biomasse aérienne

L'interaction *E. eugeniae* + bouse de vache + paille donne la plus faible biomasse ( $0,07 \pm 0,017$  g), alors que *D. saliens* + jacinthe d'eau en donne la plus élevée ( $0,3 \pm 0,033$  g) (Figure 10).

Les traitements ont un effet significatif sur la biomasse aérienne des plantes ( $Pr < 0,0001$ ). L'effet de *D. saliens* est significativement plus élevé que les trois autres espèces. La « bouse de vache + paille » donne la plus faible biomasse, à l'opposé de la « jacinthe d'eau » et du « mélange des matières » qui donnent les biomasses les plus élevées.

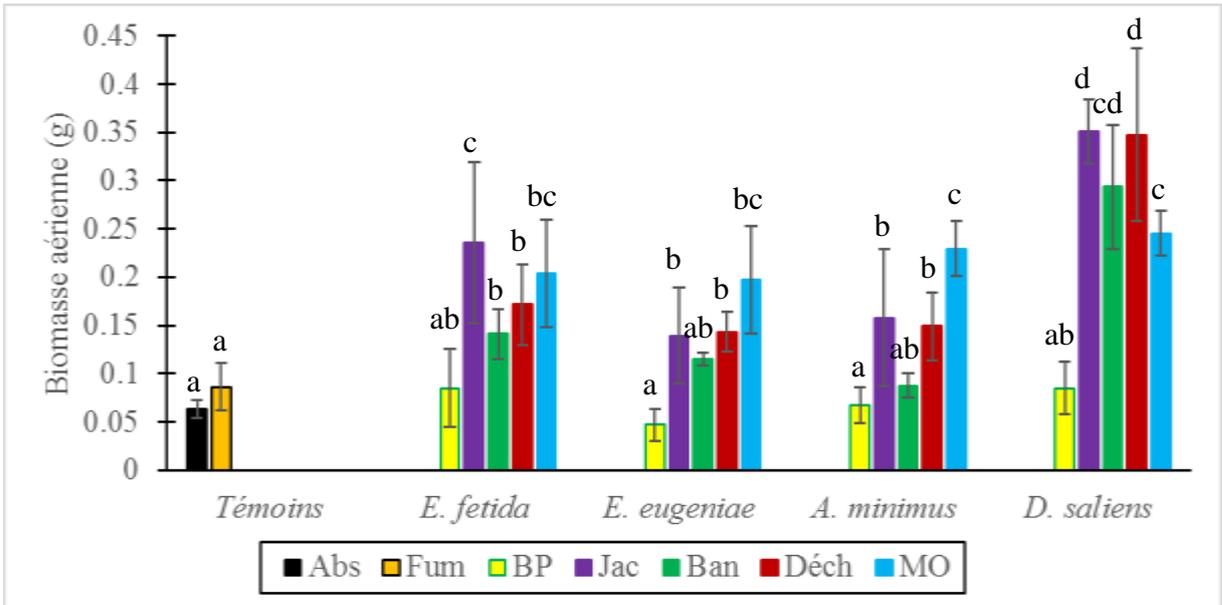


Figure 10 : Biomasse aérienne des plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

### 2.3.2. Biomasse racinaire

*D. saliens* + déchets ménagers donne la biomasse racinaire maximale ( $0,33 \pm 0,075$  g) et *E. eugeniae* + bouse de vache + paille en donne le minimum ( $0,07 \pm 0,012$  g) (Figure 11).

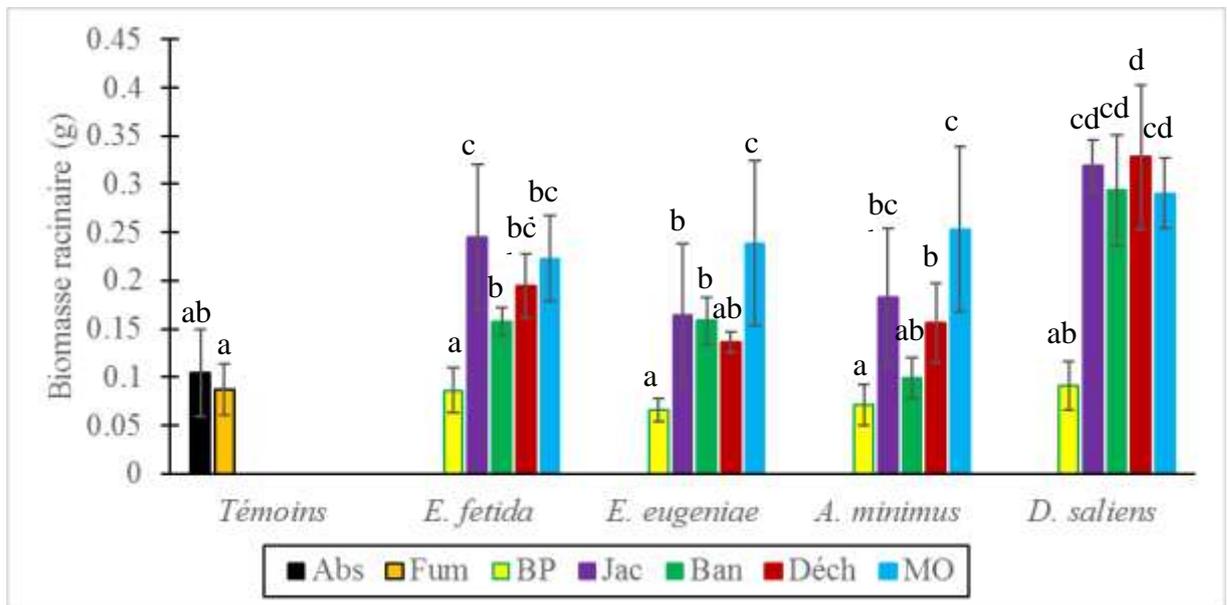


Figure 11: Biomasse racinaire des plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

Les analyses statistiques montrent des résultats identiques à ceux de la biomasse aérienne. Toutefois, l'effet de l'interaction des facteurs vers-substrats n'est pas significatif ( $Pr = 0,083$ ).

### 2.3.3. Rapport entre biomasse aérienne et biomasse racinaire (Shoot/Root)

Ce rapport varie entre  $0,7 \pm 0,2$  pour les plantes issues d'*E. eugeniae* + bouse de vache + paille et  $1,2 \pm 0,1$  pour *D. saliens* + jacinthe d'eau (Figure 12).

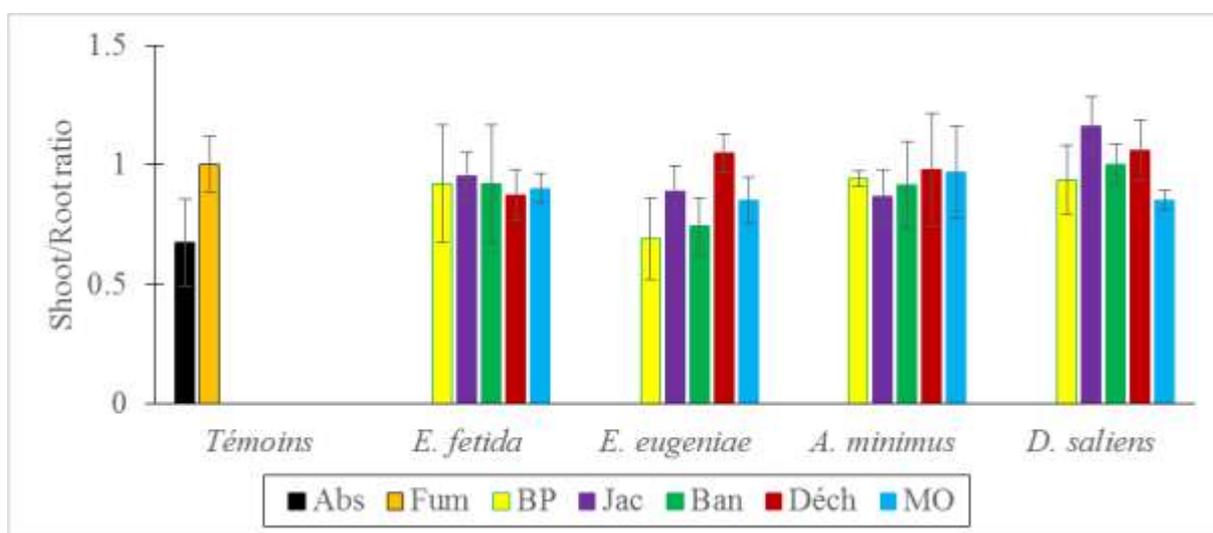


Figure 12: Rapport entre biomasse aérienne et biomasse racinaire des plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

Il est constaté que ce paramètre est très variable que ce soit en fonction des vers de terre ou des substrats. Statistiquement, le coefficient de détermination ajusté  $R^2 = 0,15$ , donc cette variabilité du rapport biomasse aérienne/biomasse racinaire est due à d'autres facteurs puisque seule 15 % de la variabilité est expliquée par les différents traitements.

## 2.4. Indices physiologiques de la végétation

Les deux indices physiologiques de la végétation mesurés affichent des valeurs positives pour le NDVI, mais quelques-unes négatives pour le PRI.

### 2.4.1. Indice différentiel normalisé de la végétation ou NDVI

Les NDVI des plantes varient de  $0,55 \pm 0,056$  pour *E. fetida* + bouse de vache + paille jusqu'à  $0,73 \pm 0,018$  pour le témoin absolu (Figure 13).

Les vers de terre et les substrats ont des effets significatifs sur cet indice ( $Pr = 0,001$  et  $Pr < 0,0001$ ). *D. saliens* est significativement différent des trois autres espèces avec des valeurs légèrement plus élevées. Le traitement « bouse de vache avec paille » est significativement différent du « mélange des matières » alors que la « jacinthe d'eau », les « feuilles de bananier » et le « mélange des matières » sont intermédiaires et similaires.

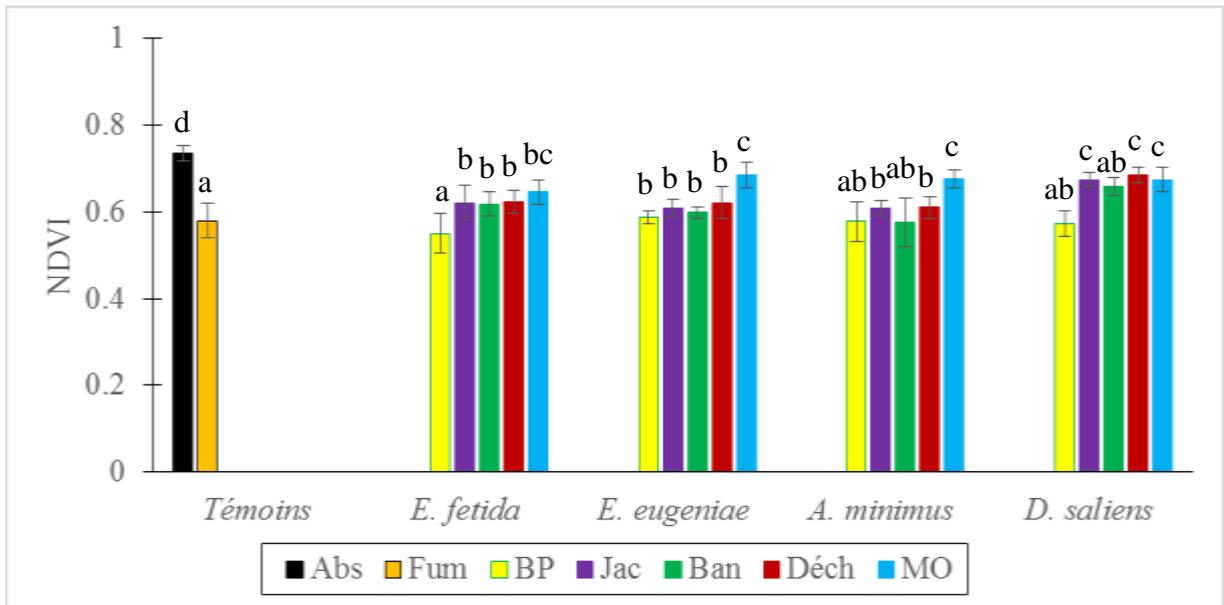


Figure 13: Indice différentiel normalisé de la végétation des plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

#### 2.4.2. Indice de réflectance photochimique ou PRI

Les valeurs du PRI varient entre -0,007 pour *E. eugeniae* + bouse de vache + paille jusqu'à 0,004 pour *A. minimus* + mélange des matières (Figure 14). Les valeurs des PRI sont très variables entre les répétitions pour la plupart des traitements, donnant des grands écarts-types. Le coefficient de détermination ajusté est faible ( $R^2 = 0,39$ ), indiquant que les traitements n'expliquent que 39 % de la variabilité.

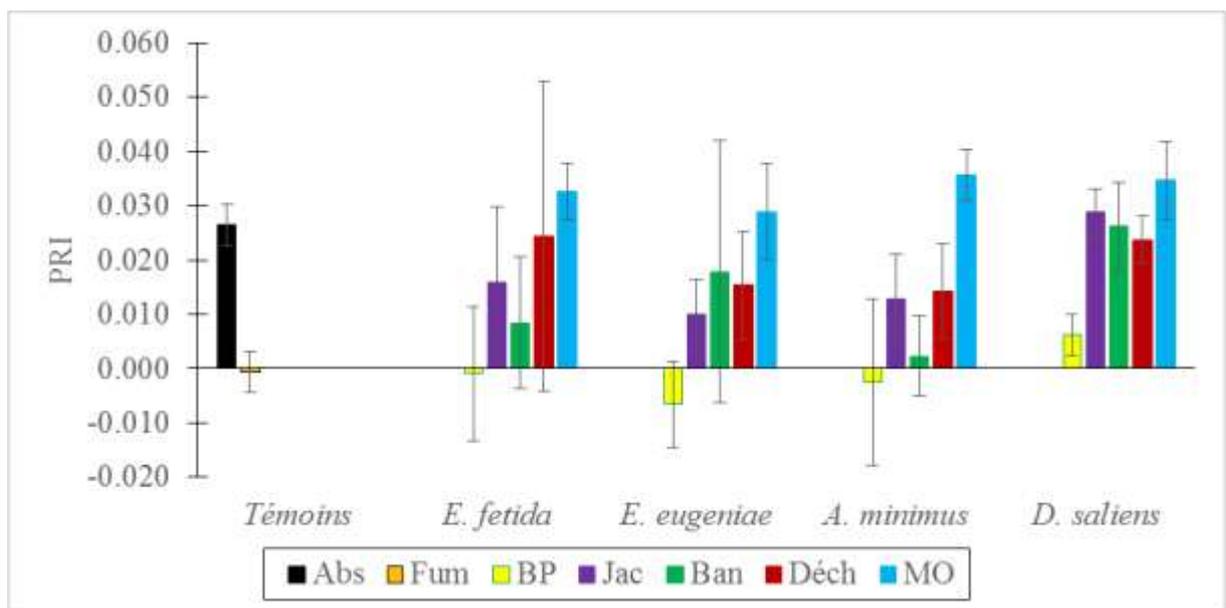


Figure 14: Indice de réflectance photochimique des plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

Toutefois, une tendance de PRI élevés s’observe pour le témoin absolu, les traitements avec *D. saliens* et ceux avec « mélange des matières », alors que les PRI sont négatifs pour le témoin avec fumier et les traitements avec « bouse de vache + paille ».

### 2.5. Teneur en phosphore total des plantes

Les teneurs en phosphore total dans les plantes qui ont reçu des fertilisants sont significativement plus élevées que celles du témoin absolu de  $0,05 \pm 0,006$  % (Figure 15).

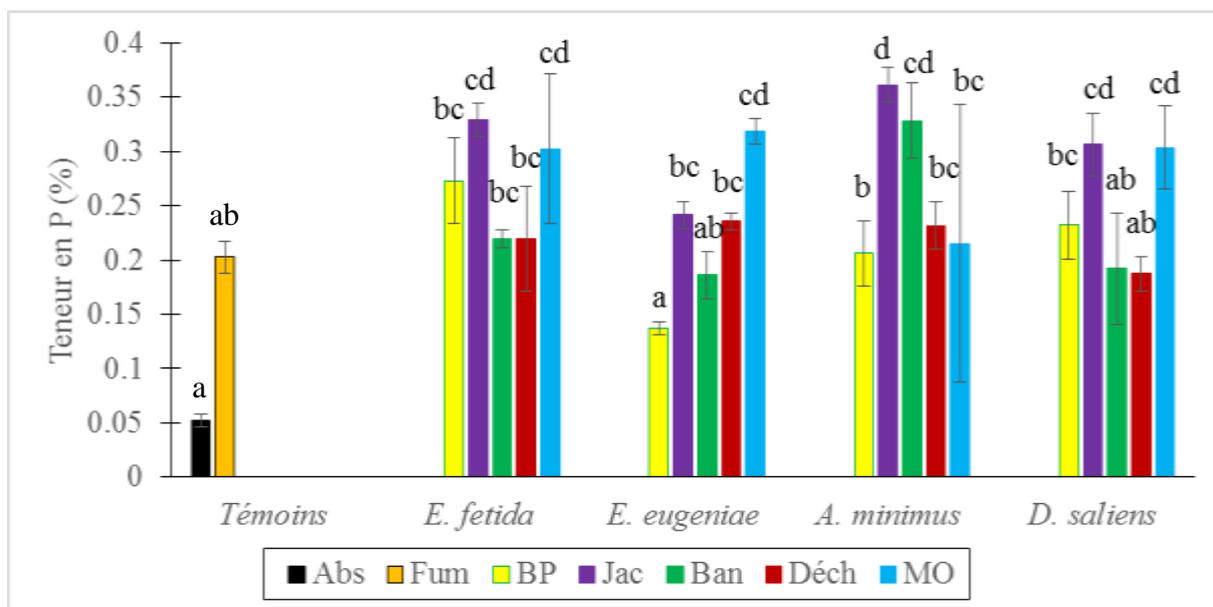


Figure 15 : Teneur en phosphore total dans les plants de riz  
(Légende : cf. Figure 7)

L’effet des vers de terre n’est significatif qu’à  $Pr = 0,06$ , alors que l’effet des substrats et l’effet de l’interaction sont respectivement  $Pr < 0,0001$  et  $Pr = 0,005$ .

Les lombricomposts avec « bouse de vache + paille » et « déchets ménagers » donnent les plus faibles teneurs en P dans les plantes, suivis de ceux avec « feuilles de bananiers » et « mélange des matières », et enfin, les traitements avec « jacinthe d’eau » ont les teneurs les plus élevées. Quant aux interactions, *E. eugeniae* + bouse de vache + paille donne une faible teneur en phosphore ( $0,13 \pm 0,005$  %), contrairement à *A. minimus* + jacinthe d’eau ( $0,36 \pm 0,016$  %).

### 3. Relations entre les caractéristiques des lombricomposts et les propriétés des plants de riz

Afin d’expliquer les effets des lombricomposts sur la croissance du riz, il s’avère nécessaire d’observer les corrélations entre les paramètres mesurés.

Ensuite, les différents effets des lombricomposts en fonction des vers de terre et des substrats sont synthétisés à l'aide d'indices agronomiques.

### 3.1. Corrélations entre les différents paramètres

Les coefficients de corrélation entre les différents paramètres sont présentés dans le tableau 7. Les nutriments dans les lombricomposts sont exprimés en quantité apportée par 20 g de fertilisant. Les coefficients les plus élevés sont considérés pour la présentation des paramètres du riz en fonction de ceux des lombricomposts.

Tableau 7 : Matrice de corrélation de Pearson sur les différents paramètres

Variables	C (LC)	N (LC)	P (LC)	H45	Baér	Braci	NDVI	PRI
N (LC)	<b>0,789</b>	<b>1</b>						
P (LC)	<b>0,550</b>	<b>0,823</b>	<b>1</b>					
H45	0,411	<b>0,625</b>	<b>0,724</b>	<b>1</b>				
Baér	0,343	<b>0,545</b>	<b>0,641</b>	<b>0,960</b>	<b>1</b>			
Braci	0,374	<b>0,641</b>	<b>0,702</b>	<b>0,962</b>	<b>0,975</b>	<b>1</b>		
NDVI	0,430	<b>0,748</b>	<b>0,690</b>	<b>0,871</b>	<b>0,868</b>	<b>0,915</b>	<b>1</b>	
PRI	<b>0,491</b>	<b>0,806</b>	<b>0,752</b>	<b>0,858</b>	<b>0,788</b>	<b>0,866</b>	<b>0,884</b>	<b>1</b>
P %	0,205	0,385	<b>0,691</b>	0,278	0,181	0,215	0,106	0,230

*Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification  $\alpha = 0,05$ .*

*(Légende : N(LC) : quantité de N dans les lombricomposts ; C(LC) : quantité de C dans les lombricomposts ; P(LC) : quantité de P dans les lombricomposts ; H45 : hauteur des plants de riz au 45<sup>e</sup> jour ; Baér : Biomasse aérienne des plants de riz ; Braci : Biomasse racinaire des plants de riz ; NDVI : NDVI des plants de riz ; PRI : PRI des plants de riz ; P% Riz : teneur en phosphore total des plants de riz.)*

Les quantités de carbone, d'azote et de phosphore dans les lombricomposts ont des corrélations positives significatives entre eux. Il en est de même pour les paramètres de croissance du riz, à l'exception de la teneur en phosphore.

Le NDVI et le PRI des plantes augmentent en fonction de la quantité d'azote apporté par le fertilisant (Figure 16), mais aussi en fonction de la quantité de phosphore apporté. Le NDVI des plantes augmente faiblement, tandis que le PRI augmente considérablement.

La hauteur, les biomasses et la teneur en phosphore des plants de riz augmentent plus avec la quantité de phosphore apporté dans le sol qu'avec celle de l'azote (Figure 17).

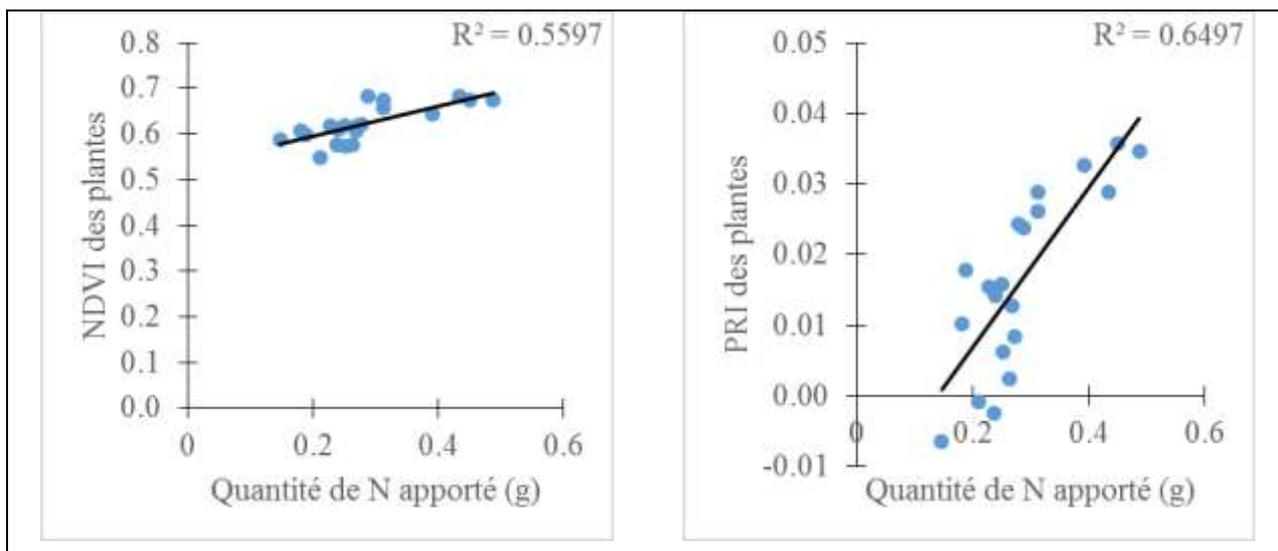


Figure 16 : NDVI et PRI du riz en fonction de la quantité d'azote apporté dans le sol

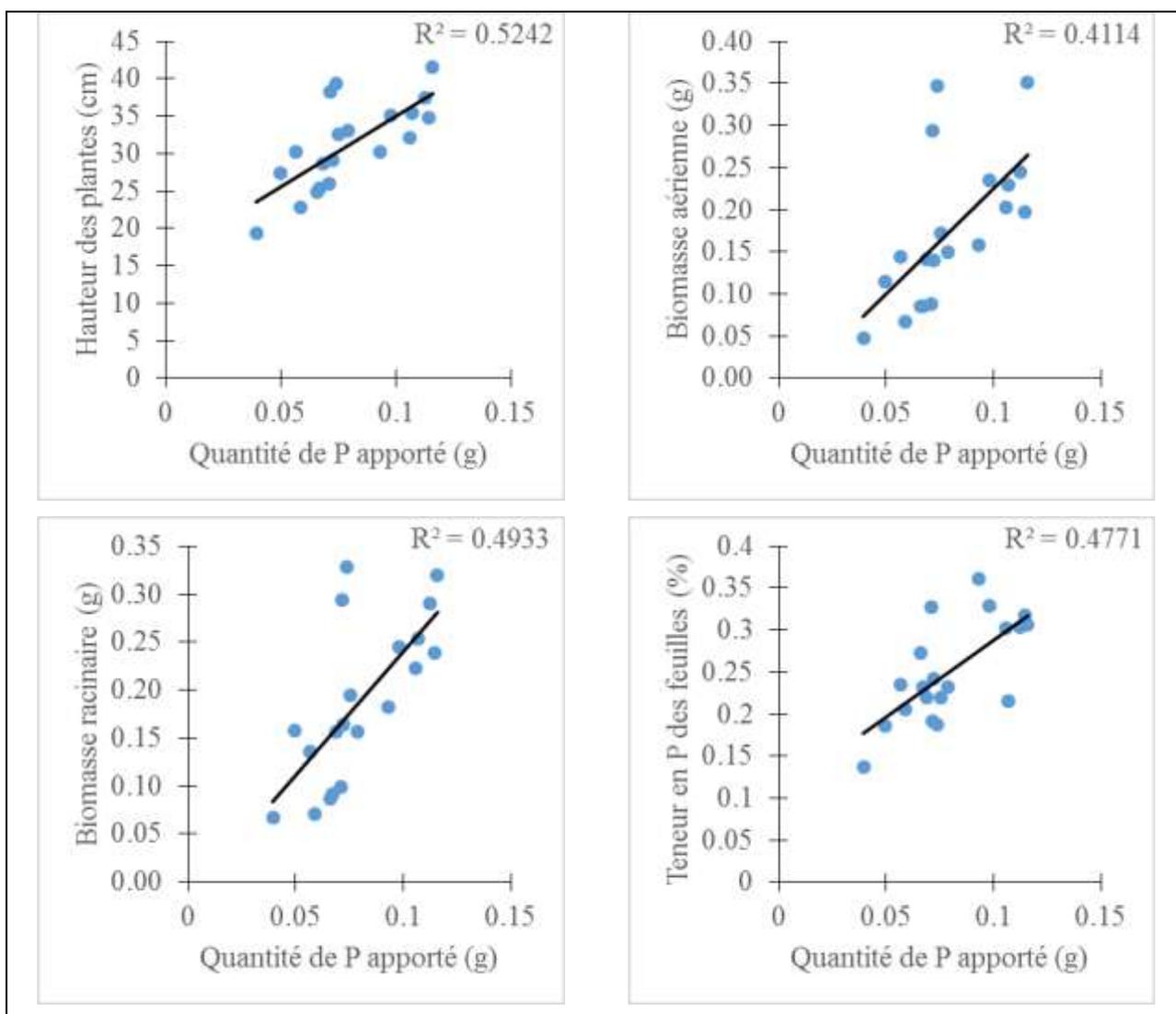


Figure 17 : Paramètres du riz en fonction de quantité de phosphore apporté dans le sol

Les quantités de phosphore apporté par les fertilisants dans le sol influencent positivement la hauteur des plants de riz et la biomasse racinaire avec un coefficient de détermination moyen sensiblement égal à 0,5. La biomasse aérienne augmente également avec la teneur en phosphore des plantes, mais avec un plus faible coefficient.

### 3.2. Synthèse des effets des lombricomposts sur la croissance du riz

La combinaison de tous ces résultats permet de classer les lombricomposts en comparant leurs effets sur chaque paramètre du riz selon les interactions vers de terre et substrat (Figure 18).

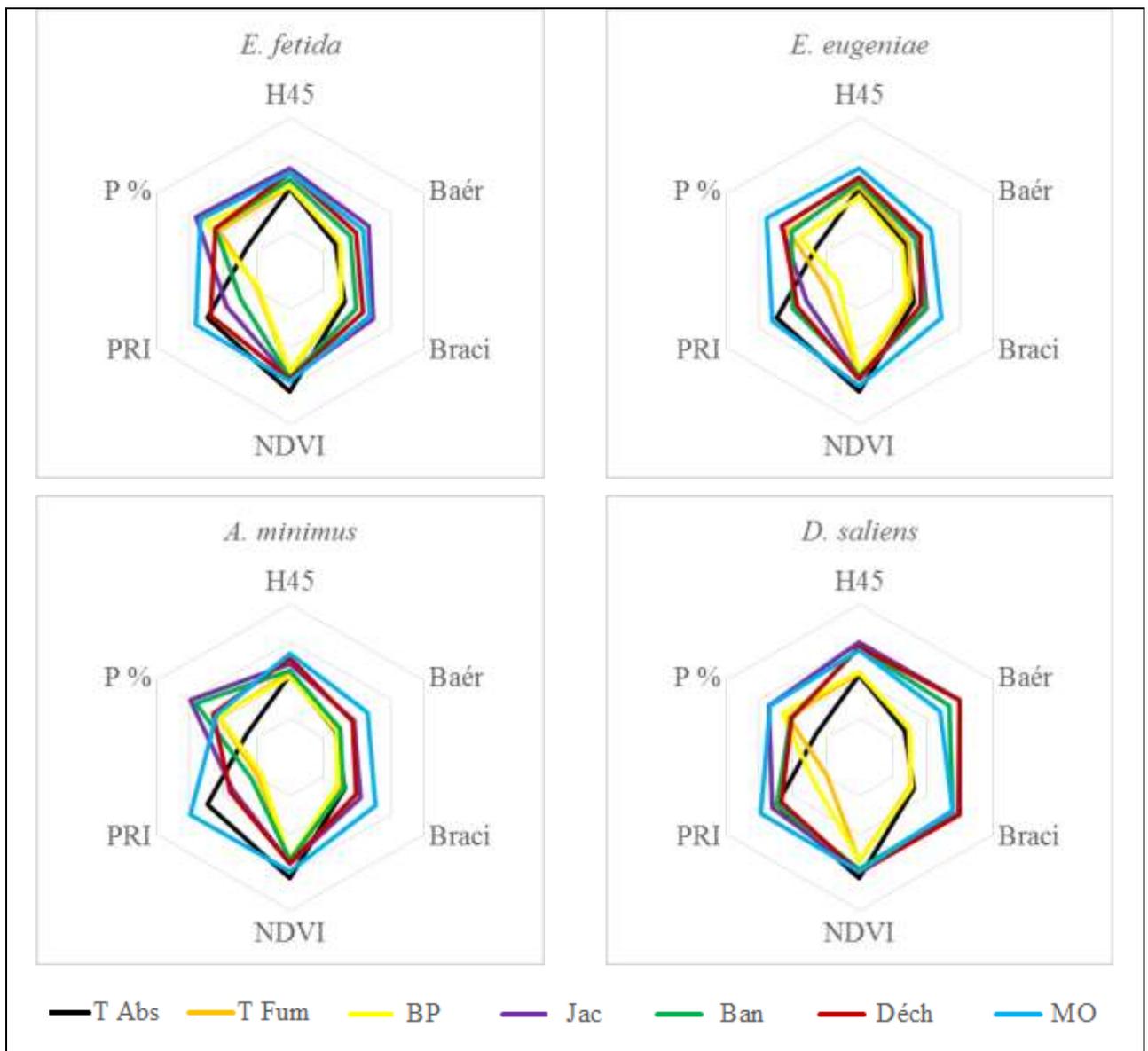


Figure 18 : Effets des lombricomposts sur les paramètres du riz  
(Légende : cf. Figure 7 et Tableau 7)

Le témoin absolu donne des NDVI et PRI plus ou moins élevés, mais de faibles valeurs pour les autres paramètres. Le témoin avec fumier a une même allure que les traitements avec « bouse de vache + paille » présentant les plus faibles valeurs, notamment en PRI.

Concernant *E. fetida*, les lombricomposts ont les mêmes effets sur la hauteur, les biomasses, le NDVI et la teneur en P quel que soit le substrat. Quant au PRI, le « mélange des matières » et les « déchets ménagers » présentent des valeurs plus élevées que les trois autres substrats.

*E. eugeniae* influence plus la hauteur, le NDVI et le phosphore que les biomasses végétales et le PRI. Le « mélange des matières » montre l'effet le plus élevé sur tous les paramètres, contrairement à la « bouse de vache + paille ». Les autres substrats donnent des effets similaires.

*A. minimus* donne des valeurs élevées à tous les paramètres du riz quel que soit le substrat, à l'exception du PRI qui est uniquement élevé avec le « mélange des matières ».

En ce qui concerne *D. saliens*, les substrats « jacinthe d'eau » et « mélange des matières » ont les meilleurs effets sur tous les paramètres. Il en est de même avec « feuilles de bananier » et « déchets ménagers », mais ils n'influencent pas la teneur en phosphore.

A partir de la moyenne de ces indices sur le paramètre du riz, nous avons un indice global qui représente la valeur fertilisante des lombricomposts (Figure 19).

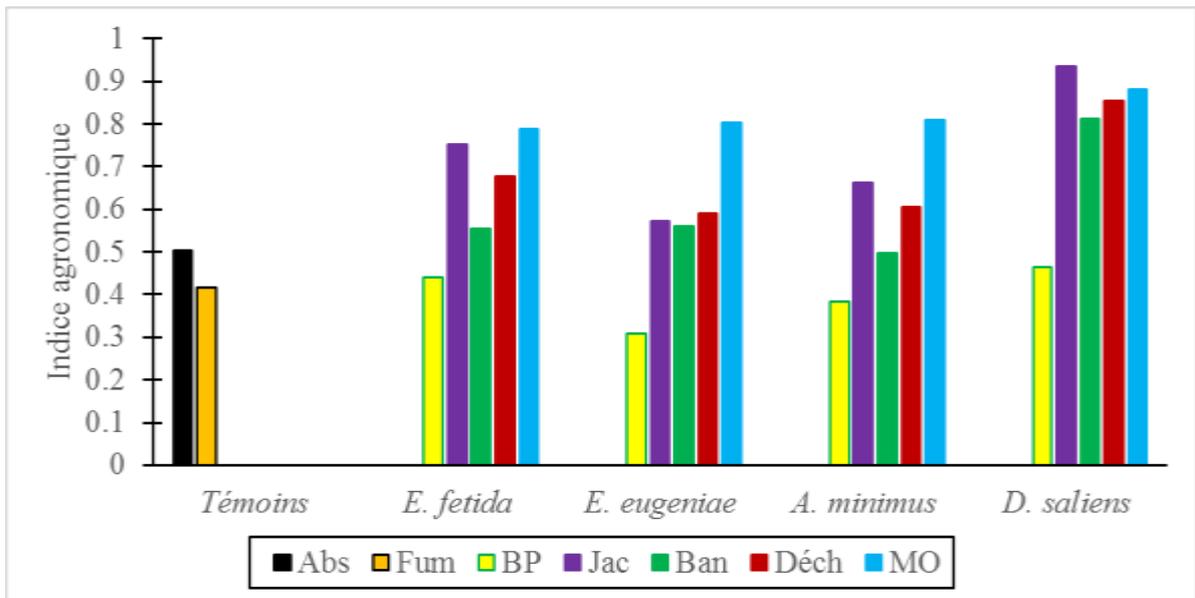


Figure 19 : Indice agronomique des différents traitements  
(Légende : cf. Figure 7)

Les indices des lombricomposts sont plus élevés que ceux des témoins. Le lombricompost issu de *D. saliens* + jacinthe d'eau a l'indice le plus élevé (0,94), contrairement à *E. eugeniae* + bouse de vache + paille (0,31). Les traitements avec *D. saliens* sont les plus élevés, ensuite ceux avec *E. fetida*, *E. eugeniae* et *A. minimus*. Le substrat « bouse de vache + paille » donne systématiquement les indices les plus faibles, puis « feuilles de bananier » et « déchets ménagers ». « Jacinthe d'eau » et « mélange des matières » donnent des indices élevés.

## DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 1. Capacité des vers de terre locaux à lombricomposter différents résidus organiques

Tous les vers de terre épigés ne sont pas adaptés au lombricompostage. Ils doivent avoir des caractéristiques biologiques et écologiques spécifiques (Dominguez & Edwards, 2004), dont une tolérance et une résistance à diverses conditions environnementales, une croissance et une reproduction rapide, une ingestion et une décomposition rapide de matières organiques. En outre, le produit obtenu doit être minéralisé et riche en éléments nutritifs favorables aux plantes.

#### 1.1. Population de vers de terre

Dans notre expérience, nous avons utilisé deux espèces qui ont déjà fait l'objet de nombreuses études pour leur capacité à fabriquer des lombricomposts (*E. fetida* et *E. eugeniae*) et deux espèces beaucoup moins étudiées dans ce cadre (*A. minimus* et *D. saliens*).

##### 1.1.1. *Eisenia fetida* et *Eudrilus eugeniae*

L'observation de plusieurs cocons et de vers juvéniles dans tous nos lombricompostières témoigne que les conditions de vie, notamment l'aliment est favorable pour *E. fetida* et *E. eugeniae*. En effet, selon Dominguez *et al.* (2001), la quantité et la qualité du substrat influence la croissance et la reproduction des vers de terre.

Le nombre de vers adultes a augmenté dans « bouse de vache + paille » et « déchets ménagers » probablement grâce à l'abondance de sources carbonées. Elena (2016) a aussi vu que le nombre d'*E. eugeniae* dans un mélange de bouse de vache et paille a augmenté de 251 %.

Dans la « jacinthe d'eau » et dans le « mélange des matières », le nombre des vers de terre a diminué et d'éventuelles fuites ont été observées. Cela serait vraisemblablement dû à leur voracité, où ils aient décomposé rapidement les matières organiques et seraient allés chercher d'autres sources d'énergie. C'est pourquoi, Randriamalala (2013) a montré qu'il faut apporter régulièrement de la nourriture pour sauvegarder les vers de terre.

Quant à la reproduction, les descendants sont plus nombreux dans la « bouse de vache + paille » grâce au nombre croissant d'adultes encore présents. Les « feuilles de bananier » favorisent aussi cette reproduction probablement grâce à la facilité d'accès des vers de terre à ces matières herbacées. Kavitha (2010) a trouvé des résultats similaires avec *E. eugeniae* dans des feuilles de bananier mélangées avec de la bouse de vache.

##### 1.1.2. *Amyntas minimus* et *Dichogaster saliens*

Le nombre d'*A. minimus* a considérablement augmenté jusqu'à la fin du lombricompostage. Cette forte augmentation serait due à l'abondance d'aliment et d'espace disponibles par rapport à la petite biomasse présente. Par ailleurs, la présence de quelques individus dans les autres traitements où cette espèce n'était pas initialement introduite s'explique par sa forte mobilité.

Les vers de terre du genre *Amyntas* sont très mobiles (Razafindrakoto, 2012) et peuvent migrer même sur de longues distances (Blakemore, 1994) pour trouver d'autres conditions de développement favorables, ce qui est confirmé par nos observations. Sans ces fuites, la population dans les pots aurait pu être encore bien supérieure à ce que nous avons noté.

Concernant *D. saliens* où presque aucun individu n'a été retrouvé à la fin de l'expérience, aucune fuite n'a été constatée et les survivants ont été relevés dans le sol du fond des lombricompostières. Les vers de terre seraient donc morts dans les pots, sûrement à cause des conditions de vie défavorables. Cela confirme que ces vers de terre préfèrent plutôt du sol riche en matières organiques (Huerta & Mondragon, 2006) que des matières organiques uniquement. Cela confirme leur catégorie écologique épi-endogée.

## **1.2. Décomposition des matières organiques**

Le pourcentage de décomposition des matières organiques dépend des activités d'ingestion et d'excrétion par les vers de terre. Il dépend également de la nature des matières organiques, notamment de leurs propriétés physico-chimiques et biologiques (Sinha *et al.*, 2004).

### **1.2.1. Effets des vers de terre**

Les rendements en lombricompost montrent qu'*E. eugeniae* a la plus forte capacité de dégradation de matières organiques, suivie d'*E. fetida*. En effet, *E. eugeniae* est une espèce vorace (Blakemore, 2015). Ce résultat est similaire à ceux d'Andriamady (2001), et de Pattnaik & Reddy (2010) et cela justifie le fait que ce sont les espèces les plus utilisées en lombricompostage.

Les substrats attribués à *A. minimus* sont presque tous décomposés (plus de 90 %). Malgré sa petite taille, *A. minimus* s'est multiplié en grand nombre et arrive à décomposer rapidement les matières organiques. En effet, il est reporté que plus la population de vers de terre est grande, plus le lombricompostage devient rapide (Bhatnagar & Palta, 1996).

Les traitements avec *D. saliens* ne sont pas totalement décomposés probablement à cause du comportement épi-endogé de cette espèce. Il serait même possible qu'en l'absence de vers de terre, ces traitements étaient plus sujets à un simple compostage qu'à un lombricompostage.

### **1.2.2. Effets des substrats organiques**

Parmi les substrats, la « bouse de vache + paille » semble le plus difficile à décomposer sûrement en raison de la présence de la paille de riz en grande quantité, contrairement au « mélange des matières » déjà en partie décomposé. La paille de riz est riche en matières sèches et constituée d'éléments difficilement dégradables tels que 35% de cellulose, 26 % d'hémicellulose et 9 % de lignine (Godin *et al.*, 2010). En effet, des matières premières avec de grosses tailles des particules et une forte teneur en fibres, caractérisées par des C/N élevés, mettent du temps à se décomposer (Suthar, 2007). Quant à la « jacinthe d'eau » et les « feuilles de bananier », leur forte teneur en eau favoriserait leur décomposition et ce sont des plantes à feuilles tendres facilement décomposables.

### **1.3. Teneur en éléments majeurs des lombricomposts**

Pour tous les traitements confondus, les teneurs en C de 15 à 29,7 %, les teneurs en N de 0,73 à 2,44 %, les teneurs en P de 0,20 à 0,58 % dans les lombricomposts produits montrent qu'ils sont des fertilisants plus ou moins riches que le fumier (15,5 % de C, 0,5 % de N, 0,2 % de P selon Theunissen *et al.*, 2010) et que le compost traditionnel (25,3 % de C, 1,8 % de N, 0,2 % de P selon Guo *et al.*, 2015). Toutefois, ces teneurs sont différentes entre les lombricomposts en fonction des espèces de vers de terre et des types de matières organiques utilisés.

#### **1.3.1. Effets des vers de terre**

Les teneurs en carbone, en azote et en phosphore dans les lombricomposts sont les plus élevées avec *D. saliens* et les plus faibles avec *E. eugeniae*. Cela pourrait être due à l'absence de *D. saliens* dans les matières organiques, contrairement à *E. eugeniae* qui est l'espèce de plus grande taille et consommerait le plus de nutriments dans les substrats. Cela rejoint l'étude de Guo *et al.* (2015) qui montre que le compost sans vers de terre est plus riche en C, N et P comparé au lombricompost à cause du besoin de sources d'énergies et de nutriments par les vers de terre et de l'augmentation de l'activité microbienne dans les lombricomposts.

*E. fetida* et *A. minimus* donnent des teneurs en nutriments similaires. Ils utiliseraient le carbone du substrat, mais enrichiraient peut-être le produit final en N et en P. L'enrichissement relatif en nutriments vient de la transformation par les microorganismes, de l'ajout de mucus dans le tractus digestif et des sécrétions dans les déjections de vers de terre (Suthar, 2007). Ce phénomène est courant pour *E. fetida*, mais pourrait aussi être valable pour *A. minimus*.

Concernant le rapport C/N, les vers de terre l'ont réduit à cause de la respiration émettant du CO<sub>2</sub> et de la conservation de l'azote (Hayawin *et al.*, 2010).

#### **1.3.2. Effets des substrats organiques**

La variation de composition des lombricomposts dépend probablement de la composition des substrats initiaux, comme l'ont aussi remarqué Ludibeth *et al.* (2012) et Pattnaik & Reddy (2010) dans leurs expérimentations. La « bouse de vache + paille » donne une forte teneur en C, mais de faibles teneurs en N et P. Cela est dû au substrat principalement à base de paille de riz qui est riche en carbone (57,7 % de MS). Le lombricompost issu de la « jacinthe d'eau » donne une forte teneur en P parce que cette plante en est la plus riche (0,51 % de MS).

Les lombricomposts faits à partir de « feuilles de bananier » et de « déchets ménagers » ayant des teneurs similaires en C, N et P, on peut penser que la composition initiale des déchets ménagers qui n'a pas été déterminée, serait équivalente à celle des feuilles de bananier. Mais cela reste à confirmer.

Le « mélange des matières » donne les teneurs les plus élevées en C, N et P. Le mélange de différents types de matières organiques enrichirait le substrat en différentes sources de nutriments. Cela rejoint les résultats d'Andriamady (2001) et de Ravimycin (2016) stipulant que plusieurs résidus mélangés donnent un lombricompost plus riche en nutriments.

Quant au rapport C/N, il varie en fonction des substrats initiaux puisque les matières sont caractérisées par des C/N de départ différents. Les lombricomposts à partir de « bouse de vache + paille » ont des C/N plus élevés car ce substrat contenait 70 % de paille de riz à 57,7 % de carbone. Cependant, les autres études sur le lombricompostage de la paille de riz (Reddy & Ohkura, 2004 ; Kandan & Akshmi, 2015) ont trouvé des C/N plus faibles après plus de 60 et 75 jours. Donc, le lombricompostage à base de paille de riz nécessite de rester beaucoup plus longtemps que les résidus plus facilement décomposables.

## **2. Effets fertilisants des lombricomposts sur la croissance du riz pluvial**

Pour tous les traitements confondus, la réponse des plants de riz se manifeste à partir du 20<sup>e</sup> jour parce qu'avant le 15<sup>e</sup> jour, le plant de riz puise uniquement les réserves de la graine (Lacharme, 2001). Cette croissance ralentit à partir du 31<sup>e</sup> jour vraisemblablement à cause d'un flétrissement bactérien qui a attaqué presque tous les plants de riz.

En effet, une semaine après la levée, nous avons commencé à observer des petites tâches sur les feuilles de quelques plantes. Ces tâches se sont répandues, les feuilles sont devenues sèches et certaines plantes ont fané. Cette maladie est courante en riziculture pluviale et vient parfois de la présence de souches dans l'environnement, accompagnée par des conditions climatiques humides et des excès d'azote favorables à la contamination (Pande *et al.*, 1997).

### **2.1. Comparaison des effets des lombricomposts avec les témoins**

L'effet du fumier est identique à l'effet du témoin sans fertilisant parce que le fumier serait trop vieux et aurait perdu tous ses nutriments. De plus, Falinirina (2010) explique que les fumiers d'élevage sont pauvres en phosphore et en azote.

Quant aux lombricomposts, les résultats montrent que la plupart d'eux donnent une meilleure croissance aux plantes que le sol sans fertilisant et le fumier de bovins. Cela est dû à la richesse en éléments nutritifs disponibles pour les plantes, notamment en N et en P. Cette observation confirme les études d'Achsah & Prabha (2013), d'Alidadi *et al.* (2014) et de Ravimycin (2016) qui trouvent que les lombricomposts favorisent mieux la croissance des cultures que le fumier. Ces auteurs expliquent aussi qu'en plus des teneurs en nutriments, l'amélioration de l'aération du sol, la sécrétion d'acides humiques et le renforcement de la biomasse microbienne du sol par les lombricomposts favorisent la croissance des plantes.

Les traitements avec la « bouse de vache + paille » sont équivalents à ceux avec du fumier à cause de la faible décomposition de cette matière organique. Ses propriétés pourraient être identiques à celles du fumier non lombricomposté.

Exceptionnellement, le NDVI et le PRI sont les plus élevés pour le témoin absolu, probablement en raison de la moindre attaque de maladies observée sur ces traitements.

L'efficacité de prélèvement de phosphore par les plantes est significativement plus élevée pour les traitements avec lombricomposts que pour les témoins. En effet, le phosphore assimilable dans les sols ferrallitiques de Madagascar est faible (Rabeharisoa, 2004). C'est pourquoi l'absorption de phosphore par les plantes est faible dans le sol sans fertilisant. Dans le sol avec fumier, cette absorption est également faible car le fumier est appauvri. C'est uniquement dans les lombricomposts que les plantes peuvent prélever une teneur importante en phosphore.

## **2.2. Comparaison entre les lombricomposts**

Les effets des lombricomposts sur chacun des paramètres sont interprétés en fonction des vers de terre et des substrats. Ils sont en relation avec les quantités d'azote et de phosphore apportés.

### **2.2.1. Effets sur la hauteur et les biomasses végétales**

La croissance végétative des plantes dépend principalement de l'azote et du phosphore qui sont en action conjuguée. Le phosphore est absorbé pendant la phase végétative et accélère la croissance (Zapats & Roy, 2004). C'est la raison pour laquelle, plus la quantité de phosphore apporté augmente, plus la plante a une meilleure croissance. Même avec une faible teneur en azote, le fertilisant contenant le plus de phosphore donne le meilleur résultat (« jacinthe d'eau »). Le phosphore est donc l'élément limitant de la croissance des plantes.

Les traitements avec *D. saliens* et ceux avec le « mélange des matières » donnent les hauteurs et les biomasses les plus élevées grâce à la grande quantité de N et de P, contrairement aux lombricomposts issus de la « bouse de vache + paille ».

Les effets d'*E. fetida*, d'*E. eugeniae* et d'*A. minimus* sont significativement plus faibles que ceux de *D. saliens* parce que les lombricomposts sont moins riches que le compost. Toutefois, ces lombricomposts favorisent bien la croissance des plantes, probablement grâce à une modification des communautés microbiennes du sol renforçant la production d'hormones de croissance, et donc grâce à des aspects non forcément nutritionnels (Arancon *et al.*, 2006).

La variation des rapports entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire ou shoot/root pourrait s'expliquer par l'attaque des maladies, mais cela reste à vérifier.

### **2.2.2. Effets sur les indices physiologiques de la végétation**

Pour tous les traitements, les valeurs du NDVI sont supérieures à 0,5. Cela signifie que les plantes ont eu une teneur élevée en chlorophylle et une forte activité photosynthétique. Selon Ravimycin (2016), 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. C'est pourquoi, les effets des lombricomposts sur le NDVI sont corrélés avec les quantités d'azote apporté. Liu *et al.*, (2015) montrent aussi que le NDVI a une forte corrélation positive avec la teneur en azote dans les fertilisants.

Quant aux valeurs du PRI, elles sont très variables et le modèle d'explication par les différents traitements n'est pas fiable. Ce dérèglement est constaté parce que les plantes ont été exposées à différentes anomalies comme une maladie phytopathogène, des éventuelles sécheresses et inondations, une insuffisance d'ensoleillement temporaire. Cependant, une forte corrélation est observée entre les quantités d'azote des lombricomposts et les PRI. Shrestha (2012) a aussi trouvé que le PRI est lié avec la teneur en azote parce que l'azote favorise une activité du cycle du pigment xanthophylle.

### **2.2.3. Effets sur la teneur en phosphore total**

La teneur en phosphore total dans les plantes augmente avec la quantité de phosphore apporté. Cette forte teneur montre une efficacité de prélèvement du phosphore des lombricomposts par les plantes et une disponibilité du P fourni par les lombricomposts. En effet, le phosphore dans les lombricomposts est abondant et se présente sous forme organique facilement minéralisé. Cette teneur dépendait surtout des substrats organiques. Cela confirme encore une fois que les compositions chimiques des substrats caractérisent les effets des lombricomposts.

## **3. Perspectives d'applications et de recherches**

A l'issue de ces résultats, nous allons suggérer des possibilités de concrétisation de l'étude ainsi que proposer des recherches possibles à la suite de ces expérimentations.

### **3.1. Applications pratiques de l'étude**

#### **3.1.1. Autoproduction individuelle de lombricomposts**

A partir des résultats de cette étude, les agriculteurs pourraient avoir accès à des lombricomposts améliorant la fertilité de leur sol en les produisant eux-mêmes à partir de ressources localement et facilement accessibles.

De plus, l'avantage du lombricompostage est qu'il peut se pratiquer sur différents systèmes, dans les appartements en villes ou dans les cours à la campagne permettant à toute personne de produire elle-même ses lombricomposts (Abul-Soud *et al.*, 2009). Lors d'enquêtes au sein de la coopérative TATA, Paradis (2012) et Ranaivoarisoa *et al.* (2017) rapportent que la production de lombricompost au sein d'une exploitation agricole permet d'assurer son autosuffisance en engrais, voire une source de revenu supplémentaire par la vente de l'excédent.

#### **3.1.2. Gestion des déchets ménagers par leur valorisation communautaire**

Le lombricompostage s'insère aussi bien dans le développement durable en milieu rural qu'en milieu urbain. La gestion des déchets s'affiche à la une des problèmes des agglomérations avec une production de Déchets Ménagers Assimilés (DMA) de 870 tonnes/jour dans la capitale de Madagascar alors que la décharge est déjà saturée depuis plus de deux ans (IMV, 2017).

Le compostage est la meilleure façon de valoriser les déchets (Abduli *et al.*, 2013), ce qui est déjà pratiqué par certaines organisations non gouvernementales. Dans l'optique de cette étude, le lombricompostage des déchets serait mieux. Des lombricomposts sont déjà proposés en agriculture urbaine comme c'est le cas à Kampala en Ouganda (Lalander *et al.*, 2015).

Épargné des prix des vers de compost, il serait possible de mettre en place un système de lombricompostage communautaire afin de gérer les déchets, notamment de la ville. Les produits seraient vendus à moindre coût aux agriculteurs pour fertiliser les sols dégradés afin de subvenir aux besoins alimentaires, d'abord du ménage, puis du pays.

Plusieurs auteurs montrent que le lombricompostage pour la gestion des déchets urbains (Achsah & Prabha, 2013 ; Sannigrahi, 2009), des boues d'épuration (Ludibeth *et al.*, 2012 ; Khwairakpam & Bhargava, 2009), de résidus d'extraction d'huiles essentielles (Carrion-Paladines *et al.*, 2016 ; Amic & Dalmasso, 2013), et même des déchets humains (Purves & Gardiner, 2012) est pratique et permet une meilleure production agricole.

Enfin, la production de vers de terre (lombriculture) lors de ce lombricompostage urbain pourrait alimenter la filière de nourrissage des volailles et des poissons de rizières.

## **3.2. Limites du travail et suggestions d'amélioration**

### **3.2.1. Fiabilité des résultats du lombricompostage**

Le pourcentage de décomposition des matières organiques est très biaisé par la difficulté de distinction des lombricomposts matures et des restes de substrats. Il faudrait plutôt attendre que tous les lombricomposts soient totalement matures et comparer leur durée de lombricompostage au lieu de les récolter en même temps et comparer les rendements.

Par ailleurs, les autres études sur le lombricompostage mesurent d'autres paramètres que les teneurs en nutriments. En effet, les propriétés physiques et biologiques des lombricomposts peuvent influencer leur effet fertilisant. Alors, une étude plus approfondie sur ces propriétés permettrait de mieux expliquer les différences entre les lombricomposts.

Enfin, les données obtenues pendant le lombricompostage effectué n'étant pas statistiquement valables, il faudrait refaire l'étude avec des répétitions pour que les résultats soient plus fiables.

### **3.2.2. Applicabilité des résultats pour les agriculteurs**

L'essai en mésocosmes a permis d'observer des résultats significativement différents.

Par contre, il serait plus intéressant de faire des études d'effet fertilisant sur des parcelles expérimentales de tanety pour mieux se rapprocher des réelles conditions paysannes.

Les résultats pouvant être différents en termes de croissance et de rendement en grains comestibles (Bezbaruha *et al.*, 2011), un suivi de la culture jusqu'à la fin de son cycle permettrait de concrétiser les effets des lombricomposts. Les essais devraient aussi se dérouler sur plusieurs années afin d'observer les effets cumulatifs.

L'effet sur la croissance du riz est le principal objet de l'étude, mais il serait nécessaire d'étudier les effets des lombricomposts sur les propriétés du sol et sur d'autres plantes.

### **3.2.3. Possibilités d'études supplémentaires**

D'autres études sur les lombricomposts sont encore possibles, notamment à Madagascar où très peu de littérature a été fournie, à la différence de l'Inde qui regroupe 80% de la littérature scientifique sur les lombricomposts.

En continuité avec notre recherche, il serait intéressant d'ajouter un traitement sur le mélange de toutes les espèces de vers de terre pour vérifier si l'association de plusieurs espèces de vers de terre accélère le lombricompostage comme le montre Sinha *et al.* (2004).

L'ajout d'un traitement sur le mélange des matières organiques incluant la bouse de vache pourrait aussi vérifier si la bouse de vache améliorerait encore plus la qualité du mélange.

Par ailleurs, le précompostage thermophile n'est pas obligatoire en lombricompostage, mais souvent appliqué. Une étude plus approfondie sur les différences entre lombricomposts précompostés et non précompostés serait également utile.

Ensuite, il faudrait faire une étude de faisabilité d'un lombricompostage à grande échelle en considérant les facteurs importants, notamment les vers de terre, la main d'œuvre, les débouchés, l'efficacité agronomique et la rentabilité économique. Une simulation d'exploitation par Rahobiharison (2014) n'a dévoilé de bénéfice intéressant que si le lombricompost est vendu au prix labellisé « Agriculture Biologique ».

Il serait également intéressant d'étudier la combinaison des rôles complémentaires des espèces locales de vers de terre épigés dans le lombricompostage et endogés dans les sols de culture. Jouquet *et al.* (2010) a déterminé un effet positif de l'interaction de l'apport de lombricompost à partir d'*E. fetida* et de l'apport de *D. bolau*i dans des sols tropicaux dégradés.

Enfin, selon les recherches de nombreux auteurs, d'autres avantages du lombricompost seraient exploitables. Par exemple, la collecte du thé de ver ou jus de lombricompost a été montré avoir des effets très bénéfiques sur les plantes (Arancon *et al.*, 2007) qu'il soit utilisé comme engrais foliaire (Kaur *et al.*, 2015) ou incorporé au sol (Edwards *et al.*, 2006).

Dans notre étude, des maladies phytopathogènes ont été observées. Pourtant, le lombricompost et son jus sont connus pour réduire l'attaque des ennemis de culture (FLAEF, 2010). Cela nécessiterait de plus amples investigations.

Les répercussions environnementales du lombricompostage s'avèrent aussi intéressantes par la séquestration de carbone, la réduction d'émission de gaz à effet de serre (Abul-Soud *et al.*, 2009) et la diminution de la concentration en métaux lourds (Bhat *et al.*, 2016 ; Begum, 2011). En parallèle avec l'utilisation du lombricompost, la mise en valeur des vers de terre est montrée comme source de protéines aux animaux d'élevage ou à l'homme, voire même comme source de médicaments (Guerrero, 2009).

## CONCLUSION

Dans cet essai de fertilisation du riz pluvial par des lombricomposts produits à partir de différentes espèces de vers de terre et de différents types de matières organiques, nous avons pu observer les préférences alimentaires des vers de terre ainsi que les effets des lombricomposts sur la croissance du riz pendant la phase végétative.

Lors du lombricompostage, il a été constaté qu'*E. fetida* et *E. eugeniae* préfèrent le substrat « bouse de vache + paille » par rapport aux autres. *A. minimus* se multiplie très rapidement, surtout dans les « feuilles de bananier ». Ces trois espèces peuvent toutes décomposer rapidement les matières organiques. Quant à *D. saliens*, il semblerait ne pas être adapté au lombricompostage étant donné qu'il préfère vivre dans le sol. A partir des matières organiques, les lombricomposts obtenus se sont pour la plupart avérés riches en nutriments, sauf ceux issus de « bouse de vache + paille ».

La première hypothèse stipulant que les vers de terre locaux sont capables de se développer et de fabriquer du lombricompost est partiellement confirmée. En effet, certaines espèces le peuvent mais cela dépend de la nature génétique de l'espèce et du type de matières organiques.

Lors de la culture en mésocosmes, la croissance du riz pluvial utilisé comme plante-test, est favorisée par les lombricomposts qui ont des propriétés nutritives élevées. Les traitements avec les substrats « mélange des matières », « jacinthe d'eau » et « déchets ménagers » ont été les plus efficaces. Les traitements avec *E. eugeniae* n'amélioraient pas en général la croissance du riz, mais la favorise exceptionnellement avec certaines matières organiques. Ces effets sont en relation avec les teneurs en nutriments dans les lombricomposts, qui dépendent à la fois des teneurs en nutriments des matières organiques initiales, de l'espèce de vers de terre qui les a transformées mais aussi du niveau de maturité des lombricomposts.

Ainsi, la seconde hypothèse est justifiée que les effets fertilisants des lombricomposts obtenus varient en fonction des vers de terre utilisés et en fonction du type de matières organiques. Cependant, la technique et la durée de lombricompostage pourraient également influencer cette valeur fertilisante.

A partir de ces expérimentations, nous pouvons conclure que les lombricomposts obtenus à partir de deux espèces locales de vers de terre (*E. eugeniae* et *A. minimus*) et de l'association de plusieurs types de matières organiques qui sont localement abondantes serait un fertilisant accessible aux agriculteurs et efficace pour la culture de riz pluvial.

Par contre, l'utilisation de *D. saliens* nécessite de plus amples investigations et la « bouse de vache + paille » ne serait pas conseillée.

Il a été montré que le lombricompostage avec *A. minimus* pourrait être équivalent, voire meilleur qu'avec le ver de compost *E. fetida*. Cette espèce locale de ver de terre peut être collectée facilement dans les sols riches en matières organiques ou dans des amas de résidus organiques assez humides.

Elle est facile à élever, se reproduit rapidement, décompose effectivement les matières organiques et produit du compost favorable à la croissance des plantes. *E. eugeniae* pourrait également s'utiliser à condition de trouver les matières organiques les plus adéquates et de le nourrir régulièrement. Quant aux substrats, les déchets ménagers sont composés de plusieurs sortes de matières organiques qui les enrichissent en nutriments et en population microbienne, favorables aux vers de terre ainsi qu'aux cultures. Il est bien meilleur que le fumier qui est couramment utilisé comme substrat. En outre, en obtenant des résultats satisfaisants avec le mélange des matières sans bouse de vache, le lombricompostage serait donc possible même en l'absence de cette matière si les matières organiques sont diversifiées.

Bref, pour obtenir une valeur fertilisante élevée, la fabrication de lombricomposts requiert des matières premières abondantes, variées et riches en éléments nutritifs et des espèces de vers de terre qui conserveraient ou amélioreraient ces propriétés nutritives. En tout cas, il est impératif d'optimiser à la fois la lombriculture, le lombricompostage et la fertilisation.

Concrètement, le lombricompostage avec les espèces locales et les déchets ménagers permettrait de recycler les déchets organiques, de produire des fertilisants riches, facilement et à moindre coût. Etant donné le défi sur la gestion des déchets à Madagascar, la valorisation des déchets ménagers en lombricompost serait une solution envisageable. Toutefois, il est essentiel de maîtriser la technique, c'est-à-dire le respect des conditions environnementales et trophiques exigées par les vers de terre.

Cette étude nous a permis d'initier le début de plusieurs recherches possibles sur le lombricompostage à Madagascar. Elle offrirait également une alternative à la portée des agriculteurs pour une meilleure gestion de fertilité de leurs sols. Dans le contexte de changement climatique actuel, le lombricompostage va de pair avec la protection de l'environnement en produisant un engrais biologique, mais surtout en jouant des rôles dans le recyclage des déchets et la séquestration de carbone.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

1. Abduli M.A., Amiri L., Madadian E., Gitipour S., Sedighian S. 2013. Efficiency of vermicompost on quantitative and qualitative growth of tomato plant. *International Journal of Environmental Research* 7(2): 467-472 pp.
2. Abul-Soud M., Hassanein M.K., Ablmaaty S.M., Medany M., Abu-Hadid A.F. 2009. Vermiculture and vermicomposting technologies use in sustainable agriculture in Egypt. *Egyptian Journal of Agricultural Research* 87(1): 389-401pp.
3. Achsah R.S., Prabha M.L. 2013. Potential of vermicompost produced from banana waste (*Musa paradisiaca*) on the growth parameters of *Solanum lycopersicum*. *International Journal of ChemTech Research* 5(5): 2141-2153pp.
4. Ali U., Sajid N., Khalid A., Riaz L., Rabbani M.M., Syed J.H., Malik R.N. 2015. A review on vermicomposting of organic waste, *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 13p.
5. Alidadi H., Saffari A.R., Ketabi D., Peiravi R., Hosseinzadeh A. 2014. Comparison of vermicompost and cow manure efficiency on the growth and yield of tomato plant. *Health Scope* 3(4): 1-5pp.
6. Amic A., Dalmaso C. 2013. Unité de valorisation complète de déchets oléicoles par lombricompostage : Production de produits à haute valeur ajoutée : lombricompost, savon, collagène et lombrics. MasterSet en Sciences de la Biodiversité et Ecologie. Université Aix-Marseille. 30p.
7. 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.
8. Arancon N.Q., Edwards C.A., Bierman P., Metzger J.D., Lee S., Welch C. 2003. Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries. *Pedobiologia* 47: 731-735pp.
9. Arancon N.Q., Edwards C.A., Dick R., Dick L. 2007. Vermicompost tea production and plant growth impact. *Biocycle*: 51-52pp.
10. Arancon N.Q., Edwards C.A., Bierman P. 2006. Influences of vermicomposts on field strawberries: 2. Effects on soil microbiological and chemical properties. *Bioresource Technology* 97: 831-840 pp.
11. Banque Mondiale. 2017. Données sur la consommation d'engrais (kilogrammes par hectare de terres arables). <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.CON.FERT.ZS?view=chart> consulté le 23 avril 2017.

12. Begum A. 2011. Evaluation of municipal sewage sludge vermicompost on two cultivars of tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants. *International Journal of ChemTech Research* 3(3): 1184-1188pp.
13. Bezbaruha R., Sharma R.C., Banik P. 2011. Effect of nutrient management and planting geometry on productivity of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *American Journal of Plant Sciences* 2: 297-302pp.
14. Bhadauria T., Kumar P., Maikhuri R., Saxena K.G. 2014. Effect of application of vermicompost and conventional compost derived from different residues on pea crop production and soil faunal diversity in agricultural system in Garhwal Himalayas India. *Natural Science* 6: 433-446pp.
15. Bhat S.A., Singh J., Adarsh P.V. 2016. Effect on growth of earthworm and chemical parameters during vermicomposting of pressmud sludge mixed with cattle dung mixture. *Procedia Environmental Sciences* 35: 425-434pp.
16. Bhatnagar R.K., Palta R.K. 1996. Earthworm-Vermiculture and Vermicomposting. *Kalyani Publishers*. New Delhi.
17. Blakemore R.J. 1994. Earthworms of South East Queensland and their agronomic potential in Brigalow soil. Thèse Ph.D. Département Zoologie. Université de Queensland, Australie. 632p.
18. Blakemore R.J. 2015. Eco-taxonomic profile of an iconic vermicomposter – the “African nightcrawler” earthworm, *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1967). *African Invertebrates* 56(3): 527-548pp.
19. Card A.B., Anderson J.V., Davis J.G. 2004. Vermicomposting horse manure. Colorado State University Cooperative. Extension no. 1.224.
20. Carrión-Paladines V., Fries A., Gómez-Muñoz B., García-Ruiz R. 2016. Agrochemical characterization of vermicomposts produced from residues of Palo Santo (*Bursera graveolens*) essential oil extraction. *Waste Management*: 1-8pp.
21. Dominguez J., Edwards C. A., Ashby J. 2001. The biology and population dynamics of *Eudrilus eugeniae* (Kinberg) (Oligochaeta) in cattle waste solids. *Pedobiologia* 45: 341-353pp.
22. Dominguez J., Edwards C.A. 2004. Vermicomposting organic wastes: a review. *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century* 17: 369-395pp.
23. Dominguez J., Edwards C.A. 2011. Relationships between composting and vermicomposting - Chapter 2: 11-25pp.
24. Edwards C., Arancon N.Q. 2004. The science of vermiculture: the use of earthworms in organic waste management. 25p.
25. Edwards C.A., Arancon N.Q., Greytak S. 2006. Effects of vermicompost teas on plant growth and diseases. *Biocycle*: 28-31pp.

26. Edwards C.A., Dominguez J., Arancon N.Q. 2004. The influence of vermicomposts on plant growth and pest incidence. *Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century*: 397-420pp.
27. Elena M. 2016. Vermicomposting efficiency and quality of vermicompost with different bedding materials and worm food sources as substrate. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences* 4(1): 1-13pp.
28. El-Haddad M.E., Zayed M.S., El-Sayed G.A.M., Hassanein M.K., El-Satar A.M. 2014. Evaluation of compost, vermicompost and their teas produced from rice straw as affected by addition of different supplements. *Annals of Agricultural Science* 59(2): 243-251pp.
29. Falinirina M. V. 2010. Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et services écosystémiques. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Université d'Antananarivo. 168p.
30. FAO. 2004. Riz et limitation de l'écart de rendement. Année internationale du riz 2004. 2p.
31. FAO. 2015. Low-Income Food-Deficit Countries (LIFDC) - List for 2015 <http://www.fao.org/countryprofiles/lifdc/en/> consulté le 16 novembre 2016.
32. FAOSTAT. 2014. Données sur les cultures : Pays Madagascar, Élément Rendement, Produit Riz Paddy, Année 2014. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC> consulté le 30 novembre 2016.
33. FLAEF. 2010. Manuel de lombriculture pour le lombricompostage. Ferme Agricole AgroEcosystème Farihitsara. Antsirabe. 31p.
34. Godin B., Ghysel F., Agneessens R., Schmit T., Gofflot S., Lamaudière S., Sinnaeve G., Goffart J., Gerin P., Stilmant D., Delcarte J. 2010. Détermination de la cellulose, des hémicelluloses de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 14(2) : 549-560pp.
35. GoogleMap. 2016. Coordonnées GPS des lieux. [www.coordonnees-gps.fr/communes/bedee/35023](http://www.coordonnees-gps.fr/communes/bedee/35023) consulté le 7 décembre 2016.
36. Guerrero R.D. 2009. Earthworm Culture for vermicompost and vermiceal production and for vermiceutical application in the Philippines (1978-2008). *Dynamic Soil, Dynamic Plant* 3(2): 28-31pp.
37. Guo L., Wu G., Li C., Liu W., Yu X., Cheng D., Jiang G. 2015. Vermicomposting with maize increases agricultural benefits by 304%. *Agronomy and Sustainable Development* 35: 1149-1155pp.
38. Hayawin, Z.N., Khalil, H.P.S.A., Jawaid, M., Ibrahim, M.H., Astimar, A.A. 2010. Exploring chemical analysis of vermicompost of various oil palm fibre wastes. *Environmentalist* 30 (3): 273–278pp.

39. Huerta E., Mondragon M. 2006. Response of earthworm (*Dichogaster saliens*) to different feeding substrates. *Compost Science & Utilization* 14(3): 211-214pp.
40. Ibrahima H., Rakotonirainy M. 2016. Mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire à Madagascar. 92p.
41. IMV (Institut des Métiers de la Ville). 2017. L'agriculture urbaine, une solution pour augmenter la résilience des villes africaines. Colloque International-Antananarivo.
42. Jouquet P., Plumere T., Doan Thu T., Rumpel C., Tran Duc T., Orange D. 2010. The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms. *Applied Soil Ecology* 46: 125-133pp.
43. Kandan T., Akshmi S. 2015. Chemical nutrient analysis of vermicompost and their effect on the growth of SRI rice cultivation. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 4(6): 4382-4388pp.
44. Kaur P., Bhardwaj M., Babbar I. 2015. Effect of vermicompost and vermiwash on growth of vegetables. *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences* 3(4): 9-12pp.
45. Kavitha P., Ravikumar G., and Manivann S. 2010. Vermicomposting of banana agro-waste using an epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae* (Kinberg). *International Journal of Recent Scientific Research* 1: 032-035pp.
46. Khwairakpam M., Bhargava R. 2009. Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous materials* 161: 948-954pp.
47. Lacharme M., 2001. Le plant de riz: Données morphologiques et cycle de la plante, Fascicule 2. Memento Technique de Riziculture. Coopération Française. 22p.
48. Lalander C.H., Komakech A.J., and Vinneras B. 2015. Vermicomposting as manure management strategy for urban small-holder animal farms – Kampala case study. *Waste Management* 39: 96-103pp.
49. Liu K., Li Y., Hu H., Zhou L., Xiao X., Yu P. 2015. Estimating rice yield based on Normalized Difference Vegetation Index at heading stage of different nitrogen application rates in Southeast China. *Journal of Environmental and Agriculture Science* 2(3): 1-9
50. Ludibeth S.M., Islas-Espinoza M., Vicenta E.M. 2012. Vermicomposting of sewage sludge: earthworm population and agronomic advantages. *Compost Science & Utilization* 20(1): 11-17pp.
51. Morisset P. 2012. Initiation au lombricompostage sur la Côte Est de Madagascar. Programme de Promotion des Revenus Ruraux (PPRR). 10p.
52. Munroe G. 2005. Manuel of on-farm vermicomposting and vermiculture. Organic Agriculture Centre of Canada 56p.
53. Ndegwa P.M., Thompson S.A., Das K.C. 2000. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology* 71: 5-12pp.
54. Pande H., Van Tran D., Ton That T. 1997. Systèmes améliorés de riziculture pluviale. FAO. Lutte intégrée contre les maladies du riz pluvial.

- 55.** Paradis A. 2012. Production de lombricompost biologique à Madagascar. Rapport technique de stage professionnel au sein de la Coopérative TATA Antananarivo. 83p.
- 56.** Pathma J., Sakthivel N. 2012. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential. *SpringerPlus*. 19p.
- 57.** Pattnaik S., Reddy M.V. 2010. Nutrient status of vermicompost of urban green waste processed by three earthworm species—*Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* and *Perionyx excavates*. *Applied and Environmental Soil Science*. 13p.
- 58.** Prasad P.V.V., Satyanarayana V., Murthy V.R.K., Boote K.J. 2002. Maximizing yields in rice-groundnut cropping sequence through integrated nutrient management. *Field Crops Research* 75(1): 9-21pp.
- 59.** Purves I.J., Gardiner V. 2012. Culturally and financially sustainable applications of Loowatt technology in Antananarivo-Madagascar. Rapport du Loowatt Project. 8p.
- 60.** 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. Faculté des Sciences. Département de Biologie et Ecologie Végétales. Université d'Antananarivo. 199 p.
- 61.** Rahobiharison L.M.N. 2014. Etudes des effets de la dose et du fractionnement de l'apport de lombricompost sur la tomate "ACE VF 55" à Ambanitsena. Mémoire de fin d'études. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Département Agriculture. Université d'Antananarivo. 40p.
- 62.** Ranaivoarisoa H., Ravoninjiva S., Ramananarivo S., Ramananarivo R. 2017. Vermiculture for sustainable organic agriculture in Madagascar. *Horticulturae* 3(2) :1-8pp.
- 63.** Randriamalala M.O. 2013. Etudes des substrats adaptés à l'alimentation des lombrics. Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Elevage. Université d'Antananarivo. 50p.
- 64.** Ravimycin T. 2016. Effects of vermicompost and farmyard manure on the germination percentage growth biochemical and nutrient content of Coriander (*Coriandrum sativum* L.). *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences* 3(6): 91-98pp.
- 65.** Razafindrakoto M. 2012. Etude des Annélides Oligochètes de Madagascar : taxonomie, distribution et écologie. Thèse de Doctorat à la Faculté des Sciences. Département Biologie Animale. Université d'Antananarivo. 151p.
- 66.** Razafindrakoto M., Czsudi Cs., Rakotofiringa S., Blanchart E. 2010, New records of earthworms (Oligochaeta) from Madagascar. *Opuscula Zoologica Budapest* 41(2), 231-236pp.
- 67.** Reddy M.V., Ohkura K. 2004. Vermicomposting of rice straw and its effect on sorghum growth. *Tropical Ecology* 45(2). 327-331pp.
- 68.** Sannigrahi A.K. 2009. Biodegradation of leaf litter of tree species in presence of cow dung and earthworms. *Indian Journal of Biotechnology* 8: 335-338pp.

- 69.** Shrestha S., Brueck H., Asch F. 2012. Chlorophyll index, Photochemical Reflectance Index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. *Journal of Photochemistry and Photobiology Biology* 113: 7-13pp.
- 70.** Singh A., Jain A., Sarma B.K., Abhilash P.C., Singh H.B. 2013. Solid waste management of temple floral offerings by vermicomposting using *Eisenia fetida*. *Waste Management* 33: 1113-1118pp.
- 71.** Sinha R.K., Herat S., Agarwal S., Asadi R., Carretero E. 2002. Vermiculture and waste management: study of action of earthworms *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* and *Perionyx excavatus* on biodegradation of some community wastes in India and Australia. *The Environmentalist*: 10p.
- 72.** Sourisseau J.M., Rasolofo P., Belières J.F., Guengant J.P., Ramanitriniony H.K., Bourgeois R., Razafimiarantsoa T.T., Andrianantoandro V. T., Ramarijaono M., Burnod P., Rabeandriamiaro H., Bougnoux N. 2016. Diagnostic territorial de la Région du Vakinankaratra à Madagascar. Prospective territoriale sur les dynamiques démographiques et le développement rural en Afrique subsaharienne et à Madagascar. Institut International des Sciences Sociales. 157p.
- 73.** Suthar S. 2007. Nutrient changes and biodynamics of epigeic earthworm *Perionyx excavatus* (Perrier) during recycling of some agriculture wastes. *Bioresource Technology* 98: 1608-1614pp.
- 74.** Suthar S. 2009. Vermicomposting of vegetable-market solid waste using *Eisenia fetida*: Impact of bulking material on earthworm growth and decomposition rate. *Ecological engineering* 35: 914-920pp.
- 75.** Theunissen J., Ndakidemi P., Laubscher C. 2010. Potential of vermicompost produced from plant waste on the growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of the Physical Sciences* 5(13): 1964-1973pp.
- 76.** URP SCRiD. 2009. Actes de l'atelier national sur la recherche et le développement du riz pluvial à Madagascar, Organisé par FOFIFA, CIRAD. Université d'Antananarivo. 144p.
- 77.** Zapats F., Roy R.N. 2004. Le phosphore dans le système sol-plante. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Bulletin FAO Engrais et nutrition végétale.
- 78.** Zirbes L., Renard Q., Dufey J., Khanh Tu P., Duyet H.N., Lebailly P., Francis F., Haubruge E. 2011. Valorisation of a water hyacinth in vermicomposting using an epigeic earthworm *Perionyx excavatus* in Central Vietnam. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 15(1): 85-93pp.

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Le lombricompostage.....	VIII
a. Définitions .....	VIII
b. Mode opératoire .....	VIII
c. Comparaison du lombricompost avec d'autres engrais .....	IX
d. Avantages et désavantages du lombricompost .....	IX
Annexe 2 : Les vers de terre .....	X
a. Classification génétique .....	X
b. Classification écologique .....	X
c. Importance agronomique .....	X
Annexe 3 : Caractéristiques des matériels biologiques utilisés.....	XII
a. Vers de terre.....	XII
b. Semences de riz .....	XII
Annexe 4 : Calendrier du travail.....	XIII
Annexe 5 : Tableaux des données et résultats statistiques .....	XIV
a. Nombre initial et nombre final de vers de terre .....	XIV
b. Teneurs en C, N, P des lombricomposts et quantités apportées par 20 g/pot.....	XV
c. Nombre de plants levés, morts et considérés parmi les 12 semées.....	XVI
d. Paramètres du riz (moyenne/plante $\pm$ écart-type) .....	XVII
e. ANOVA et test de Tukey.....	XVIII
f. Indices agronomiques .....	XXVIII
Annexe 6 : Photos illustratives .....	XXIX

## ANNEXES

### Annexe 1 : Le lombricompostage

#### a. Définitions

##### • Lombriculture

La lombriculture consiste à élever des vers de terre dans des conditions contrôlées. Différents systèmes de lombriculture ont été conçus afin de traiter biologiquement des déchets organiques, mais surtout de produire de grandes quantités de vers de terre comme nourriture potentielle de diverses espèces animales.

##### • Lombricompostage

Le lombricompostage désigne la transformation des déchets organiques par l'action des vers de terre et des microorganismes. Il s'agit d'un processus mésophile, aérobie naturel et inodore qui est très différent du compostage conventionnel thermophile. Les vers de terre ingèrent les déchets organiques puis excrètent du fumier foncé, sans odeur et fertile, ainsi que des granules de boue riches en matière organique qui constituent un excellent amendement pour le sol.

Le processus se déroule en deux phases : la phase d'activation pendant laquelle les microorganismes et les vers de terre décomposent les matières organiques et la phase de maturation qui correspond à la période où les vers de terre quittent le lombricompost.

Le lombricompostage peut se faire à petite échelle avec des déchets organiques ménagers, ou bien à grande échelle, soit à la ferme avec du fumier, soit dans l'industrie alimentaire avec des déchets organiques, par exemple de fruits et de légumes.

##### • Lombricompostière

Une lombricompostière se présente souvent sous forme d'une ou plusieurs caisses dans lesquelles on met les déchets organiques afin qu'ils soient décomposés avec l'aide de vers de compost.

##### • Lombricompost

Le lombricompost est un amendement organique entièrement naturel, issu du lombricompostage, soit la transformation de fumier ou de déchets organiques domestiques par des vers de terre.

#### b. Mode opératoire

##### • Conditions des vers de terre

Le lombricompostage exige un environnement adapté aux vers de terre. Les optima varient en fonction des espèces, mais en général, les vers de terre peuvent vivre dans les conditions suivantes.

	Extrêmes de tolérances
Température (°C)	0 à 30 ou 35
pH	5 à 9
Humidité (%)	70 à 90
Lumière	Obscure

- **Conditions des matières organiques**

Les matières organiques doivent être riches et variées afin de conférer aux vers de terre les nutriments dont ils ont besoin. Un certain équilibre en carbone et en azote est également nécessaire (rapport C/N) pour une meilleure adaptation des vers de terre. Enfin, si nous voulons faciliter et accélérer le lombricompostage, les matières devraient être coupées en petits morceaux pour exposer plus de surface aux décomposeurs et plus ou moins décomposées pour faciliter la colonisation par les microorganismes.

**c. Comparaison du lombricompost avec d'autres engrais**

	Fumier de bovin	Lombricompost	Compost
C (%)	15,5	24,8	25,3
N (%)	0,5	1,6	1,8
P (%)	0,2	0,7	0,2
K (%)	0,5	0,8	0,6
C/N	31,3	15,5	14,1
Source	Theunissen <i>et al.</i> , 2010	Theunissen <i>et al.</i> , 2010	Guo <i>et al.</i> , 2015

\*Ces valeurs sont très variables en fonction des matières organiques.

**d. Avantages et désavantages du lombricompost**

Pratiquement, le lombricompost est généralement supérieur au compost conventionnel sur plus d'un point :

- Il prend moins de place et peut se pratiquer en intérieur.
- Il est propre et socialement acceptable, qui produit peu d'odeurs ou pas du tout.
- Il dure 3 à 4 fois plus rapide.
- Il n'a pas besoin de se faire retourner puisque les vers de terre assurent ce rôle.
- Il est plus riche avec une meilleure rétention d'eau et facilite le passage des racines.
- Il produit des thés de composts qui sont riches.

Pourtant, travailler avec des vers de terre est un processus plus complexe que le compostage traditionnel. Les vers de terre peuvent s'enfouir ou mourir dès que le milieu ne leur plaît pas. L'aspect qu'on ne doit pas négliger : il exige davantage d'investissements en temps, en main-d'œuvre et en argent.

## **Annexe 2 : Les vers de terre**

### **a. Classification génétique**

- Phylum des Annélides
- Classe des Clitellata
- Sous-classe des Oligochaeta (ou Oligochètes)
- Ordre des Haplotaxida
- Sous-ordre des Lumbricina : Tous les vers de terre appartiennent à ce sous-ordre qui compte environ 4000 espèces terrestres ou d'eau douce. Les Enchytréides, proches des vers de terre, appartiennent au sous-ordre des Tubificina.

- Famille: Les classifications les plus récentes font état d'une vingtaine de familles de vers de terre : Lumbricidae, Ailoscolecidae, Syngenodrilidae, Almidae, Biwadrilidae, Criodrilidae, Lutodrilidae, Hormogastridae, Kynotidae, Sparganophilidae, Komarekionidae, Microchaetidae, Eudrilidae, Ocnodrilidae, Megascolecidae, Octochaetidae, Moniligastridae, Tumakidae, Acanthodrilidae, Exxidae et Glossoscolecidae.

### **b. Classification écologique**

Les différentes espèces de vers de terre vivent dans des substrats différents et jouent des rôles différents dans la nature. Les vers ne survivent pas dans les mêmes conditions environnementales et n'ont donc pas les mêmes besoins.

Ils sont classifiés en trois groupes selon leur habitat et leur fonctionnalité :

- **Anécique** («qui sort de terre») – Ces vers fouisseurs font surface la nuit afin de traîner de la nourriture dans leurs galeries creusées dans les couches minérales profondes du sol.
- **Endogé** («à l'intérieur de la terre») – Également des vers fouisseurs, mais leurs galeries sont généralement peu profondes; ils se nourrissent de la matière organique du sol et viennent rarement à la surface.
- **Épigé** («à la surface du sol») – Ces vers vivent dans des litières à la surface du sol et se nourrissent de la matière organique en décomposition. Ils forent très peu le sol et n'ont pas de galeries permanentes. Ils sont utilisés dans le lombricompostage.

### **c. Importance agronomique**

Les vers de terre sont les architectes des sols fertiles. Leur influence est très diverse. Ils déposent jusqu'à 10 kilos par mètre carré et par année de déjections dans la terre et à la surface du sol.

- Les vers de terre aèrent le sol

Les galeries creusées par les vers de terre assurent une bonne aération du sol et augmentent la proportion de pores grossiers.

- Les vers de terre améliorent la pénétration et l'écoulement de l'eau dans le sol

Les galeries stables et verticales des anéciques améliorent nettement l'absorption, le stockage, l'infiltration et le drainage de l'eau dans le sol, ce qui contribue fortement à empêcher le ruissellement et l'érosion.

- Les vers de terre décomposent les débris végétaux morts

Dans les champs, les vers de terre incorporent dans le sol jusqu'à six tonnes de matière organique morte par hectare et par année, et dans les forêts ils travaillent jusqu'à neuf tonnes de feuilles mortes par hectare et par année.

- Les vers de terre concentrent les éléments nutritifs

Les déjections des vers de terre sont un mélange intime de particules végétales et minérales. De plus, les éléments nutritifs y sont présents en forte concentration et sous forme facilement assimilable par les plantes.

- Les vers de terre rajeunissent le sol

Les vers de terre prélèvent des matières dans le sous-sol et transportent dans la couche arable, ce qui la rajeunit continuellement.

- Les vers de terre assainissent le sol

Les vers de terre favorisent l'implantation et la multiplication des bactéries et des champignons édaphiques utiles dans leurs galeries et leurs excréments.

- Les vers de terre favorisent la croissance des racines

Plus de 60% des galeries sont colonisées par les racines des plantes car elles leur permettent de pénétrer sans résistances dans les couches profondes du sol et d'y trouver des conditions de croissance idéales (déjections riches en éléments nutritifs des vers de terre, eau à disposition).

- Les vers de terre favorisent la formation et la stabilité des agrégats du sol

En produisant de grandes quantités de déjections, les vers de terre ameublissent donc les sols lourds et améliorent la cohésion des sols sableux.

### Annexe 3 : Caractéristiques des matériels biologiques utilisés

#### a. Vers de terre

Espèce	<i>Eisenia fetida</i> (Savigny, 1826)	<i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867)	<i>Amyntas minimus</i> (Horst, 1893)	<i>Dichogaster saliens</i> (Beddard, 1893)
Famille	<i>Lumbricidae</i>	<i>Eudrilidae</i>	<i>Megascolecidae</i>	<i>Acanthodrilidae</i>
Longueur (mm)	50 à 100	90 à 185	15 à 30	30 à 60
Diamètre (mm)	4 à 8	4 à 8	1,5 à 2,5	1,5
Segments	105	161 à 211	74 à 100	70 à 120
Masse (g)	0,55	1	0,05	0,03
Couleur	Rouge rayé	Rouge brun	Brun	Transparent
Origine	Europe	Ouest-Afrique	Asie	Afrique
Durée de vie (an)	1,5 à 5	1 à 3	Non défini (ND)	ND
Maturité sexuelle (jour)	28 à 30	35 à 50	ND	ND
Cocon/jour	0,35 à 0,5	0,42 à 0,51	ND	ND
Vers/cocon	2,5 à 3,8	2 à 2,7	ND	ND
Durée d'incubation (jour)	18 à 26	12 à 17	ND	ND
Humidité (%)	70-90 (80)	70-85 (80)	ND	ND
Température (°C)	0 à 35 (25)	16 à 30 (25)	ND	ND
Source	Dominguez & Edwards, 2004	Blakemore, 2015	Blakemore, 1994	Razafindrakoto, 2012

#### b. Semences de riz

B22 est une variété de riz pluvial appartenant au genre *Oryza sativa japonica*. C'est une variété introduite sélectionnée, portant son numéro de collection 3762 par la FOFIFA. 1000 grains donnent un poids de 35,2 g. B22 a une aptitude culturale pluviale, raison pour laquelle cette variété est surtout cultivée en saison de pluie. Son cycle de maturation est de 92 à 100 jours. Il peut donner un rendement moyen de 3 à 4 tonnes/hectare. Elle est résistante à la pyriculariose et à l'action ravageuse des insectes.

#### Annexe 4 : Calendrier du travail

Activités	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Bibliographie	■	■	■	■	■	■	■	■
Protocole de recherche	■	■						
Préparation des substrats		■	■					
Lombricompostage		■	■	■	■	■		
Comptage des vers et pesage des lombricomposts				■				
Culture du riz					■	■	■	■
Mesures de hauteur					■	■	■	■
Mesures du NDVI et PRI						■		
Pesage des biomasses végétales						■		
Analyses au laboratoire				■	■		■	■
Traitement des données				■	■	■	■	■
Rédaction	■	■	■	■	■	■	■	■
Soutenance								■

## Annexe 5 : Tableaux des données et résultats statistiques

### a. Nombre initial et nombre final de vers de terre

Traitement	Nombre initial	Nombre final
Fet_BP	30	55
Fet_Jac	30	9
Fet_Ban	30	19
Fet_Déch	30	32
Fet_MO	30	17
Eug_BP	20	24
Eug_Jac	20	11
Eug_Ban	20	23
Eug_Déch	20	21
Eug_MO	20	3
Amy_BP	50	352
Amy_Jac	50	480
Amy_Ban	50	944
Amy_Déch	50	696
Amy_MO	50	277
Dicho_BP	80	48
Dicho_Jac	80	4
Dicho_Ban	80	19
Dicho_Déch	80	9
Dicho_MO	80	14

**b. Teneurs en C, N, P des lombricomposts et quantités apportées par 20 g/pot**

Traitement	C (%)	N (%)	C/N	P (%)	C (g)	N (g)	P (g)
Fet_BP	22,08	1,05	20,94	0,33	4,41	0,21	0,06
Fet_Jac	19,71	1,25	15,78	0,49	3,94	0,24	0,09
Fet_Ban	24,84	1,36	18,26	0,34	4,96	0,27	0,06
Fet_Déch	24,40	1,39	17,53	0,38	4,88	0,27	0,07
Fet_MO	24,31	1,96	12,41	0,53	4,86	0,39	0,10
Eug_BP	15,22	0,73	20,78	0,20	3,04	0,14	0,03
Eug_Jac	14,99	0,90	16,60	0,36	2,99	0,18	0,07
Eug_Ban	17,98	0,94	19,04	0,25	3,59	0,18	0,04
Eug_Déch	18,00	1,14	15,84	0,28	3,59	0,22	0,05
Eug_MO	28,44	2,18	13,07	0,57	5,68	0,43	0,11
Amy_BP	24,94	1,19	21,00	0,29	4,98	0,23	0,05
Amy_Jac	20,89	1,34	15,56	0,47	4,17	0,26	0,09
Amy_Ban	23,51	1,32	17,86	0,36	4,70	0,26	0,07
Amy_Déch	22,16	1,20	18,48	0,40	4,43	0,23	0,07
Amy_MO	28,69	2,25	12,72	0,54	5,73	0,45	0,10
Dicho_BP	29,19	1,26	23,17	0,34	5,83	0,25	0,06
Dicho_Jac	24,35	1,56	15,57	0,58	4,86	0,31	0,11
Dicho_Ban	26,08	1,56	16,73	0,36	5,21	0,31	0,07
Dicho_Déch	23,92	1,44	16,63	0,37	4,78	0,28	0,07
Dicho_MO	29,63	2,44	12,14	0,56	5,92	0,48	0,11

**c. Nombre de plants levés, morts et considérés parmi les 12 semées**

Traitement	Levées	Mortes	Considérées (Levées – Mortes)
Tabsolu	11	1	10
Tfumier	12	1	11
Fet_BP	11	3	8
Fet_Jac	11	1	10
Fet_Ban	12	2	10
Fet_Déch	11	2	9
Fet_MO	11	1	10
Eug_BP	10	2	8
Eug_Jac	12	1	11
Eug_Ban	12	1	11
Eug_Déch	12	1	11
Eug_MO	11	1	10
Amy_BP	11	1	10
Amy_Jac	11	0	11
Amy_Ban	12	0	12
Amy_Déch	12	0	12
Amy_MO	12	1	11
Dicho_BP	12	1	11
Dicho_Jac	12	4	8
Dicho_Ban	9	0	9
Dicho_Déch	12	3	9
Dicho_MO	12	1	11

**d. Paramètres du riz (moyenne/plante ± écart-type)**

Traitement	H45	Baér	Braci	SR	NDVI	PRI	P %
Tabolu	23,68 ±2,0	0,06 ±0,0	0,10 ±0,0	0,68 ±0,2	0,73 ±0,0	0,03 ±0,0	0,05 ±0,0
Tfumier	25,19 ±2,0	0,09 ±0,0	0,09 ±0,0	1,00 ±0,1	0,58 ±0,0	-0,00 ±0,0	0,20 ±0,0
Fet_BP	24,93 ±4,6	0,08 ±0,0	0,09 ±0,0	0,92 ±0,2	0,55 ±0,0	0,00 ±0,0	0,27 ±0,0
Fet_Jac	35,07 ±3,2	0,24 ±0,1	0,24 ±0,1	0,95 ±0,1	0,62 ±0,0	0,02 ±0,0	0,33 ±0,0
Fet_Ban	28,70 ±1,4	0,14 ±0,0	0,16 ±0,0	0,92 ±0,2	0,62 ±0,0	0,01 ±0,0	0,22 ±0,0
Fet_Déch	32,51 ±2,1	0,17 ±0,0	0,19 ±0,0	0,87 ±0,1	0,62 ±0,0	0,02 ±0,0	0,22 ±0,0
Fet_MO	32,08 ±3,8	0,20 ±0,1	0,22 ±0,0	0,90 ±0,1	0,64 ±0,0	0,03 ±0,0	0,30 ±0,1
Eug_BP	19,33 ±2,7	0,05 ±0,0	0,07 ±0,0	0,69 ±0,2	0,59 ±0,0	-0,01 ±0,0	0,14 ±0,0
Eug_Jac	29,12 ±4,4	0,14 ±0,1	0,16 ±0,1	0,89 ±0,1	0,61 ±0,0	0,01 ±0,0	0,24 ±0,0
Eug_Ban	27,46 ±0,6	0,12 ±0,0	0,16 ±0,0	0,74 ±0,2	0,60 ±0,0	0,02 ±0,0	0,19 ±0,0
Eug_Déch	30,18 ±1,6	0,14 ±0,0	0,14 ±0,0	1,05 ±0,1	0,62 ±0,0	0,02 ±0,0	0,24 ±0,0
Eug_MO	34,83 ±3,3	0,20 ±0,1	0,24 ±0,1	0,85 ±0,1	0,68 ±0,0	0,03 ±0,0	0,32 ±0,0
Amy_BP	22,86 ±2,1	0,07 ±0,0	0,07 ±0,0	0,94 ±0,0	0,58 ±0,1	0,00 ±0,0	0,21 ±0,0
Amy_Jac	30,18 ±4,8	0,16 ±0,1	0,18 ±0,1	0,87 ±0,1	0,61 ±0,0	0,01 ±0,0	0,36 ±0,0
Amy_Ban	25,90 ±1,7	0,09 ±0,0	0,10 ±0,0	0,92 ±0,2	0,58 ±0,0	0,00 ±0,0	0,33 ±0,0
Amy_Déch	33,09 ±1,5	0,15 ±0,0	0,16 ±0,0	0,98 ±0,2	0,61 ±0,0	0,01 ±0,0	0,23 ±0,0
Amy_MO	35,50 ±1,9	0,23 ±0,0	0,25 ±0,1	0,97 ±0,2	0,68 ±0,0	0,04 ±0,0	0,22 ±0,1
Dicho_BP	25,37 ±3,9	0,09 ±0,0	0,09 ±0,0	0,94 ±0,1	0,57 ±0,0	0,01 ±0,0	0,23 ±0,0
Dicho_Jac	41,63 ±0,6	0,35 ±0,0	0,32 ±0,0	1,16 ±0,1	0,67 ±0,0	0,03 ±0,0	0,31 ±0,0
Dicho_Ban	38,25 ±3,4	0,29 ±0,1	0,29 ±0,1	1,00 ±0,1	0,66 ±0,0	0,03 ±0,0	0,19 ±0,1
Dicho_Déch	39,41 ±1,9	0,35 ±0,1	0,33 ±0,1	1,06 ±0,1	0,68 ±0,0	0,02 ±0,0	0,19 ±0,0
Dicho_MO	37,54 ±2,6	0,25 ±0,0	0,29 ±0,0	0,85 ±0,0	0,67 ±0,0	0,03 ±0,0	0,30 ±0,0

### e. ANOVA et test de Tukey

- **Hauteur**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
79,000	0,792	0,725

Analyse de la variance :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	2519,105	132,584	11,800	< 0,0001
Erreur	59	662,928	11,236		
Total corrigé	78	3182,033			

Analyse des sommes des carrées type III :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Vers	3	759,314	253,105	22,526	< 0,0001
Substrat	4	1517,219	379,305	33,758	< 0,0001
Vers*Substrat	12	301,705	25,142	2,238	0,021

Groupes selon le test de Tukey :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Eug	28,184	A
Amy	29,507	A
Fet	30,658	A
Dicho	36,440	B

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
BP	23,122	A
Ban	30,079	B
Déch	33,800	C
Jac	34,000	C
MO	34,985	C

Modalité	Moyenne estimée	Groupe
EugBP	19,325	a
AmyBP	22,863	a
Tabsolu	23,675	a
FetBP	24,933	ab
Tfumier	25,188	ab
DichoBP	25,367	ab
AmyBan	25,900	ab
EugBan	27,458	b
FetBan	28,704	b
EugJac	29,121	b
EugDéch	30,183	bc
AmyJac	30,183	bc
FetMO	32,075	c
FetDéch	32,513	c
AmyDéch	33,092	c
EugMO	34,833	cd
FetJac	35,067	cd
AmyMO	35,496	cd
DichoMO	37,538	cd
DichoBan	38,254	cd
DichoDéch	39,413	cd
DichoJac	41,628	d

- **Biomasse aérienne**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
79,000	0,769	0,695

Analyse de la variance :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,564	0,030	10,347	< 0,0001
Erreur	59	0,169	0,003		
Total corrigé	78	0,733			

Analyse des sommes des carrées type III :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Vers	3	0,228	0,076	26,468	< 0,0001
Substrat	4	0,255	0,064	22,199	< 0,0001
Vers*Substrat	12	0,098	0,008	2,846	0,004

Groupes selon le test de Tukey :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Eug	0,129	A
Amy	0,138	A
Fet	0,167	A
Dicho	0,266	B

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
BP	0,071	A
Ban	0,159	B
Déch	0,203	BC
Jac	0,221	C
MO	0,221	C

Modalité	Moyenne estimée	Groupe
EugBP	0,047	a
Tabolu	0,063	a
AmyBP	0,067	a
FetBP	0,085	ab
DichoBP	0,085	ab
Tfumier	0,086	ab
AmyBan	0,088	ab
EugBan	0,115	ab
EugJac	0,140	b
FetBan	0,141	b
EugDéch	0,144	b
AmyDéch	0,149	b
AmyJac	0,158	b
FetDéch	0,172	b
EugMO	0,198	bc
FetMO	0,203	bc
AmyMO	0,229	c
FetJac	0,235	c
DichoMO	0,255	c
DichoBan	0,293	cd
DichoDéch	0,348	d
DichoJac	0,351	d

- **Biomasse racinaire**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
79,000	0,719	0,628

Analyse de la variance :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,507	0,027	7,927	< 0,0001
Erreur	59	0,199	0,003		
Total corrigé	78	0,706			

Analyse des sommes des carrées type III :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Vers	3	0,157	0,052	15,563	< 0,0001
Substrat	4	0,285	0,071	21,149	< 0,0001
Vers*Substrat	12	0,070	0,006	1,729	0,083

Groupes selon le test de Tukey :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Amy	0,153	A
Eug	0,153	A
Fet	0,181	A
Dicho	0,263	B

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
BP	0,079	A
Ban	0,177	B
Déch	0,204	BC
Jac	0,224	BC
MO	0,254	C

Modalité	Moyenne estimée	Groupe
EugBP	0,067	a
AmyBP	0,071	a
Tfumier	0,087	a
FetBP	0,087	a
DichoBP	0,091	ab
AmyBan	0,099	ab
Tabsolu	0,105	ab
EugDéch	0,136	ab
AmyDéch	0,156	b
FetBan	0,157	b
EugBan	0,158	b
EugJac	0,164	b
AmyJac	0,183	bc
FetDéch	0,195	bc
FetMO	0,223	bc
EugMO	0,239	c
FetJac	0,245	c
AmyMO	0,253	c
DichoBan	0,293	cd
DichoMO	0,301	cd
DichoJac	0,304	cd
DichoDéch	0,328	d

- **Rapport entre biomasse aérienne et racinaire (Shoot/Root)**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
87,000	0,359	0,152

- **NDVI**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
78,000	0,631	0,510

Analyse de la variance :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,124	0,007	5,221	< 0,0001
Erreur	58	0,073	0,001		
Total corrigé	77	0,197			

Analyse des sommes des carrées type III :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Vers	3	0,023	0,008	6,230	0,001
Substrat	4	0,078	0,019	15,510	< 0,0001
Vers*Substrat	12	0,022	0,002	1,456	0,168

Groupes selon le test de Tukey :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Amy	0,609	A
Fet	0,611	A
Eug	0,619	A
Dicho	0,652	B

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
BP	0,572	A
Ban	0,612	B
Jac	0,627	B
Déch	0,634	B
MO	0,670	C

Modalité	Moyenne estimée	Groupe
FetBP	0,550	a
DichoBP	0,573	ab
AmyBan	0,575	ab
DichoBan	0,575	ab
AmyBP	0,577	ab
Tfumier	0,579	a
EugBP	0,587	b
EugBan	0,598	b
AmyJac	0,607	b
EugJac	0,608	b
AmyDéch	0,609	b
FetBan	0,618	b
FetJac	0,620	b
EugDéch	0,620	b
FetDéch	0,622	b
FetMO	0,645	bc
DichoJac	0,674	c
DichoMO	0,674	c
AmyMO	0,676	c
EugMO	0,684	c
DichoDéch	0,684	c
Tabolu	0,734	d

- **PRI**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
78,000	0,510	0,350

- **Teneur en phosphore**

Coefficient d'ajustement :

Observations	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
60,000	0,661	0,501

Analyse de la variance :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	19	0,206	0,011	4,113	< 0,0001
Erreur	40	0,105	0,003		
Total corrigé	59	0,311			

Analyse des sommes des carrées type III :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Vers	3	0,021	0,007	2,675	0,060
Substrat	4	0,090	0,023	8,555	< 0,0001
Vers*Substrat	12	0,095	0,008	2,992	0,005

Groupes selon le test de Tukey :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
BP	0,212	A
Déch	0,219	A
Ban	0,232	AB
MO	0,285	BC
Jac	0,309	C

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
TabsoLu	0,052	a
EugBP	0,137	a
EugBan	0,186	ab
DichoDéch	0,188	ab
DichoBan	0,192	ab
Tfumier	0,203	ab
AmyBP	0,206	b
AmyMO	0,215	bc
FetDéch	0,219	bc
FetBan	0,220	bc
AmyDéch	0,232	bc
DichoBP	0,232	bc
EugDéch	0,235	bc
EugJac	0,241	bc
FetBP	0,273	bc
FetMO	0,302	cd
DichoMO	0,303	cd
DichoJac	0,306	cd
EugMO	0,318	cd
AmyBan	0,328	cd
FetJac	0,329	cd
AmyJac	0,361	d

**f. Indices agronomiques**

Traitement	H45	Baér	Braci	NDVI	PRI	P %	Indice final
Tabsolu	0,57	0,18	0,32	1,07	0,74	0,14	0,50 ±0,36
Tfumier	0,61	0,25	0,27	0,85	-0,02	0,56	0,42 ±0,31
Fet_BP	0,60	0,24	0,26	0,80	-0,03	0,76	0,44 ±0,33
Fet_Jac	0,84	0,67	0,75	0,91	0,44	0,91	0,75 ±0,18
Fet_Ban	0,69	0,40	0,48	0,90	0,24	0,61	0,55 ±0,23
Fet_Déch	0,78	0,49	0,59	0,91	0,68	0,61	0,68 ±0,15
Fet_MO	0,77	0,58	0,68	0,94	0,91	0,84	0,79 ±0,14
Eug_BP	0,46	0,14	0,20	0,86	-0,18	0,38	0,31 ±0,35
Eug_Jac	0,70	0,40	0,50	0,89	0,28	0,67	0,57 ±0,22
Eug_Ban	0,66	0,33	0,48	0,87	0,50	0,52	0,56 ±0,19
Eug_Déch	0,73	0,41	0,42	0,91	0,43	0,65	0,59 ±0,21
Eug_MO	0,84	0,56	0,73	1,00	0,81	0,88	0,80 ±0,15
Amy_BP	0,55	0,19	0,22	0,84	-0,07	0,57	0,38 ±0,33
Amy_Jac	0,73	0,45	0,56	0,89	0,36	1,00	0,66 ±0,25
Amy_Ban	0,62	0,25	0,30	0,84	0,07	0,91	0,50 ±0,34
Amy_Déch	0,79	0,42	0,48	0,89	0,40	0,64	0,60 ±0,21
Amy_MO	0,85	0,65	0,77	0,99	1,00	0,60	0,81 ±0,17
Dicho_BP	0,61	0,24	0,28	0,84	0,17	0,64	0,46 ±0,27
Dicho_Jac	1,00	1,00	0,97	0,98	0,81	0,85	0,94 ±0,09
Dicho_Ban	0,92	0,84	0,89	0,96	0,73	0,53	0,81 ±0,16
Dicho_Déch	0,95	0,99	1,00	1,00	0,66	0,52	0,85 ±0,21
Dicho_MO	0,90	0,70	0,89	0,98	0,97	0,84	0,88 ±0,10

**Annexe 6 : Photos illustratives**



Disposition d'un lombricompostière



Mise en place des lombricompostières



Substrat initial



Lombricompost final



Comptage des vers de terre et des cocons



Extraction du P par minéralisation



Dispositif expérimental de culture



Observation de maladie des plantes



Différence de hauteur  
(EugBP et DichoJac)



Différence de biomasse racinaire  
(EugBP et DichoJac)