UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Caractérisation morphologique et anatomique et performances en vermiculture des vers de terre épigés du Burundi

Bankabigero, Onesphore; Sous la direction de : Dr. Kazitsa Eric Gilbert (Directeur); Prof. Bararunyeretse Prudence (Co-directeur)

2025-04
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2170

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE ET ANATOMIQUE ET PERFORMANCES EN VERMICULTURE DES VERS DE TERRE EPIGES DU BURUNDI

Par

BANKABIGERO Onesphore

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Spécialité : Génie de l'environnement

Sous la direction de :

Dr. KAZITSA Eric Gilbert (Directeur)

Prof. BARARUNYERETSE Prudence (Co-directeur)

Bujumbura, avril 2025

COMPOSITION DU JURY

Président	: Prof. SIBOMANA Claver
Secrétaire	: Prof. NDUWARUGIRA Déogratias
Promoteur et directeur	: Dr. KAZITSA Éric Gilbert
Co-directeur	: Prof. BARARUNYERETSE Prudence

DEDICACE

À mes chers Parents

À mes frères

À mes sœurs

À tous mes amis

BANKABIGERO Onesphore

REMERCIEMENTS

Mes premiers et sincères remerciements vont à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la vie et la santé sans lesquelles ce travail n'aurait pas pu voir le jour. Seigneur, pendant toutes ces années d'études, tu m'as accompagné et protégé dans ta grâce. Je te remercie pour tout ce que tu m'as donné et pour ce que tu me donneras encore dans cette vie.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Dr. KAZITSA Éric Gilbert, enseignant à l'École Normale Supérieure, directeur et promoteur de ce mémoire, pour son inspiration et sa direction, malgré ses nombreuses occupations. Cher directeur, je vous suis reconnaissant pour m'avoir accueilli et encadré avec bienveillance. Votre simplicité, vos précieux conseils, vos encouragements et surtout votre disponibilité, votre expérience et vos compétences m'ont été d'un grand intérêt. Soyez assuré de ma sincère gratitude et de ma profonde reconnaissance. Je remercie également le prof. BARARUNYERETSE Prudence de l'Université du Burundi pour avoir accepté d'être le co-directeur de ce mémoire et pour tous les efforts fournis pour sa réalisation. Mes remerciements s'adressent également aux Profs. SIBOMANA Claver et NDUWARUGIRA Déogratias, qui ont accepté de faire partie du jury et ont consacré leur temps à l'examen approfondi de ce mémoire. Je suis profondément reconnaissant envers mes chers parents qui m'ont permis de fréquenter l'école et m'ont bien éduqué, ainsi que pour leur soutien moral et financier tout au long de mon parcours. Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mes sœurs pour leur aide sous diverses formes, leur solidarité et leurs sacrifices constants depuis le début de mes études. Je remercie tous mes éducateurs, de l'école primaire jusqu'au master, pour la formation scientifique et morale qu'ils m'ont transmise. Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers l'Ambassade des Pays-Bas au Burundi pour le financement de cette étude, en collaboration avec l'International Fertilizer Development Center.

Que toutes les personnes qui m'ont enseigné, de l'école primaire au niveau du master à l'Université du Burundi, en particulier les enseignants de l'option Génie de l'Environnement, trouvent dans ce mémoire le fruit de leurs efforts.

BANKABIGERO Onesphore

RESUME

L'étude de la compatibilité biologique des vers de terre est cruciale pour le développement du vermicompostage. Les espèces compatibles au vemicompostage sont épigées, ubiquistes, de petite taille, et se reproduisent rapidement (2-3 fois la population initiale en 30-45 jours) à des températures de 20-30 °C sur divers substrats organiques. Ils doivent induire des transformations physicochimiques permettant d'obtenir un vermicompost conforme aux normes internationales en 2 ou 3 mois. Afin de contribuer au développement de la vermiculture et du vermicompostage en montrant les vers de terre épigés du Burundi biologiquement compatibles avec la technologie de vermicompostage, nous avons (i) caractérisé morphologiquement et anatomiquement les espèces de vers de terre épigés qui ont une masse corporelle, des taux de survie et taux d'accroissement de population conformes en 4 et 6 semaines de culture au laboratoire sur déchets de canne à sucre et de palmier à huile à 18-32ºC; (ii) identifié ceux qui sont capables d'induire des transformations physicochimiques compatibles avec le vermicompostage et (iii) capables de produire en 60 jours un vermicompost physico chimiquement conforme à partir de déchets de canne à sucre, de palmier à huile, de fumier de vache et de contenu ruminal.

Des vers de terre épigés adultes collectés dans huit régions du Burundi ont été analysés morphologiquement et anatomiquement en laboratoire. *Eudrilus eugeniae* était présente dans 75 % des régions et deux morpho-espèces spécifiques à Kumoso et Buyogoma. Ces vers ont provoqué des transformations physicochimiques du substrat (déchets de canne à sucre et de palmier à huile), modifiant des paramètres tels que le pH, la salinité, la conductivité et les chlorures, et produisant un vermicompost enrichi en macronutriments, oligo-éléments et métaux lourds.

Les résultats de la présente étude montrent que des vers de terre présents dans diverses régions du Burundi sont biologiquement adaptés au vermicompostage, capables de transformer efficacement des déchets de canne à sucre et déchets de palmier à huile en vermicompost de qualité. Ces résultats vont aider dans le développement de cette technologie et d'autres vermi-technologies au Burundi.

Mots–clés : Vers de terre épigés, vermicompostage, compatibilité, physico-chimie.

ABSTRACT

The study of the biological compatibility of earthworms is essential for the development of vermicomposting. Species compatible with vermicomposting are epigeic, ubiquitous, small in size, and reproduce rapidly (2–3 times the initial population within 30–45 days) at temperatures ranging from 20 to 30 °C on various organic substrates. They must also induce physicochemical transformations that result in vermicompost meeting international standards within 2 to 3 months.

To support the development of vermiculture and vermicomposting by identifying epigeic earthworms in Burundi that are biologically compatible with this technology, we aimed to: (i) Morphologically and anatomically characterize epigeic earthworm species that demonstrate suitable body mass, survival rates, and population growth within 4 to 6 weeks of laboratory culture on sugarcane and palm oil residues at 18–32 °C; (ii) Identify those capable of inducing physicochemical changes compatible with the vermicomposting process; (iii) Determine which species can produce physicochemically compliant vermicompost within 60 days using sugarcane residues, palm oil waste, cow manure, and rumen content.

Adult epigeic earthworms were collected from eight natural regions of Burundi and analyzed morphologically and anatomically in the laboratory and, too morpho - species were identified, including *Eudrilus eugeniae,* found in 75% of the studied regions, and two others specific to Kumoso and Buyogoma. These earthworms induced physicochemical transformations in substrates (sugarcane and palm oil residues), altering parameters such as pH, salinity, electrical conductivity, and chloride levels, and producing vermicompost enriched with macronutrients, micronutrients, and heavy metals.

The results of this study demonstrate that earthworms from various regions of Burundi are biologically suited for vermicomposting and can efficiently convert sugarcane and palm oil waste into high-quality vermicompost. These findings contribute to advancing vermicomposting technology and other vermi-based innovations in Burundi.

Keywords: Epigeic earthworms, vermicomposting, compatibility, physical chemistry.

TABLE DES MATIERES

COMPOSITION DU JURY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES FIGURES ..... **ix**
LISTE DES TABLEAUX ..... **xii**
SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xiii**
AVANT-PROPOS ..... **xiv**
0. INTRODUCTION GENERALE **1**
0. 1. Contexte er justification 1
0.2. Problématique 3
0.3. Objectifs de l'étude 3
0.3.1. Objectif global 3
0.3.2. Objectifs spécifiques 3
0.4. Questions et hypothèses de recherche 4
0.5. Intérêt de l'étude 4
0.6. Organisation du manuscrit 5
CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES VERS DE TERRE ET LE VERMICOMPOSTAGE 6
1.1. Aperçu sur les vers de terre 6
1.1.1. Classification et diversité 6
I.1.2. Morphologie et anatomie 6
1.1.3. Habitat 7
1.2. Vermicompostage 7
1.2.1. Historique du vermicompostage 7
1.2.2. Principes de la technologie du vermicompostage 8
1.2.3. Principes fondamentaux du vermicompostage 8

1.3. Changements physicochimiques dus au vermicompostage 9
1.3.1. Modification du pH 9
1.3.2. Variation de la conductivité électrique (CE) 10
1.3.3. Variation du total des solides dissous (TSD) 10
1.3.4. Changements des chlorures 10
1.3.5. Modifications de la salinité 11
1.3.6. Libération d'oligo-éléments et de nutriments essentiels 11
1.3.7. Rapport carbone/azote 11
1.3.8. Métaux lourds 12
1.3.9. Teneur en oxygène et composés volatils 12
1.3.10. Stabilisation du substrat et réduction des composés toxiques 13
1.3.11. Standards du vermicompostage 13
1.4. Survie des vers de terre 13
1.5. Reproduction et taux de juvéniles par adulte 14
1.6. Adaptabilité à divers types de déchets 14
1.7. Capacité à améliorer les paramètres physicochimiques du substrat 14
1.8. Normes et standards des vermicomposts produits 15
1.9. Sources potentielles de vers de terre rentables en vermicompostage 15
1.10. Avantages et inconvénients des espèces locales versus espèces importées 16
1.11. Isolement des vers de terre rentables des populations naturelles 17
CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES 19
2.1. Zone d'étude 19
2.1.1. Sites d'échantillonnage 19
2.1.2. Echantillonnage et transport des échantillons 20
2.2. Vermiculture au laboratoire. 23
2.2.1. Identification taxonomique 25
2. 2.2. Détermination des paramètres biologiques 27
2.2.3. Identification morphologique et anatomique 30
2.3. Analyse de compatibilité biologique 31
2.3.1. Détermination de la masse corporelle 31

2.3.2. Détermination du taux de survie. 31
2.3.3. Détermination du nombre de cocons. 32
2.3.4. Détermination de l'accroissement de la population 32
2.4. Analyses physico-chimiques pendant la vermiculture 32
2.5. Analyse physico-chimiques et toxicologique des vermicomposts 33
2.6. Analyses statistiques des données 33
CHAPITRE 3 : RESULTATS 34
3.1. Identification morphologique et anatomique des vers de terre 34
3.1.1. Morphologie 34
3.2 Anatomie 40
3.3. Survie, masse corporelle et reproduction des vers de terre en vermiculture 41
3.4. Changement physico-chimique des substrats en présence des vers de terre 47
3.5. Composition physico-chimiques des vermicomposts produits 47
CHAPITRE 4. DISCUSSION 50
4.1. Identification des vers de terre 50
4.2. Performances biologiques en vermiculture 51
4.3. Changement physicochimique des substrats 54
4.4. Comparaison avec d'autres amendements organiques 56
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS 58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 61
ANNEXES 70

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation des sites d'échantillonnage 20

Figure 2: Ver de terre adulte montrant le clitellum 21

Figure 3: Sceaux pour le transport des échantillons de vers de terre.....22

Figure 4: Thermomètre de mesure de température de déchets de palmier à huile en fin de pré-compostage 23

Figure 5: Boîtes utilisées dans l'expérience de vermiculture comparative au laboratoire, après introduction des déchets expérimentaux et des vers de terre et après étiquetage 24

Figure 6: Spécimens des vers de terre conservés dans les flacons selon la région de provenance.25

Figure 7: (a) Morceau antérieur d'un spécimen de ver de terre indiqué par une flèche (en rouge) inclus dans la paraffine et monté sur le microtome et en train d'être coupé et (b) coupes histologiques en train d'être séché à l'étuve à 50°C.....26

Figure 8: Vers de terre placé sur papier millimétré dans le sens de la longueur 27

Figure 9: Appareil multiparamétrique pour analyses physico-chimiques 33

Figure 10: Bacs de vermicompostage avec vermicompost mature.....33

Figure 11: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce d'un ver de terre identifié dans les régions Bugesera, Bututsi, Buyenzi, Imbo et Mirwa. 37

Figure 12: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce d'un ver de terre identifié dans la région de Moso. En haut : vue dorsale de tout le corps. (En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure).....38

Figure 13: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce de ver de terre identifié dans la région de Buyogoma**.** (En haut : vue dorsale de tout le corps. En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure) 38

Figure 14: Diagrammes de la partie antérieure du corps montrant les caractéristiques des espèces de ver de terre identifiées gauche: Groupe 3;au milieu: Groupe 1;à droite: Groupe 2.....39

Figure 15: Position de la prostate chez les espèces de ver de terre identifiées: à gauche : morpho-espèce 3;au milieu : *Edrilus eugeniae* et à droite: morpho-espèce 2.....40

Figure 16: Coupes sagittales montrant la différence de la prostate entre *E. eugeniae* et la morpho-espèce 2.....41

Figure 17: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez *Edrilus eugeniae*, selon le type de déchet (DCS : Déchets de canne à sucre; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI : Masse initiale (g); M à 4 sm: Masse à 4 semaines (g)).....42

Figure 18: Comparaison du nombre de cocons chez *Edrilus eugeniae* à 2 semaines selon le type de déchet.....42

Figure 19: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez *Edrilus eugeniae*, selon le type de déchet (AP à 4 sm : Accroissement de la population à 4 semaines (%) ; AP à 6 sm: Accroissement de la population à 6 semaines (%)); 43

Figure 20: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez la morpho-espèce 2;selon le type de déchets (DCS : Déchets de canne à sucre; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI: Masse initiale(g) ; Masse à 4 sm : Masse à 4 semaines (g)) 44

Figure 21: Comparaison du nombre de cocons chez la morpho - espèce 2 à 2 semaines, selon le type de déchet 44

Figure 22: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez la morpho - espèce 3, selon le type de déchet (AP à 4 sm : Accroissement de la population à 4 semaines (%) ; AP à 6 sm: Accroissement de la population à 6 semaines (%)) 45

Figure 23: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez la morpho-espèce 3, selon le type de déchets (DCS : Déchets de canne à sucre ; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI : Masse initiale (g); M à 4 sm: Masse à 4 semaines (g)).....46

Figure 24: Comparaison du nombre de cocons chez la morpho-espèce 3 à 2 semaines, selon le type de déchet 46

Figure 25: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez la morpho-espèce 3, selon le type de déchet (AP à 4 sm: Accroissement de la population à 4 semaines (%); AP à 6 sm : Accroissement de la population à 6 semaines (%)) 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Masse, survie, nombres de cocons et accroissement de la population des vers de terre de régions tropicales 28

Tableau 2: Masse, survie, nombres de cocons et accroissement de la population des vers de terre de régions tempérées.....29

Tableau 3: Caractéristiques morphologiques détaillés des spécimens de vers de terre examinés, par région naturelle 34

Tableau 4: Synthèse des résultats d'analyses physico-chimiques de quatre différents types de vermicomposts étudiés.....49

SIGLES ET ABREVIATIONS

CE **:** Conductivité électrique

CR **:** Contenu ruménal.

DCS **:** Déchets de canne à sucre.

DPH **:** Déchets de palmier à huile.

ENS **:** Ecole Normale Supérieure

FAO **:** Food Agriculture and Organisation.

FV **:** Fumier de vache.

GE **:** Génie de l'Environnement.

GPS **:** Global Positioning System

IFDC **:** Centre International pour le Développement des engrais

MEEATU **:** Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du territoire

MINEAGRI **:** Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage.

MSGIE **:** Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.

PH **:** Potentiel d'hydrogène.

SOSUMO **:** Société Sucrière du Moso.

TBC **:** Tanganyika Business Company.

TSD **:** Total des Solides Dissous

UB **:** Université du Burundi.

UNG **:** Université de Ngozi.

AVANT-PROPOS

Des études faites dans différentes régions du monde montrent qu'il est possible de valoriser beaucoup de déchets organiques biodégradables via le vermicompostage ou technologie de décomposition utilisant l'activité des vers de terre. Le vermicompostage permet de transformer les déchets biodégradables en vermicompost, un excellent amendement et fertilisant organique.

Tous les vers de terre ne sont pas rentables en vermicompostage. Pour une région donnée, le fait de disposer des vers de terre biologiquement compatibles avec le vermicompostage facilite le développement de cette technologie.

Réalisée dans le cadre des travaux de recherche de fin d'études de Master en sciences et gestion intégrée de l'environnement à l'Université du Burundi, Spécialité Génie de l'environnement, le présent travail est consacré à la recherche de vers de terre du Burundi biologiquement compatibles avec le vermicompostage. Elle apportera une lumière sur la diversité taxonomique et la biologie des vers de terre du pays qui peuvent donner de bons résultats en vermicompostage ainsi que les conditions de leur vermiculture.

0. INTRODUCTION GENERALE

0. 1. Contexte er justification

L'apport de la matière organique est indispensable à la fertilité durable des sols cultivés. La matière organique est une source de nutriments indispensables pour les cultures, permet une fertilité du sol, favorise l'aération du sol, la circulation et la rétention de l'eau dans les pores et crée des conditions propices aux êtres vivants bénéfiques du sol. Bref, elle permet une fertilité chimique, physique et biologique du sol (Hervé et al., 2007) ; FAO ,1980).

Les données en provenance des études faites sur tous les continents montrent qu'une des meilleures stratégies d'enrichir les sols cultivés en matière organique est le vermicompost ou une sorte de compost produit en utilisant l'activité des vers de terre ou tout simplement la technologie de vermicompostage (Hervé et al., 2007); FAO ,1980).

La littérature scientifique montre que le vermicompostage présente beaucoup d'avantages. En comparaison avec le compostage traditionnel, le vermicompostage est relativement rapide et peu coûteuse (Edwards & Arancon, 2004). Il ne produit aucun déchet à la fin du processus et permet de réduire les micro-organismes pathogènes (Domínguez & Edwards, 2011). Grace à une série de propriétés physicochimiques et biologiques particulières, le vemicompost influence positivement à la fois les paramètres physiques, chimiques et biologiques de fertilité du sol (Lazcano & Domínguez, 2011). Il stimule la croissance et améliore la résistance des cultures au stress biotique et abiotique (Arancon et al., 2006). Aussi, le vermicompostage permet de prévenir ou d'atténuer plusieurs problèmes environnementaux et sanitaires, notamment ceux liés à l'accumulation de déchets organiques, aux techniques de gestion nuisibles comme le brûlage, ainsi qu'aux impacts négatifs de la fabrication et de l'utilisation des engrais chimiques, tels que les émissions de gaz à effet de serre, l'acidification des sols, la pollution des eaux et les coûts élevés d'approvisionnement (Gajalakshmi & Abbasi, 2008 ; Aira et al., 2002).

Le vermicompostage dépend de la vermiculture ou l'art d'élever les vers de terre. Le génie de la vermiculture consiste à garantir les valeurs optimales pour les paramètres clés dans la survie, la croissance et la reproduction des vers de terre qui sont l'aération, l'humidité, l'alimentation, la température, le pH, la teneur en lignine et en polyphénol (Edwards & Arancon, 2004).

En plus du vermicompostage, les recherches en vermiculture sont aussi essentielles à d'autres applications basées sur les vers de terre comme la vermi-remédiatrion, la vermi-filtration, la

vermi-agro-production et la vermi-production industrielle. (Sinha et al., 2008 ; Gómez-Brandón et al., 2012, Arora et al., 2014, Edwards et Arancon, 2004, Sinha et al., 2010). Ces domaines émergents font de la vermiculture une discipline stratégique dans le développement durable et la bio économie circulaire (Sinha et al., 2008 ; Gómez-Brandón et al., 2012 ; Arora et al., 2014 ; Edwards & Arancon, 2004 ; Sinha et al., 2010).

Le développement durable du vermicompostage exige d'utiliser des vers de terre composteurs biologiquement compatibles avec cette technologie et de maîtriser leurs exigences physiologiques, en particulier pour leur survie, leur croissance et leur reproduction, et de savoir répondre à ces exigences lors des aménagements (Byambas, 2020). Les vers de terre qui peuvent donner de bons résultats en vermicompostage sont ceux qui sont peu exigeants ou garde un haut niveau de fitness dans des conditions variées de vermiculture (Domínguez & Edwards, 2011).

Au Burundi, la majorité des sols cultivés présentent une acidité élevée, une faible teneur en matière organique et une carence en nutriments essentiels, ce qui limite fortement la productivité de nombreuses cultures (Kaboneka, 2015). Aussi, des études récentes, notamment celle Kakana (2010), révèlent une abondance de déchets organiques potentiellement vermicompostables qui demeurent toutefois mal valorisés dans les systèmes de gestion actuels. Cette situation souligne la nécessité d'adopter des approches durables, telles que le vermicompostage, pour améliorer la fertilité des sols et promouvoir une agriculture plus résiliente.

Les recherches en vermiculture jouent un rôle crucial dans le développement de la technologie de vermicompostage. En particulier, les études visant à identifier des espèces de vers de terre adaptées aux conditions locales sont essentielles, car elles permettent d'optimiser le processus de transformation des déchets organiques en amendements de qualité. Ce besoin est d'autant plus urgent au Burundi où la valorisation des déchets agricoles et urbains par vermicompostage pourrait significativement contribuer à la fertilisation des sols acides et à la sécurité alimentaire (Edwards & Arancon, 2004 ; Sinha et al., 2010).

L'identification de vers de terre composteurs, tolérants aux conditions climatiques locales et aux types de déchets disponibles, représente une étape fondamentale dans l'implantation durable de cette technologie (Domínguez & Edwards, 2011).

0.2. Problématique

Malgré la majorité des sols cultivés au Burundi, le mode de gestion des déchets biodégradables en vigueur et l'existence de déchets potentiellement vermicompostables à grande échelle semblent interpeler pour le développement du vermicompostage, une technologie localement quasi-méconnue. Aussi, il y a peu d'information sur la biologie des vers de terre du pays encore moins celle en rapport avec les adaptations et les potentialités de ces invertébrés pour le vermicompostage (Savala et al., 2003 ; Suthar, 2007; Csuzdi, 2008; Blakemore, 2015; Ghorbani & Sabour, 2021).

0.3. Objectifs de l'étude

0.3.1. Objectif global

L'objectif global de la présente étude est de contribuer au développement de la vermiculture et du vermicompostage au Burundi en identifiant à base de traits biologiques, les vers de terre biologiquement compatibles avec la technologie de vermicompostage afin de développer une agriculture durable.

0.3.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient de :

- caractériser morphologiquement et anatomiquement les espèces de vers de terre épigés du pays qui ont une masse corporelle, des taux de survie et taux d'accroissement de population conformes en 4 et 6 semaines de culture au laboratoire sur des déchets de canne à sucre et des déchets de palmier à huile à 18-32^{o}C ;

- identifier des espèces de vers de terre capables d'induire des transformations physicochimiques compatibles avec le vermicompostage dans les paramètres suivants : pH, total des solides dissout, conductivité électrique, salinité, chlorures et ;

- identifier des espèces de vers de terre aptes à produire en 60 jours des vermicomposts physico-chiquement conformes aux normes internationales à partir des déchets de canne à sucre et des déchets de palmier à huile mais aussi du fumier de vache et du contenu ruménal.

0.4. Questions et hypothèses de recherche

Les recherches faites avaient comme principales préoccupations de répondre aux questions suivantes :

- Y-a-t-il des vers de terre compatibles avec la technologie d'identifier des espèces de vers de terre au Burundi et dans quelles régions naturelles du pays vivent-ils?
- Ces vers sont-ils capables d'induire des transformations physicochimiques compatibles avec le vermicompostage dans les paramètres de pH, TDS, CE, salinité, chlorures et capables de produire un vermicompost avec une composition physicochimique caractéristique des vermicomposts, conforme aux normes internationales (AFNOR NF U44-051)?

Sur base de l'information collectée dans la littérature, les hypothèses de recherche suivantes ont été formulées et testées :

- Il existerait une ou des espèces de vers de terre compatibles avec la technologie du vermicompostage et parmi elles le ver de terre composteur africain, *Eudrilus eugeniae* (Blakemore, 2015);
- Cette espèce, de même que d'autres qui seraient trouvées devrait être largement distribuée dans plusieurs régions naturelles du Burundi (Paul, 2017 ; Dominguez et al., 2001) ;
- Ces vers seraient capables d'induire des transformations physicochimiques compatibles avec le vermicompostage dans les paramètres de pH, TDS, CE, salinité et aptes à produire un vermicompost avec une composition physicochimique caractéristique des vermicomposts, conforme aux normes internationales (AFNOR NF U44-051).

0.5. Intérêt de l'étude

Nous espérons qu'en apportant une lumière sur les sources potentielles de vers de terre composteurs au Burundi, en montrant comment les élever sur les déchets étudiés et en caractérisant physicochimiquement le vermicompost qu'ils produisent, notre étude va contribuer au développement de la vermiculture et du vermicompostage dans le pays.

0.6. Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres. Le Chapitre 1 donne l'information sur les généralités, en passant en revue la littérature disponible, sur les vers de terre, la vermiculture et le vermicompostage. Le chapitre 2 précise le matériel utilisé et la méthodologie de recherche pour chaque objectif spécifique formulé tandis que le troisième chapitre traite des résultats. Le quatrième chapitre qui est le dernier concerne la discussion des résultats et en fin notre travail se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES VERS DE TERRE ET LE VERMICOMPOSTAGE

1.1. Aperçu sur les vers de terre

1.1.1. Classification et diversité

Du point de vue taxonomique, *Eudrilus eugeniae* (Gabriella et al., 2019), comme espèce de ver de terre nocturne Africain, appartient à l'Embranchement des Annélides, à la classe des Oligochètes, à l'ordre des Haplotaxidae et à la famille des *Eudrilidae*. Cette espèce regroupe des organismes principalement terrestres et vivant dans le sol (Ansari & Saywack, 2011). Originaire d'Afrique de l'Ouest, ce ver de terre tropical est commun dans les savanes et préfère les substrats riches en matière organique. Son cycle de vie est rapide, du cocon à la maturité en seulement 47 jours (Gabriella et al., 2019 ; Ansari & Saywack, 2011).

Les vers de terre représentent jusqu'à 70 % de la biomasse du sol (Byambas et al., 2017). Cinq mille espèces ont déjà été décrites à travers le monde, mais de nombreuses autres restant à découvrir et principalement dans les zones tropicales (Brown et al., 2013). Darwin, dans son livre "Formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits", paru en 1892, a été le premier texte de recherche à mentionner les vers de terre (Feller et al., 2003).

I.1.2. Morphologie et anatomie

Les vers de terre sont des invertébrés avec un corps mou, long, allongé et cylindrique, composé de segments en forme d'anneaux et marqués à l'extérieur par des rainures circulaires appelées annuli. Sur la surface ventrale des côtés du corps, les segments portent quatre paires de soies courtes et pointues qui permettent le déplacement.

Les vers de terre ont un tube digestif complet, ouvert à l'extrémité antérieure par un pore servant de bouche et à l'extrémité postérieure par un autre pore, l'anus.

Les vers de terre adultes possèdent des gonades mâles et des gonades femelles. Pour cette raison, les vers de terre sont donc qualifiés d'hermaphrodites.

1.1.3. Habitat

Les vers de terre sont présents dans la majorité des écosystèmes terrestres, principalement en régions tempérées et tropicales.

Ils vivent dans différentes strates du sol, de divers habitats terrestres de la planète et sont essentiellement des détritivores. Ils appartiennent à trois guildes écologiques distinctes : les épigés, les anéciques et les endogées se distinguant par une série de caractéristiques morphologiques et écologiques. Les épigés vivent dans le sol superficiel et les amas de matières organiques et creusent peu ou pas de galeries dans le sol. Les anéciques occupent la couche du sol autour de 25 cm et creusent des galeries verticales. Enfin, les endogées habitent le sol profond et creusent des galeries horizontales (Pérès et al., 2011).

1.2. Vermicompostage

Le vermicompostage est défini comme un processus biologique dans lequel les vers de terre et les micro-organismes transforment les déchets organiques en un produit stabilisé et riche en nutriments appelé vermicompost. Ce processus repose sur l'activité de vers de terre composteurs qui fragmentent et dégradent la matière organique tout en favorisant l'activité microbienne (Edwards & Bohlen, 1996).

Contrairement au compostage traditionnel, le vermicompostage se caractérise par une température modérée, une production rapide, et un produit final riche en enzymes et en micro-organismes bénéfiques (Domínguez & Edwards, 2011).

Le vermicompost est particulièrement apprécié en agriculture en raison de sa capacité à améliorer la fertilité du sol en augmentant la disponibilité des nutriments, en améliorant la structure du sol et en stimulant la croissance des plantes (Sinha et al., 2010). De plus, il s'inscrit dans une démarche durable en réduisant les déchets organiques et en limitant l'émission des gaz à effet de serre liée à leur gestion (Aira et al., 2016).

1.2.1. Historique du vermicompostage

L'utilisation des vers de terre pour améliorer les sols remonte à l'Antiquité, avec Aristote qui, au IVe siècle avant J.-C., considérait les vers comme les "intestins de la Terre", soulignant leur rôle dans la fertilité des sols.

Cette idée fut reprise par Charles Darwin, qui dans son ouvrage *The Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms* (1881), démontra l'impact écologique des vers de terre.

Le vermicompostage moderne a émergé dans les années 1940, en Inde et aux États-Unis, où des recherches ont montré l'impact des vers sur la dégradation des déchets agricoles (Bhadauria & Saxena, 2010).

En Inde, Howard (1940) a promu l'utilisation des vers de terre dans l'agriculture biologique pour recycler les déchets de ferme et enrichir les sols, contribuant à la base des pratiques de vermicompostage utilisées aujourd'hui (Edwards et al., 1988). Ces travaux pionniers ont influencé durablement la gestion durable des sols et la valorisation des matières organiques en agriculture (Edwards & Bohlen, 1996).

Dans les années 1970, le vermicompostage est devenu une technologie industrielle grâce à l'utilisation d'espèces comme *Eisenia fetida* pour traiter les déchets organiques municipaux et agricoles (Domínguez, 2004).

Aujourd'hui, cette technologie est largement adoptée dans les pays tropicaux, où des recherches ont montré son efficacité pour traiter des déchets comme ceux de la canne à sucre et du palmier à huile (Suthar, 2010).

1.2.2. Principes de la technologie du vermicompostage

Le vermicompostage repose sur la bioconversion des déchets organiques par les vers de terre et les micro-organismes. Les vers, tels que *Eisenia fetida* et *Eudrilus eugeniae*, décomposent la matière organique, favorisant sa fragmentation et son enrichissement en éléments nutritifs (Domínguez & Edwards, 2011). Les excréments des vers, riches en micro-organismes, jouent un rôle clé dans la stabilisation du compost ce qui améliore la qualité du produit final (Suthar, 2010). Ce processus nécessite des conditions optimales de température (20-30 °C), d'humidité et de pH neutre à légèrement alcalin (Domínguez, 2004).

1.2.3. Principes fondamentaux du vermicompostage

Sélection des espèces de vers : Les vers doivent avoir des taux de croissance et de reproduction élevés, comme *Eisenia fetida* pour les climats tempérés et *Eudrilus eugeniae* pour les climats tropicaux (Sinha et al., 2010).

Choix du substrat : Les déchets organiques riches en carbone et en azote, comme les résidus agricoles et les déchets de cuisine, sont idéaux pour le vermicompostage.

Les substrats doivent être à faible toxicité et à faible teneur en métaux lourds pour éviter tout impact néfaste sur les vers et la qualité du compost final (Gupta & Garg, 2009).

Paramètres physicochimiques : Il est crucial de maintenir une température inférieure à 35 °C pour éviter le stress thermique des vers (Aira et al., 2016), un taux d'humidité constant de 70 % et un pH proche de 7 (Suthar, 2010).

Systèmes de vermicompostage. Ils peuvent être réalisés à petite ou grande échelle, avec des méthodes comme des lits ouverts, des bacs aérés et des systèmes à flux continu (Domínguez & Edwards, 2011).

Produits finaux : Le vermicompost final est riche en macronutriments (azote, phosphore, potassium) et micronutriments, ainsi qu'en enzymes et hormones végétales qui favorisent la croissance des plantes (Sinha et al., 2010).

1.3. Changements physicochimiques dus au vermicompostage

Pendant le vermicompostage normal, les vers de terre et les micro-organismes associés modifient significativement les propriétés physicochimiques des substrats organiques. Ces transformations aboutissent à un compost stabilisé, riche en nutriments essentiels pour les plantes et respectant souvent les normes agronomiques.

Voici un examen détaillé des changements observés, incluant les oligo-éléments et les métaux lourds.

1.3.1. Modification du pH

Le pH du substrat peut subir des variations considérables pendant le vermicompostage. Initialement, une acidification peut se produire en raison de la dégradation des matières organiques en acides organiques.

Toutefois, à mesure que le compost mûrit, le pH se stabilise généralement dans une plage neutre ou légèrement alcaline (Suthar, 2007; Edwards & Bohlen, 1996). Cette stabilisation est bénéfique pour des sols acides, car le compost peut agir comme amendement pour réduire l'acidité du sol.

L'amélioration du pH dans les composts produits par les vers de terre a été observée dans des études où le pH passe de valeurs acides à des valeurs proches de la neutralité (Domínguez & Edwards, 2011; Yadav & Garg, 2011).

1.3.2. Variation de la conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) augmente au début du processus de vermicompostage en raison de la libération d'ions solubles. Cette augmentation est due à la dégradation de la matière organique, qui libère des sels solubles et des ions dans le substrat (Suthar, 2007). Cependant, après une période de maturation, la CE a tendance à diminuer, indiquant une réduction des éléments solubles. Cela est bénéfique car une conductivité électrique trop élevée peut nuire à l'absorption de l'eau par les racines des plantes, un phénomène bien documenté dans plusieurs études (Edwards & Bohlen, 1996). L'effet de la vermiculture sur la CE a été particulièrement mis en évidence par Yadav et Garg (2011) qui ont observé une réduction de ce paramètre après plusieurs semaines de dégradation.

1.3.3. Variation du total des solides dissous (TSD)

Le TSD, qui mesure la concentration des éléments dissous dans le substrat, est également influencé par la présence de vers de terre. Dès le début du vermicompostage, le TSD augmente en raison de la dégradation des matières organiques en ions solubles.

Toutefois, une fois que la matière organique est stabilisée et transformée en compost, le TSD diminue, signe d'une transformation réussie de la matière organique en un produit plus stable et moins soluble (Suthar, 2007). Ce phénomène peut être crucial pour le contrôle des propriétés du compost, car une concentration excessive de TSD pourrait nuire aux caractéristiques fertiles de ce dernier (Garg & Kaushik, 2006).

1.3.4. Changements des chlorures

La concentration en chlorures peut augmenter en début de vermicompostage, en raison de la dégradation des matières organiques contenant des sels. Cependant, cette concentration a tendance à diminuer au fur et à mesure de la maturation du compost.

Selon Garg et Kaushik (2006) et Yadav et Garg (2011), les vers de terre contribuent à réduire la concentration en chlorures en favorisant des processus biologiques qui modifient la composition ionique du substrat. Une réduction de ces ions est cruciale pour prévenir la salinisation du compost et protéger les sols agricoles.

1.3.5. Modifications de la salinité

La salinité du compost, influencée par les concentrations de sels solubles dans le substrat, augmente au début du vermicompostage en raison de la dégradation des matières organiques riches en sels. Toutefois, la salinité diminue généralement à mesure que le compost mûrit, ce qui en fait un amendement plus sûr pour les sols agricoles (Suthar, 2007). Des niveaux modérés de salinité sont bénéfiques pour le sol, mais des niveaux élevés peuvent nuire à la croissance des plantes. Edwards & Bohlen (1996) ont noté que les vers de terre jouent un rôle clé dans le contrôle de la salinité, favorisant un environnement de compost plus stable.

1.3.6. Libération d'oligo-éléments et de nutriments essentiels

Les vers de terre, en dégradant la matière organique, libèrent une variété de nutriments essentiels pour les plantes. Ces nutriments incluent l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) ainsi que des oligo-éléments tels que le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le manganèse (Mn). Ces éléments sont libérés sous des formes plus accessibles pour les plantes (Garg & Kaushik, 2006; Domínguez & Edwards, 2011). La libération de ces éléments est particulièrement bénéfique pour les sols pauvres en nutriments, car elle améliore la fertilité du sol et la croissance des plantes.

Yadav et Garg (2011) ont montré que la vermiculture augmente la disponibilité des oligo-éléments dans le compost en les rendant plus solubles et mieux absorbables par les racines des plantes.

1.3.7. Rapport carbone/azote

L’un des indicateurs clés de la maturation du compost est la réduction du rapport carbone/azote (C/N). Pendant le vermicompostage, le carbone organique est consommé par les vers de terre et les micro-organismes pour leurs besoins métaboliques, tandis que l’azote est conservé et même enrichi par les excrétions des vers et la minéralisation (Edwards & Bohlen, 1996).

Le rapport C/N initial, souvent élevé (30:1 ou plus), diminue progressivement pour atteindre des valeurs inférieures à 15:1 dans le compost final, le rendant adapté aux applications agricoles (Suthar, 2007). Par ailleurs, les niveaux d'azote, de phosphore et de potassium augmentent de manière significative.

Ces éléments, libérés sous des formes biodisponibles, sont essentiels à la croissance des plantes. Par exemple, des augmentations de 50-70 % de l'azote disponible et de 30-50 % du phosphore assimilable ont été rapportées dans le vermicompost (Domínguez & Edwards, 2011).

1.3.8. Métaux lourds

Les vers de terre jouent un rôle important dans la réduction des concentrations de métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) dans le compost. Ce processus se produit grâce à la capacité des vers à biotransformer ces métaux en formes moins solubles et moins bio disponibles (Suthar, 2007; Yadav & Garg, 2011). La capacité des vers à bioaccumuler certains métaux lourds dans leurs tissus contribue également à la réduction de leur concentration dans le compost final, ce qui le rend plus sûr pour l'utilisation agricole. La réduction de la toxicité des métaux lourds est essentielle pour garantir que le compost ne constitue pas un danger pour la santé des plantes ou des écosystèmes aussi pour la communauté à travers la chaîne trophique (Alloway, 2013).

1.3.9. Teneur en oxygène et composés volatils

L'activité des vers de terre dans le compost améliore la porosité et l'aération du substrat, ce qui permet une meilleure diffusion de l'oxygène et favorise une dégradation aérobie de la matière organique. Cette meilleure oxygénation limite la production de gaz à effet de serre tels que le méthane (CH4) couramment émis dans des conditions anaérobies.

Les vers contribuent également à la réduction de la formation de composés volatils et malodorants tels que l'ammoniac, rendant le compost moins nuisible pour l'environnement (Edwards & Bohlen, 1996). Ce phénomène est essentiel pour produire un compost de meilleure qualité, plus stable et plus sûr pour l'utilisation agricole.

1.3.10. Stabilisation du substrat et réduction des composés toxiques

L'humification est l'un des principaux processus qui transforme la matière organique en compost stable.

Les vers de terre facilitent l'humification des matières organiques en les transformant en humus, qui est un produit stable et moins phytotoxique.

Cette transformation rend le compost plus sûr pour les sols agricoles et améliore ses effets sur la croissance des plantes (Domínguez & Edwards, 2011).

Suthar (2007) a montré que ce processus de permet de réduire la toxicité des composés organiques rendant le compost plus respectueux de l'environnement.

1.3.11. Standards du vermicompostage

Les vers de terre jouent un rôle central dans le processus de vermicompostage en transformant les matières organiques en compost riche en nutriments (Edwards & Arancon, 2004). Cependant, pour que le vermicompostage soit un processus rentable et efficace, il est essentiel de respecter certains standards relatifs aux vers de terre utilisés, notamment en ce qui concerne leur biologie, leur survie, leur reproduction, leur capacité à traiter des déchets organiques spécifiques, ainsi que leur compatibilité avec les conditions de culture et les types de déchets utilisés (Domínguez, 2018). Ces standards peuvent varier en fonction des espèces, des conditions environnementales et des exigences des producteurs de compost (Loh et al., 2017).

1.4. Survie des vers de terre

La survie des vers de terre est l'un des principaux critères pour évaluer la rentabilité du vermicompostage. Les vers doivent être capables de résister à des conditions de température et d'humidité spécifiques pour se développer correctement. La température optimale pour la plupart des vers de terre utilisés en vermiculture, tels que *Eisenia fetida*, se situe entre 15 et 25°C (Edwards & Bohlen, 1996; Suthar, 2007). Des températures plus élevées ou plus basses peuvent nuire à leur survie et à leur reproduction (Domínguez & Edwards, 2011).

Un taux d'humidité trop élevé ou trop faible peut entraîner la déshydratation ou la pourriture des vers. Il est nécessaire de maintenir une humidité relative autour de 60 à 80 % pour une croissance optimale des vers (Yadav & Garg, 2011).

1.5. Reproduction et taux de juvéniles par adulte

Les vers de terre doivent présenter un taux de reproduction élevé pour assurer une production continue de vermicompost. Leur taux de reproduction est mesuré par le nombre de juvéniles produits par adulte dans un certain laps de temps.

En général, un bon taux de reproduction indique une bonne santé de la population de vers et une efficacité du processus de vermicompostage. Par exemple, *Eisenia fetida*, peut produire entre 1 et 2 cocons par semaine, chaque cocon pouvant contenir jusqu'à 4 œufs (Edwards, 2004). La période de reproduction varie, mais les vers peuvent commencer à produire des cocons après environ 3 à 4 semaines d'adaptation aux conditions de compostage (Domínguez & Edwards, 2011). Des taux de survie des adultes de 80 % ou plus et des taux de reproduction de 10 à 20 juvéniles par adulte sont considérés comme des standards biologiques de rentabilité pour le vermicompostage (Suthar, 2007). La durée de vie est de 3 ans pour *E. eugeniae*, 5-8 ans pour *Perionyx excavatus* et *Eisenia fetida*.

1.6. Adaptabilité à divers types de déchets

Le processus de vermiculture peut être influencé par la nature du substrat utilisé. Les vers de terre utilisés doivent être capables de décomposer une large gamme de matières organiques, y compris les déchets agricoles, les restes alimentaires, et les résidus industriels comme les déchets de canne à sucre ou du palmier à huile. Certaines espèces, comme *Eisenia fetida*, sont particulièrement adaptées aux déchets riches en carbone, tandis que d'autres, comme *Eudrilus eugeniae*, peuvent mieux traiter des substrats plus humides ou plus riches en azote (Edwards & Bohlen, 1996). La sélection des vers doit donc être faite en fonction du type de déchets à composter et de la capacité des vers à les transformer efficacement en compost de qualité.

1.7. Capacité à améliorer les paramètres physicochimiques du substrat

Une espèce rentable en vermiculture doit être capable de stabiliser et de modifier les paramètres de manière à produire un compost de haute qualité.

Par exemple, des études ont montré que *Eisenia fetida* réduit efficacement la salinité et améliore la teneur en nutriments essentiels tels que le phosphore, le potassium et le calcium (Garg & Kaushik, 2006; Yadav & Garg, 2011).

Il est aussi crucial que les vers de terre contribuent à la réduction de la toxicité des métaux lourds (Cd, Pb, Cu, Zn), ce qui peut influencer la qualité et la sécurité du vermicompost produit (Suthar, 2007).

1.8. Normes et standards des vermicomposts produits

Les vermicomposts produits doivent répondre à des normes internationales spécifiques en termes de composition physicochimique pour garantir leur efficacité comme amendement de sol. Ces normes incluent des niveaux adéquats de nutriments (N, P, K) et des niveaux minimaux de contaminants tels que les métaux lourds. Les vermicomposts doivent être riches en matière organique stable et présenter une texture et une structure qui favorisent l'aération du sol (Adhikari et al., 2009 ; AFNOR, 2005). La conformité avec les standards internationaux est essentielle pour garantir que le compost est sûr et bénéfique pour l'agriculture (Edwards & Bohlen, 1996; Suthar, 2007). Les tests de qualité du compost incluent des analyses du pH, de la conductivité électrique, du TSD, des niveaux d'éléments nutritifs et des métaux lourds, ainsi que des tests de toxicité phytosanitaires AFNOR. (2006).

1.9. Sources potentielles de vers de terre rentables en vermicompostage

L'utilisation de vers de terre dans le vermicompostage repose sur le choix d'espèces adaptées qui doivent répondre à des critères biologiques et écologiques stricts comme la capacité de reproduction rapide, la tolérance aux conditions de compostage, la capacité à dégrader des déchets organiques variés et de produire du vermicompost de bonne qualité et sain (Edwards & Bohlen, 1996 ; Domínguez & Edwards, 2011). Ces critères varient en fonction des conditions spécifiques de la région, des types de déchets à traiter et des objectifs de production du vermicompost. L'identification et la sélection des meilleures espèces de vers de terre sont cruciales pour garantir des performances optimales et une rentabilité à long terme dans les systèmes de vermiculture (Sinha et al., 2010 ; Tripathi & Bhardwaj, 2004).

Les vers de terre utilisés en vermiculture peuvent provenir de plusieurs sources :

Élevages spécialisés : Les vers d'élevage sont une source plus fiable car ils sont sélectionnés en fonction de critères biologiques précis et adaptés aux conditions de vermiculture.

Ces vers peuvent être achetés auprès de fermes spécialisées en vermiculture, où ils sont élevés dans des conditions contrôlées.

Espèces exotiques : Dans certaines régions, des espèces de vers de terre provenant d'autres régions (ou même d'autres continents) peuvent être introduites pour répondre à des besoins spécifiques. Cela inclut des espèces telles que *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* ou *Perionyx excavatus* qui sont souvent utilisées dans le vermicompostage commercial en raison de leur rapidité de reproduction et de leur capacité à traiter une large gamme de déchets organiques (Suthar, (2009), Aira et al., 2007, Domínguez & Edwards, 2011).

Populations locales : Les vers de terre peuvent être collectés dans la nature, notamment dans les sols riches en matière organique, comme les forêts ou les prairies. Cependant, cette méthode est souvent moins efficace, car elle peut entraîner une perturbation des écosystèmes locaux et un risque de sélection d'espèces moins adaptées à des conditions spécifiques de vermiculture (Yadav & Garg, 2011, Edwards & Bohlen, 1996).

1.10. Avantages et inconvénients des espèces locales versus espèces importées

Lors du choix entre des espèces local et importées de vers de terre, plusieurs avantages et inconvénients doivent être pris en compte :

a) Avantages des espèces locales

Adaptation locale : Les espèces locales sont naturellement adaptées aux conditions écologiques de leur milieu, notamment le climat, la qualité du sol et les types de déchets disponibles (Suthar, 2007). Elles sont moins susceptibles de nécessiter des interventions pour maintenir leur bien-être dans un environnement donné.

Biodiversité préservée : L'utilisation d'espèces indigènes peut favoriser la biodiversité locale et éviter des perturbations des écosystèmes (Wurst & Schröder, 2008). Cela peut aussi réduire le risque de maladies transmises par des espèces importées.

Coûts de logistique réduits : Utiliser des vers indigènes peut réduire les coûts liés à l'importation et à l'adaptation des espèces exotiques aux conditions locales.

b) Inconvénients des espèces locales

Moins de productivité : Certaines espèces indigènes peuvent avoir une reproduction plus lente ou une capacité limitée à traiter certains types de déchets organiques. Cela peut réduire leur efficacité dans des systèmes de vermiculture commerciaux (Edwards & Bohlen, 1996).

Disponibilité limitée : Dans certaines régions, les espèces indigènes adaptées au vermicompostage peuvent être rares ou difficilement accessibles, nécessitant parfois un effort considérable pour les collecter ou les élever.

c) Avantages des espèces importées

Haute productivité : Les espèces importées, comme *Eisenia fetida* et *Eudrilus eugeniae,* sont très productives et adaptées aux conditions de vermiculture intensives, avec une reproduction rapide et une capacité à traiter une large gamme de déchets organiques (Suthar, 2007).

Disponibilité commerciale : Ces espèces sont largement disponibles à l'échelle mondiale, ce qui facilite leur acquisition pour les fermes de vermiculture à grande échelle (Garg & Kaushik, 2006).

Tolérance à une large gamme de conditions : Certaines espèces importées, comme *Eisenia fetida,* sont très résistantes aux variations de température et d'humidité, ce qui en fait des choix populaires pour les systèmes de vermiculture contrôlés (Edwards, 2004).

d) Inconvénients des espèces importées

Risque de perturbation écologique : L'introduction d'espèces exotiques peut perturber les écosystèmes locaux et entraîner une perte de biodiversité. Certaines espèces importées peuvent devenir invasives, perturbant les populations de vers indigènes et d'autres organismes du sol (Wurst & Schröder, 2008).

Adaptation aux conditions locales : Les espèces exotiques peuvent nécessiter des ajustements de température, d'humidité ou d'autres conditions pour s'adapter aux environnements locaux, ce qui peut augmenter les coûts de maintenance et de gestion (Suthar, 2007).

1.11. Isolement des vers de terre rentables des populations naturelles

L'isolement d'espèces de vers de terre rentables à partir des populations naturelles repose sur plusieurs étapes essentielles, telles que la prospection écologique, l'identification morphologique et génétique, et l'évaluation de la biologie reproductive.

La prospection écologique consiste à échantillonner les vers dans divers habitats naturels tout en mesurant des paramètres environnementaux comme l'humidité et le pH du sol.

Des études en Afrique subsaharienne ont montré que *Eudrilus eugeniae* et *Perionyx excavatus* prospèrent dans des sols tropicaux riches en matière organique et sont efficaces dans la gestion des déchets agricoles (Suthar et al., 2009; Karanja et al., 2016).

L'identification morphologique et génétique des espèces permet de distinguer les espèces locales et introduites, en évitant les risques liés à l'introduction d'espèces exotiques nuisibles (Blouin et al., 2013; Zhang et al., 2013).

L'évaluation de la biologie reproductive permet de sélectionner des espèces ayant un cycle de reproduction rapide, comme *Eisenia andrei,* qui produit un vermicompost riche en nutriments (Lourenzi et al., 2014). De plus, des tests de performance sur différents substrats organiques, tels que les déchets agricoles, montrent que certaines espèces, comme *E. eugeniae et P. excavatus*, sont particulièrement efficaces dans la dégradation des déchets organiques (Bala et al., 2017; Plisko et al., 2010).

Ainsi, bien que des progrès aient été réalisés dans d'autres régions comme l'Inde et le Brésil, l'Afrique subsaharienne offre de nombreuses opportunités pour développer des pratiques de vermiculture adaptées aux besoins locaux (Domínguez et al., 2019). Des études récentes en Éthiopie montrent un grand potentiel pour l'utilisation des vers locaux dans la gestion des déchets organiques, mais au Burundi, ces recherches sont sous-exploitées (Suthar, 2009). Il est donc nécessaire de mener des expérimentations localisées pour identifier les espèces adaptées au Pays, ainsi que des études de tolérance environnementale pour évaluer la survie et la reproduction des vers dans des conditions spécifiques de sols tropicaux (Blouin et al., 2013).

CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Zone d'étude

Le Burundi comporte 11 régions naturelles présentant des différences dans les paramètres susceptibles d'influencer la vie, en particulier les vers de terre. Les régions naturelles du pays varient en effet selon la température, les précipitations et l'altitude, influençant la répartition des espèces animales et végétales (Nzigidahera, 2007; Ntibwunguka, 2019). Par exemple, les montagnes de l'Ouest, notamment les monts de la Kibira (partie nord du Congo-Nil), bénéficient d'un climat tempéré avec des précipitations abondantes, favorisant des forêts tropicales et une faune riche en primates et oiseaux endémiques (Berkel, 2017; Bongaarts & Berrisford, 2020). À l'inverse, les plateaux du Sud (Bururi, Makamba, Rumonge), partie basse, et les régions arides de l'Est **(**Cankuzo, Ruyigi, partie Est de Rutana et Karuzi) présentent des températures élevées et des précipitations plus faibles, supportant des écosystèmes de savane et des espèces adaptées à la chaleur (World Bank, 2022). Ces divers climats illustrent la richesse écologique du Burundi et influencent directement les capacités de vermicompostage en fonction des conditions locales (MINEATU, 2016; FAO, 2019).

La présente étude a concerné les régions naturelles de Bugesera, Bututsi, Buyyenzi, Buyogoma, Kirimiro, Imbo, Moso et Mirwa représentant 72,72% des régions du pays. Douze individus de vers de terre ont été collectés dans chaque région en vue d'une diversité représentative des conditions écologiques locales.

2.1.1. Sites d'échantillonnage

Au total, 15 sites ont été échantillonnés dans des communes et provinces différentes du pays. L'échantillonnage a été fait aléatoirement avec succès sur huit sites tandis que sur les autres sites, nous n'avons pas pu avoir des échantillons. Les sites échantillonnés sans succès étaient: Nyange-Bushaza, Matana, Kirema, Rugari et Gisuru.

Les coordonnées géographiques de sites d'échantillonnage ont été prises à l'aide d'un GPS Gamin, Etex 10.

Les échantillons des vers de terre ont été transportés dans des sceaux en couleur verte (Figure 2) perforés des trous de 3-4 mm de diamètre au fond et à la face supérieure pour permettre l'aération. La couleur verte indique que les vers de terre fuient la lumière. Les sites sont représentés sur la Figure 1.

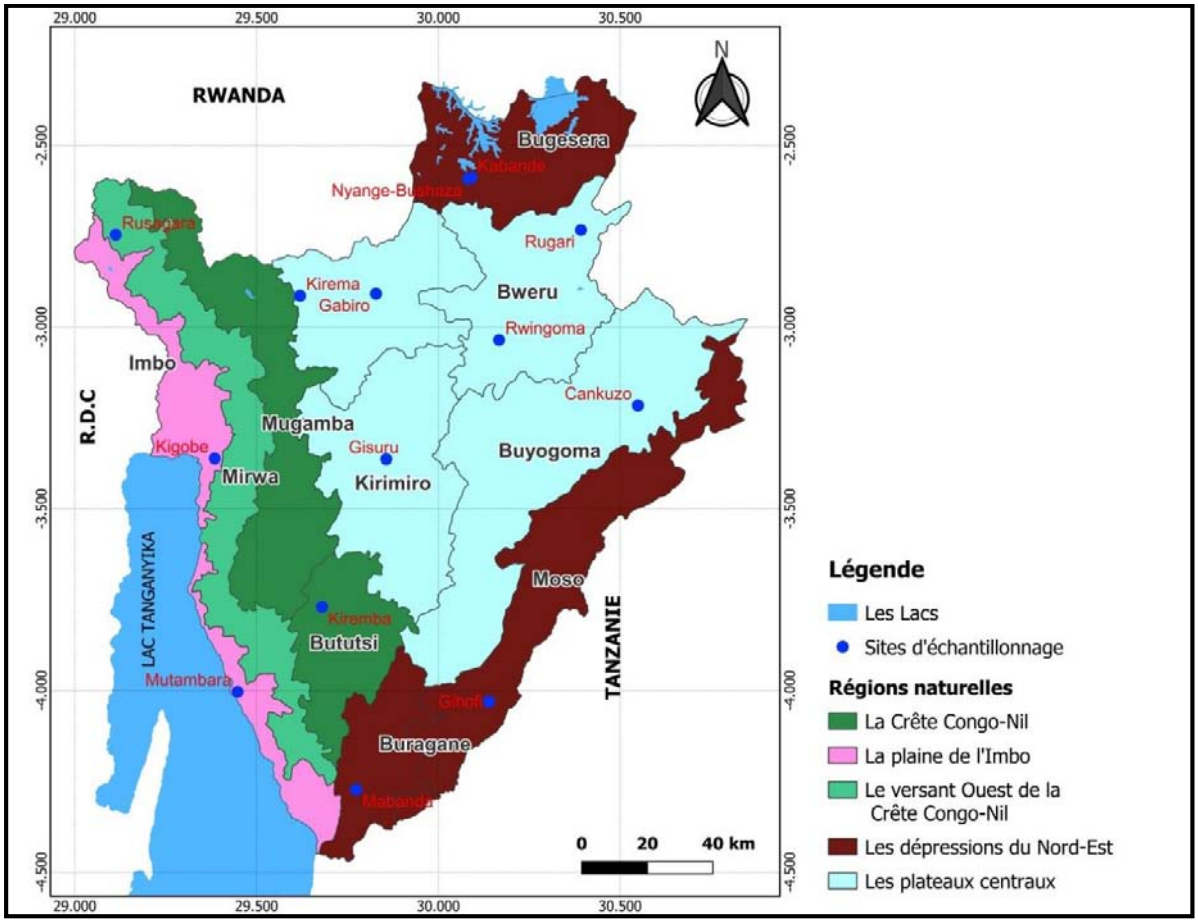


Figure 1: Localisation des sites d'échantillonnage

2.1.2. Echantillonnage et transport des échantillons

Au niveau de chaque site, des points d'échantillonnage ont été choisis au hasard dans un quadrant de 50 cm x 50 cm dans des endroits humides susceptibles d'abriter de la matière organique en décomposition (Butt & Grigoropoulou, 2010). Le sol à l'intérieur du quadrant a été creusé à l'aide d'une truelle jusqu'à environ 10 cm de profondeur. L'échantillonnage a été réalisé au mois de septembre 2023.

Les vers de terre adultes, c'est –à – dire présentant un clitellum bien développé (Figure 3) et choisis au hasard ont été extraits de la terre par tri manuel (Butt & Grigoropoulou, 2010). Puis, ils ont été transportés au laboratoire de Biologie de l'Ecole Normale Supérieure (ENS, Burundi). La température ambiante à l'intérieur du laboratoire était d'environ 27 °C.

Les vers ont été identifiés en considérant qu'ils vivaient dans le sol superficiel échantillonné, mais aussi en analysant leur taille et leur coloration tout au long du corps (Sharma & Garg ,2018).

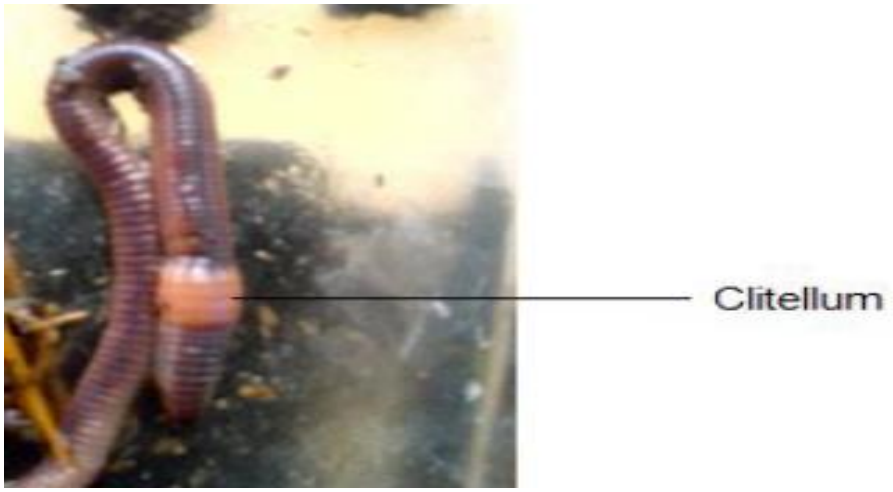


Figure 2: Ver de terre adulte montrant le clitellum



Figure 3: Sceaux pour le transport des échantillons de vers de terre

2.1.3. Préparation des déchets expérimentaux

Des échantillons (2 m^3) de déchets de canne à sucre et de palmier à huile ont été collectés. Des analyses préliminaires avaient montré qu'ils avaient une composition physico-chimique sensiblement différente les rendant appropriés pour tester les potentialités biologiques des vers de terre pour le vermicompostage (Bachrouch et al., 2019 ; Coulibaly et al., 2020).

Les déchets de canne à sucre, composés de 25 % de bagasse et 75 % d'écume, ont été collectés à la SOSUMO à Gihofi, province de Rutana. Les déchets de palmier à huile, constitués de 75 % de fibres et 25 % de rafles, provenaient des petites huileries de Rumonge.

Les déchets ont été pré-compostés pendant deux semaines avec un mélange de *Tithonia diversifolia*, restes d'amarante, laitues, pastèques (25 %), et du fumier de vache comme aliment pour les vers. De l'eau a été ajoutée jusqu'à 70 % de saturation, et les déchets ont été partiellement couverts avec une bâche pour favoriser le pré-compostage.

La température a été mesurée chaque semaine à l'aide d'un thermomètre de compost (figure 6). Le pré-compostage a été considéré comme terminé lorsque la température des déchets était descendue entre 27°C et 35°C, après la phase thermophile. Avant l'inoculation des vers de terre dans les boîtes expérimentales, les caractéristiques physico-chimiques des déchets ont été analysées pour vérifier leur toxicité potentielle. (Edwards & Bohlen, 1996).

Cela a été fait en tenant compte du fait que, étant des détritivores, les vers de terre peuvent être sensibles aux déchets riches en azote, ce qui peut entraîner leur mortalité.



Figure 4: Thermomètre de mesure de température de déchets de palmier à huile en fin de pré-compostage

2.2. Vermiculture au laboratoire.

Des boîtes en plastique de 350 ml ont été préparées pour l'élevage des vers de terre au laboratoire. Chaque boîte a été percée de trous (3-4 mm de diamètre) sur le fond pour éviter la stagnation de l'eau, et sur le dessus pour permettre l'aération (Figure 5). Les vers de terre ont été introduits dans les boîtes, puis placés dans un endroit sombre et recouverts d'un drap noir pour favoriser leur activité maximale.

Pendant toute la période de vermiculture, l'humidité du lit a été maintenue à environ 70-80% en ajoutant de l'eau lorsque nécessaire.

Les boîtes de vermiculture ont été surveillées tous les 3 jours pour vérifier l'activité des vers, leur survie et leur viabilité, ainsi que pour s'assurer qu'aucun animal nuisible n'y était présent (Coulibaly & Zoro Bi, 2010; Munroe, 2007).

L'expérience a été menée dans 48 boîtes, à raison de 6 boîtes par région et 3 boîtes pour les déchets de canne à sucre et 3 boîtes pour les déchets de palmier à huile. Les vers de terre issus de la même région étaient élevés deux par boîte, chacune étiquetée. L'expérience a duré 2 mois (Septembre et Novembre, 2024).

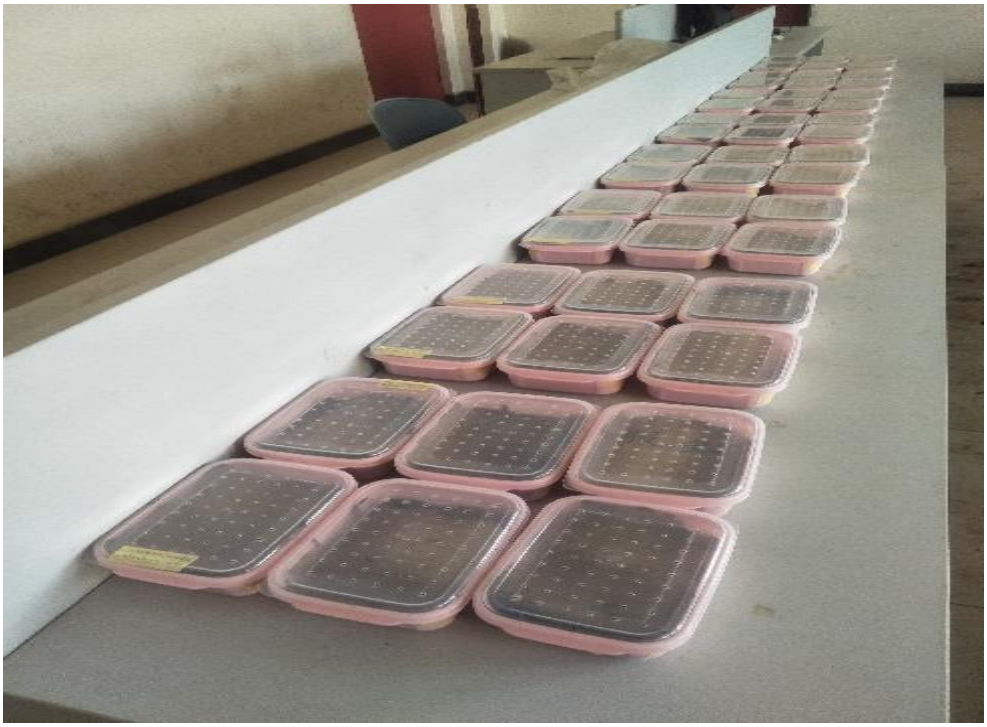


Figure 5: Boîtes utilisées dans l'expérience de vermiculture comparative au laboratoire, après introduction des déchets expérimentaux et des vers de terre et après étiquetage

2.2.1. Identification taxonomique

Pour chaque site d'échantillonnage après la vermiculture, trois vers adultes sur les 12 ont été sélectionnés au hasard et euthanasiés par immersion dans de l'éthanol à 30 %. Les spécimens ont ensuite été conservés dans des flacons hermétiquement fermés, contenant une solution de formaldéhyde à 40 % diluée à 5 % (Huang et al., 2007).

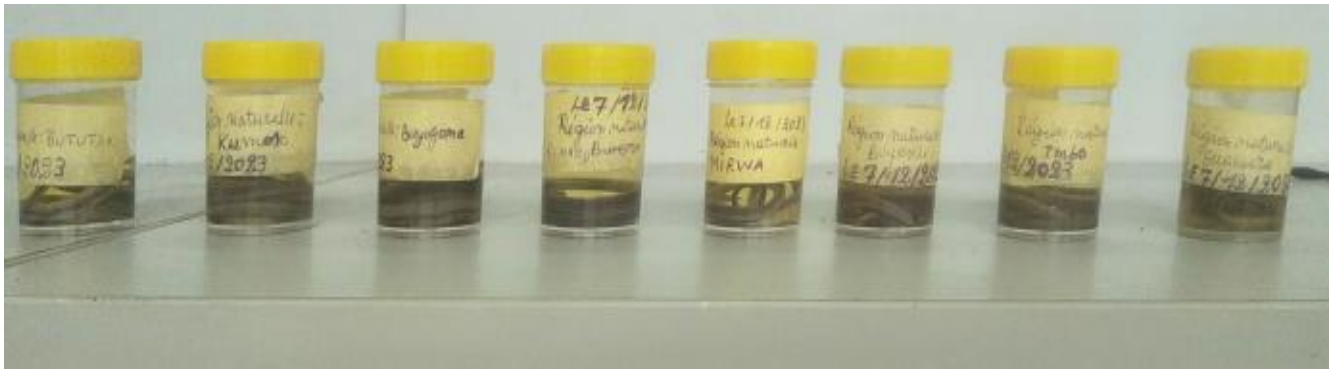


Figure 6: Spécimens des vers de terre conservés dans les flacons selon la région de provenance

L'identification taxonomique de chaque spécimen de ver de terre a été faite en se référant sur les 17 traits couramment utilisés (Blakemore, 2015).

Pour chaque spécimen, la masse corporelle a été mesurée au centième de gramme à l'aide d'une balance de poche professionnelle (CX-SERIES). La longueur du corps a été déterminée avec une règle graduée en millimètre ou un papier millimétré. La couleur du corps a été observée sous une loupe équipée d'un éclairage à LED (12 LED Plug-in desk-type/handheld dual-purpose magnifier).

La morphologie et l'anatomie des vers de terre ont été analysées sous un microscope stéréo (EUROMEX-HOLLAND, DZ. 5 040) avec un éclairage externe adapté. Nous avons compté le nombre total de segments, observé la forme du prostomium, la position et le nombre de pores génitaux dorsaux et ventraux, ainsi que le nombre de segments du clitellum. Nous avons également examiné la position et la forme du clitellum ainsi que la disposition, la taille et la forme des soies par segment (Domínguez, 2018; Suthar, 2007; Arockia, 2017).

Les spécimens ont ensuite été coupés à l'aide d'un microtome (LEICA RM2125RTS) pour examiner la disposition et la morphologie des organes internes (Marques et al., 2014).

Une dissection a également été réalisée pour étudier la disposition des prostates (Csuzdi & Zicsi, 2003).

Des coupes histologiques ont été réalisées à partir de microtomie pour explorer l'anatomie interne. Un spécimen par région naturelle a été disséqué et soumis à des coupes sagittales à l'aide d'un microtome rotatoire (LEICA RM2125 RTS, Figure 7a), suivant le protocole classique de microtomie animale (Bancroft & Gamble, 2008). Après coloration (kit Hématoxyline et éosine), séchage (TEC2500 water bac slide drayer, (Figure 7b) et montage (à l'aide d'euparal), les coupes ont été photographiées pour visualiser les caractéristiques anatomiques internes. Deux autres spécimens ont été conservés dans du formol au laboratoire.

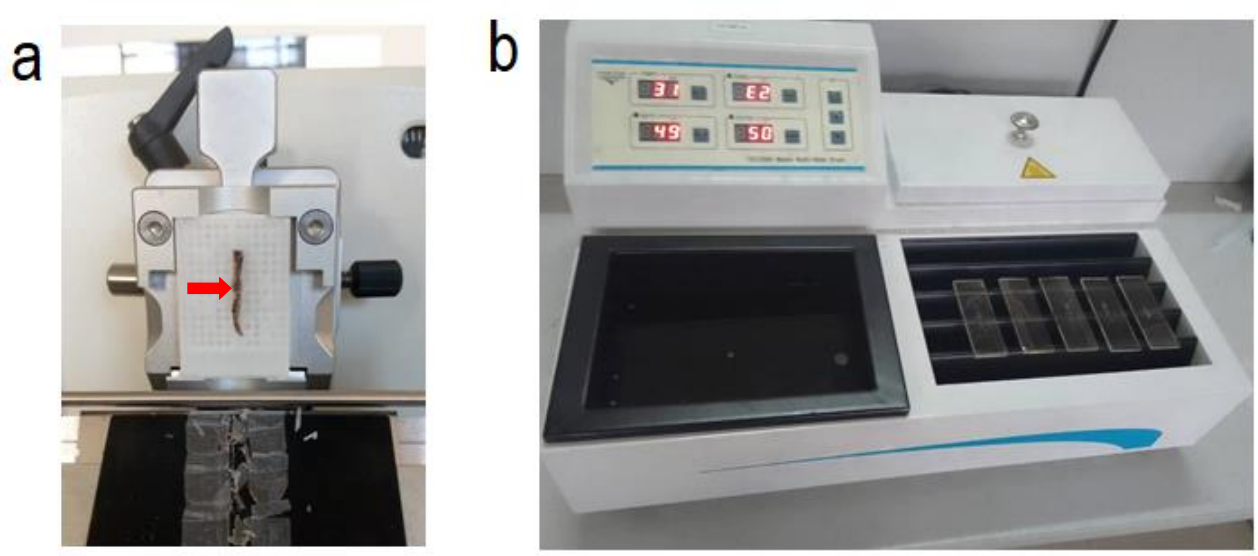


Figure 7: (a) Morceau antérieur d'un spécimen de ver de terre indiqué par une flèche (en rouge) inclus dans la paraffine et monté sur le microtome et en train d'être coupé et (b) coupes histologiques en train d'être séché à l'étuve à 50°C

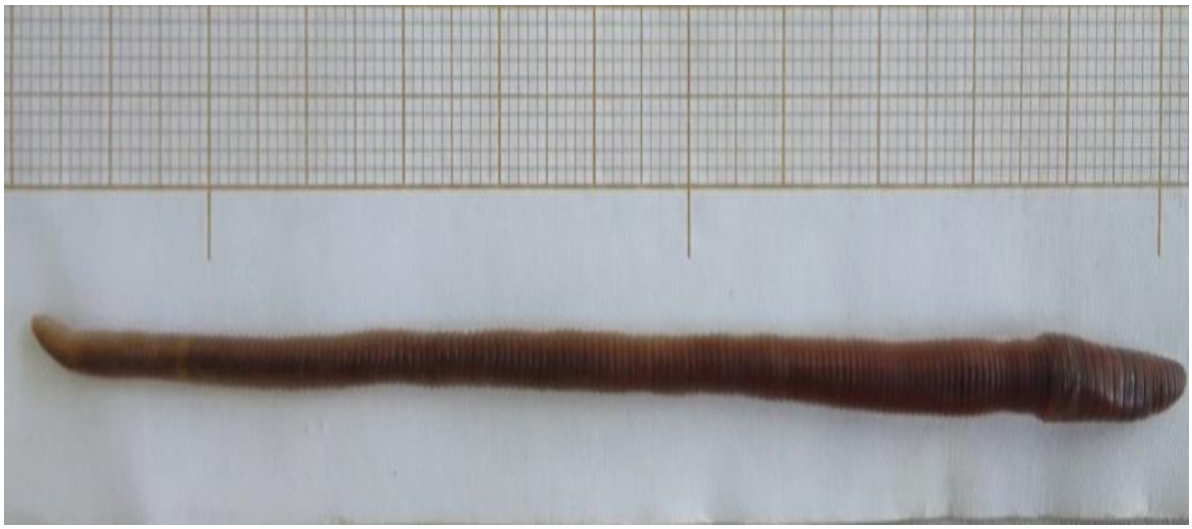


Figure 8: Vers de terre placé sur papier millimétré dans le sens de la longueur

2. 2.2. Détermination des paramètres biologiques

Les valeurs biologiques présentées dans les tableaux 1 et 2 ont été compilées à partir d'études scientifiques traitant de l'élevage de vers de terre en vermicompostage à 18-32 °C (Edwards et Bohlen, 1996 ; Domínguez & Edwards, 2004).

Les intervalles et moyennes ont été établis en analysant des données expérimentales de différentes sources (Sinha et al., 2010 ; Lazcano & Domínguez, 2011), en prenant en compte les variations dues aux conditions expérimentales et aux différences spécifiques entre espèces. Les espèces ont été classées en deux groupes : espèces tropicales et espèces tempérées, sur la base de leur distribution géographique naturelle et de leur adaptation thermique (Blouin et al., 2013).

Vers de terres tropicales rentables en vermicompostage : Les espèces tropicales présentées ici sont adaptées aux températures élevées et possèdent une croissance et une reproduction rapides en conditions de vermicompostage.

Tableau 1: Masse, survie, nombres de cocons et accroissement de la population des vers de terre de régions tropicales

Trait biologique	Intervalle	Moyenne	Références
Survie (%)	80 – 98	90	Suthar (2010); Kale & Bano (1986); Tripathi & Bhardwaj (2004); Garg & Kaushik (2005).
Nombre de cocons après 4 semaines	4 – 12	8	Domínguez et al. (2001); Reinecke & Viljoen (1990); Suthar (2007); Garg et al. (2006); Yadav & Garg (2011).
Accroissement de la population après 4 semaines (%)	50 – 130	90	Kale (1998); Suthar (2009); Domínguez & Edwards (2011); Singh et al. (2020).

Espèces tropicales couvertes :

Eudrilus eugeniae (Kinberg, 1867) : Ver africain de compost

Perionyx excavatus (Perrier, 1872) : Ver bleu indien

Vers de terre tempérés rentables en vermicompostage : Les espèces tempérées sont bien adaptées aux climats plus froids et présentent généralement une croissance plus lente que les espèces tropicales, mais elles sont couramment utilisées en vermicompostage industriel (Edwards & Arancon, 2004).

Tableau 2: Masse, survie, nombres de cocons et accroissement de la population des vers de terre de régions tempérées

Trait biologique	Intervalle	Moyenne	Références
Survie (%)	75 – 95	85	Edwards & Bohlen (1996); Domínguez et al. (2001); Suthar (2007).
Nombre de cocons après 4 semaines	3 – 10	6.5	Reinecke & Viljoen (1990); Garg et al. (2006); Yadav & Garg (2011).
Accroissement de la population après 4 semaines (%)	40 – 100	70	Domínguez & Edwards (2011); Singh et al. (2020).

Espèces tempérées couvertes :

Eisenia fetida (Savigny, 1826) : Ver du fumier

Dendrobaena veneta (Rosa, 1886) : Ver européen de compost

Ces données permettent d'orienter le choix des espèces en fonction des conditions climatiques et des objectifs de vermicompostage. Pour une rentabilité optimale, les espèces tropicales sont plus adaptées aux températures élevées et aux cycles courts de production, tandis que les espèces tempérées sont plus utilisées dans les systèmes de production continue en climat modéré.

La masse moyenne standard des vers de terre élevés en vermiculture varie en fonction de l'espèce et des conditions environnementales. Voici quelques références :

Eisenia fetida (espèce tempérée) : généralement 0,5 à 1,5 g par individu adulte (Edwards et Bohlen, 1996).

Eudrilus eugeniae (espèce tropicale) : entre 1,5 et 3 g par adulte (Domínguez & Edwards, 2011).

Perionyx excavatus (espèce tropicale) : environ 0,8 à 2 g par adulte (Suthar, 2007).

Lampito mauritii (espèce tropicale) : peut atteindre 2 à 5 g (Kale, 1998).

La masse dépend fortement de la qualité du substrat, de la température (idéalement 20-30°C), et du taux d'humidité (environ 70-80%).

En vermiculture, des vers bien nourris sur des substrats riches (fumier, déchets organiques bien compostés) peuvent atteindre la limite supérieure de leur masse moyenne (Domínguez & Edwards, 2011).

2.2.3. Identification morphologique et anatomique

- **Identification morphologique**

Une série de caractéristiques morphologiques a été comparée entre les spécimens de vers de terre représentant chaque région (Dupont, 2021). Ces caractéristiques comprennent les éléments suivant:

(i) Longueur et largeur du corps (mm),

(ii) Morphologie du prostomium,

(iii) Couleur des faces dorsale et ventrale du corps,

(iv) Position du clitellum,

(v) Arrangement des soies,

(vi) Nombres de pores dorsaux,

(vii) Positions de pores génitaux (femelle et mâle),

(viii) Position de la prostate.

2.3. Analyse de compatibilité biologique

Les données biologiques concernant la masse corporelle, la survie et l'accroissement de la population des vers de terre ont été collectées

2.3.1. Détermination de la masse corporelle

La masse corporelle a été mesurée à l'aide d'une microbalance, avec une précision de 1/100 de g. Cette mesure a été effectuée pour chaque boîte dans toutes les régions après 4 semaines d'élevage. Par la suite, tous les 15 jours jusqu'à la quatrième semaine, les vers de terre adultes ont été nettoyés, pesés, et le poids moyen par boîte calculé. Le gain moyen de poids (g) a été déterminé en soustrayant la masse finale de la masse initiale. La formule utilisée était la suivante:

$$GMP = mfMoy - miMoy$$

Où,

GMP = variation de poids

mf = masse finale

mi = masse initiale

2.3.2. Détermination du taux de survie.

Tous les deux semaines, jusqu'à la quatrième semaine, le taux (%) de survie a été calculé séparément pour les adultes et pour les juvéniles. Il a été calculé comme la fraction en (%) que représente le nombre de vers de terre présents sur les deux introduits. Il indique le nombre de vers de terre ayant survécu après 4 semaines d'incubation par rapport au nombre initial de vers de terre mis dans chaque boîte pour chaque analyse. La survie a été calculée suivant la formule :

TS = % (Nf-Ni) /Ni

Où,

TS = Taux de survie exprimé en pourcentage

N*i* = Nombre initial de vers de terre mis dans chaque boite

Nf = Nombre de vers de terre restant après la mortalité

2.3.3. Détermination du nombre de cocons.

Toutes les deux semaines, jusqu'à la quatrième semaine, le nombre de cocons par ver de terre adulte a été déterminé pour chaque boîte sur les deux types de déchets étudiés. Le calcul a été effectué en divisant respectivement le nombre total de cocons.

2.3.4. Détermination de l'accroissement de la population

De la quatrième semaine jusqu'à la sixième semaine, l'accroissement de la population (%) a été calculé à l'aide de la formule suivante : R = % (Ni-No) /No

Où,
R = Accroissement de la population
Ni = population finale après 4 semaines d'élevage
No = population initiale

2.4. Analyses physico-chimiques pendant la vermiculture

La température ambiante a été mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique. Le pH, la conductivité électrique (CE), la salinité, le total des solides dissous (TDS) et les chlorures dans les déchets ont été mesurés avec un appareil multiparamétrique Palintest (SKW500) après solubilisation dans de l'eau distillée.

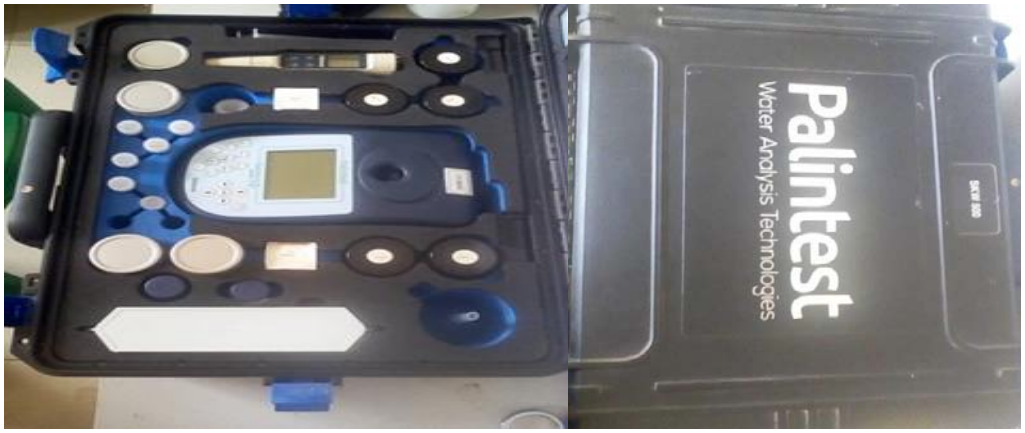


Figure 9: Appareil multiparamétrique pour analyses physico-chimiques

2.5. Analyse physico-chimiques et toxicologique des vermicomposts

Les caractéristiques physicochimiques et toxicologiques des vermicomposts obtenus avec *E. eugeniae* ont été analysées après son introduction dans des bacs à flux continue (Figure 10).



Figure 10: Bacs de vermicompostage avec vermicompost mature

2.6. Analyses statistiques des données

Nous avons comparé les deux types de déchets industriels en termes de masse corporelle, survie, nombre de cocons et accroissement de la population sur DCS et DPH, à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA). La moyenne de la masse corporelle, la survie, le nombre de cocons et l'accroissement de la population sur DCS et DPH, a été comparé pour s'assurer de l'homogénéité des variances. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R, version 4.2.0 (R Core Team, 2022).

CHAPITRE 3 : RESULTATS

3.1. Identification morphologique et anatomique des vers de terre

3.1.1. Morphologie

Au total, 24 spécimens de vers de terre provenant des 8 régions naturelles échantillonnées du pays ont été examinés.

Les résultats d'analyses morphologiques et anatomiques sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3: Caractéristiques morphologiques détaillés des spécimens de vers de terre examinés, par région naturelle

Traits morphologiques	**Région naturelles**							
	Imbo	Kumoso	Bututsi	Buyogoma	Bugesera	Buyenzi	Mirwa	Kirimiro
Couleur dorsale	Brune avec éclat vert irisé	Brune	Brune avec éclat vert irisé	Brune	Brune avec éclat vert irisé	Brune avec éclat vert irisé	Brune avec éclat vert irisé	Brune avec éclat vert irisé
Couleur ventrale	Brune claire	Brune claire	Brune claire	Brune claire	Brune claire	Brune claire	Brune claire	Brune claire
Longueur moy. (mm)	138,50	166,60	165,70	162,40	130,40	130,20	155,2	164,50mm

Traits morphologiques	**Région naturelles**							
	Imbo	Kumoso	Bututsi	Buyogoma	Bugesera	Buyenzi	Mirwa	Kirimiro
Nombre de segments	165	193	175	173	183	155	167	172
Prostomium	épilobique fermé	épilobique fermé	épilobique fermé	épilobique ouvert	épilobique fermé	épilobique fermé	épilobique fermé	épilobique fermé
Masse (g)	1,32	1,65	1,76	1,23	1,25	2,24	1,53	1,62
Segments sur clitellum	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)	5 (14-18)
Position des Pores males	Au 17 ème segment	17-18	17	17	17	17	17	17
Position des pores femelles	Au 14 ème segment	14	14	14	14	14	14	14
No.de pores males	2	2	2	2	2	2	2	2
No.de pores	2	2	2	2	2	2	2	2

Traits morphologiques	**Région naturelles**							
	Imbo	Kumoso	Bututsi	Buyogoma	Bugesera	Buyenzi	Mirwa	Kirimiro
femelles								
No. de pores dorsaux	0	0	0	0	0	0	0	0
Paires de soies	4	4	4	4	4	4	4	4
Forme des soies	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde	sigmoïde

Les analyses morphologiques ont révélé que les vers de terre étudiés présentent des similitudes, mais aussi quelques différences morphologiques et anatomiques.

Ces différences morphologiques et anatomiques permettent de les répartir en trois groupes de vers dont une première espèce, *E. eugenia*, représentée par les vers de terre en provenance de Bugesera, Bututsi, Buyenzi, Imbo et Mirwa ; une deuxième morpho-espèce (morpho - espèce 2) représentée par les vers de terre originaires de la région Kumoso ; une troisième morpho-espèce (morpho-espèce 3) représentée par les vers de terre de Buyogoma.

Les trois groupes présentent beaucoup de ressemblances (figures 11-13). Ils se distinguent au niveau de l'éclat de la couleur du corps, la morphologie du prostomium, la position des pores génitaux et celle de la prostate. Voici leur caractérisation **:**

• Groupe 1 : Couleur sur la face dorsale brune avec éclat vert irisé ; prostomium épilobique fermé, Clitellum en position xiii-xviii, prostate en position xvi-xx (Figures 13 & 14, tableau 7),

• Groupe 2 : Couleur sur la face dorsale brune sans éclat vert irisé ; prostomium épilobique fermé, Clitellum en position xiii-xviii, prostate en position xvii-xxv (Figures 12 & 14, tableau 7),

• Groupe 3 : Couleur sur la face dorsale brune sans éclat vert irisé ; prostomium épilobique ouvert, Clitellum en position xiii-xviii, prostate en position xvi-xxi (figures 11 & 14, tableau 7).

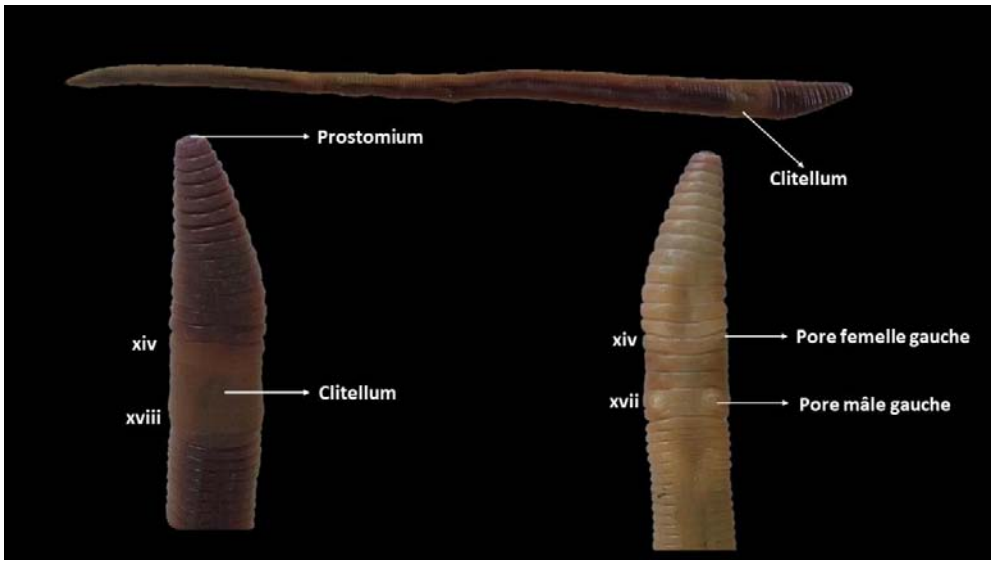


Figure 11: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce d'un ver de terre identifié dans les régions Bugesera, Bututsi, Buyenzi, Imbo et Mirwa.

(En haut : vue dorsale de tout le corps. En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure)

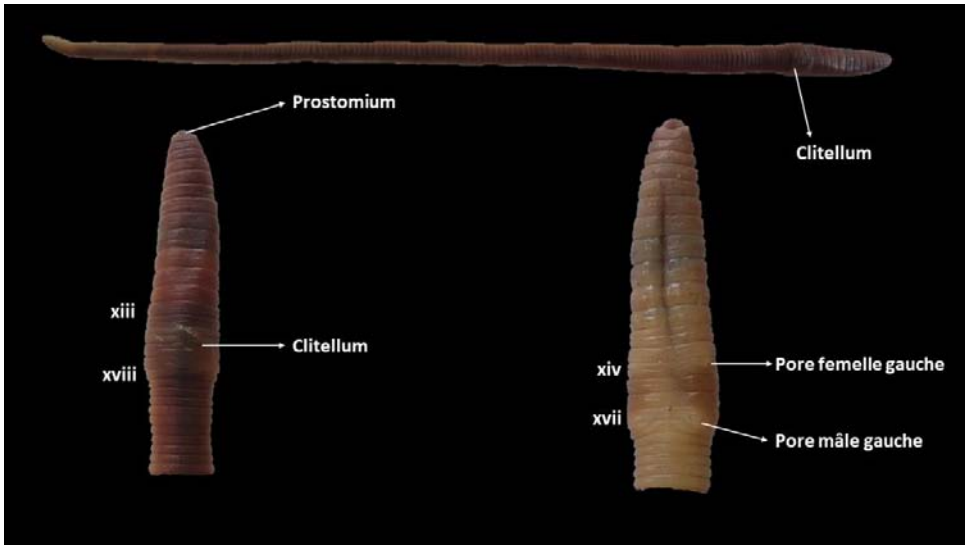


Figure 12: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce d'un ver de terre identifié dans la région de Moso. En haut : vue dorsale de tout le corps.

(En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure)

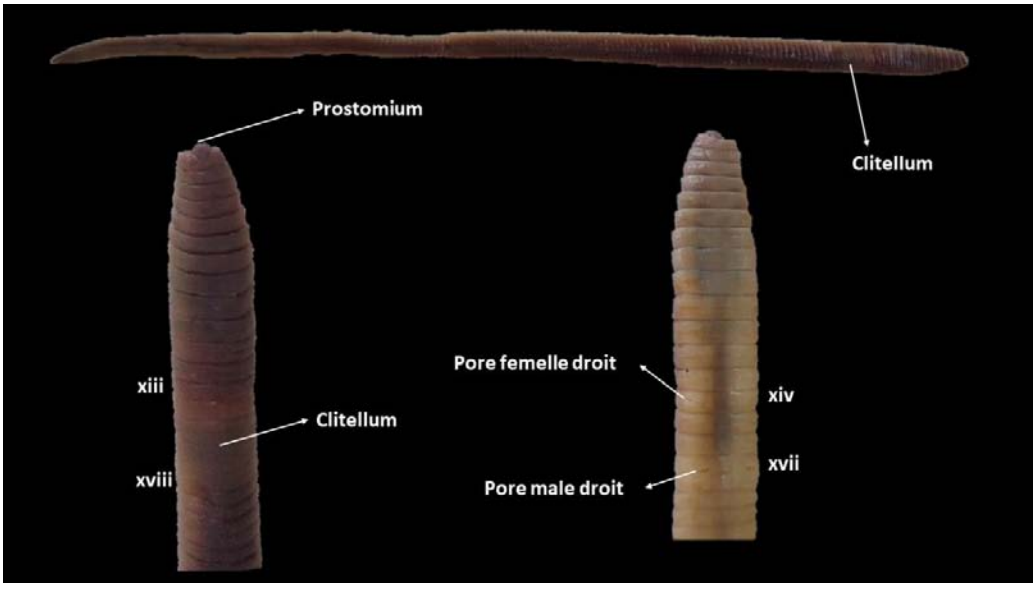


Figure 13: Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce de ver de terre identifié dans la région de Buyogoma. (En haut : vue dorsale de tout le corps.

En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure)

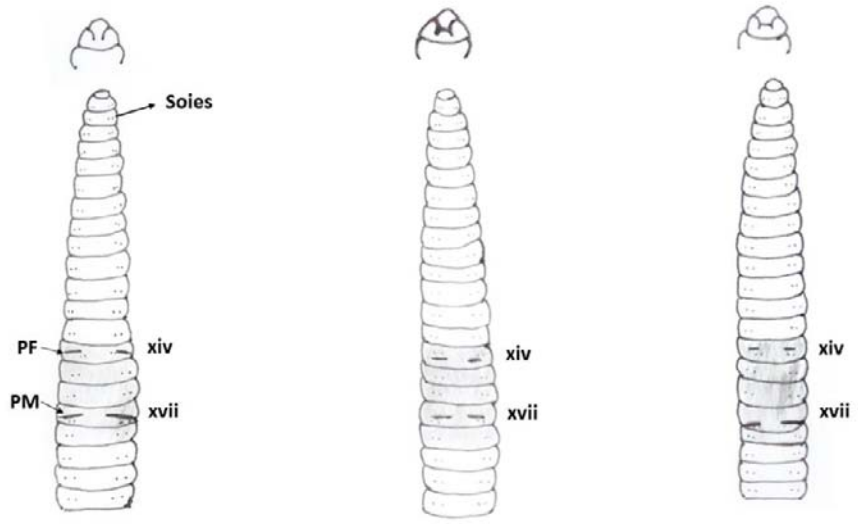


Figure 14: Diagrammes de la partie antérieure du corps montrant les caractéristiques des espèces de ver de terre identifiées gauche: Groupe 3;au milieu: Groupe 1;à droite: Groupe 2

Ces dessins ont été produits à travers l'observation de la forme du prostomium, de la forme du corps des vers de terre sous le stéréo-microscope. En haut : diagramme de vues dorsales du prostomium. En bas diagramme des vues ventrales de la région antérieure du corps. PF : pore femelle ; PM : pore mâle.

3.2 Anatomie

La dissection et l'observation sous le stéréo-microscope a permis d'avoir des données sur l'anatomie interne des vers de terre étudiés, en particulier sur la forme de la section du corps et sur la position de la prostate ou glande prostatique. Les analyses anatomiques ont montré que tous les spécimens examines avaient une section de corps cylindrique et aplatie a la face ventrale. Elles ont aussi révélé que chez *E. eugeniae*, la prostate (Figures 15 & 16) est en position xvi-xx, alors que cet organe est en position xvii-xxv chez la morpho - espèce 2 et en position xvi-xxi chez la morpho espèce 3.

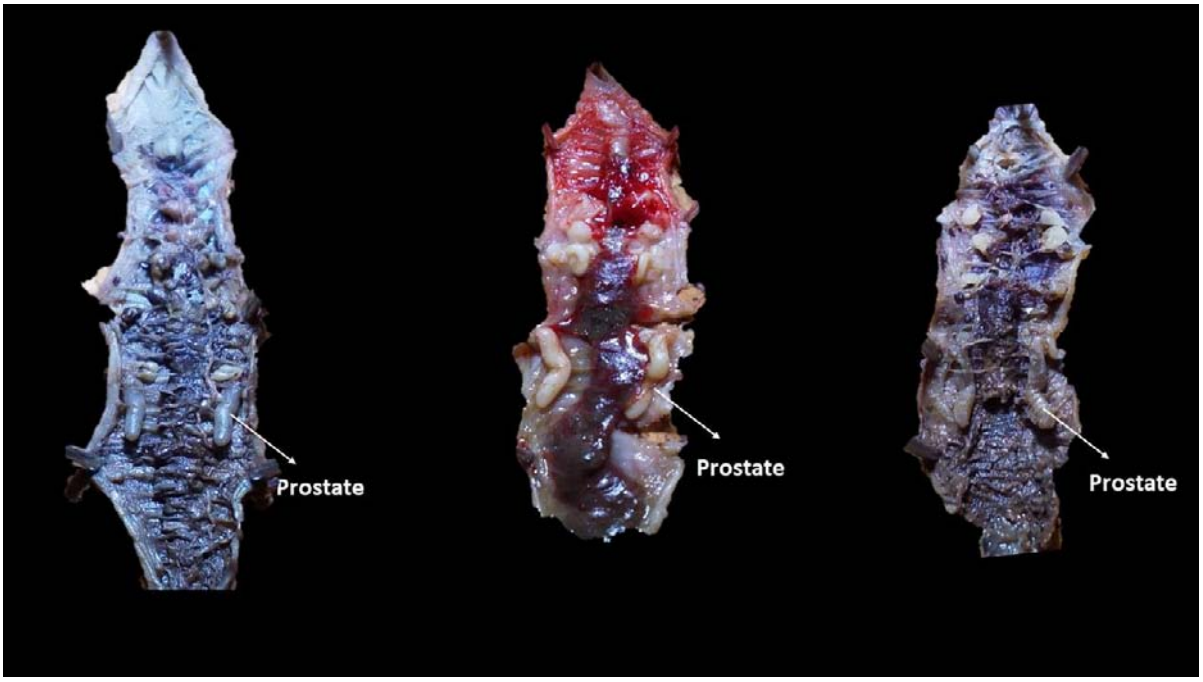


Figure 15: Position de la prostate chez les espèces de ver de terre identifiées: à gauche : morpho-espèce 3;au milieu : *Edrilus eugeniae* et à droite: morpho-espèce 2

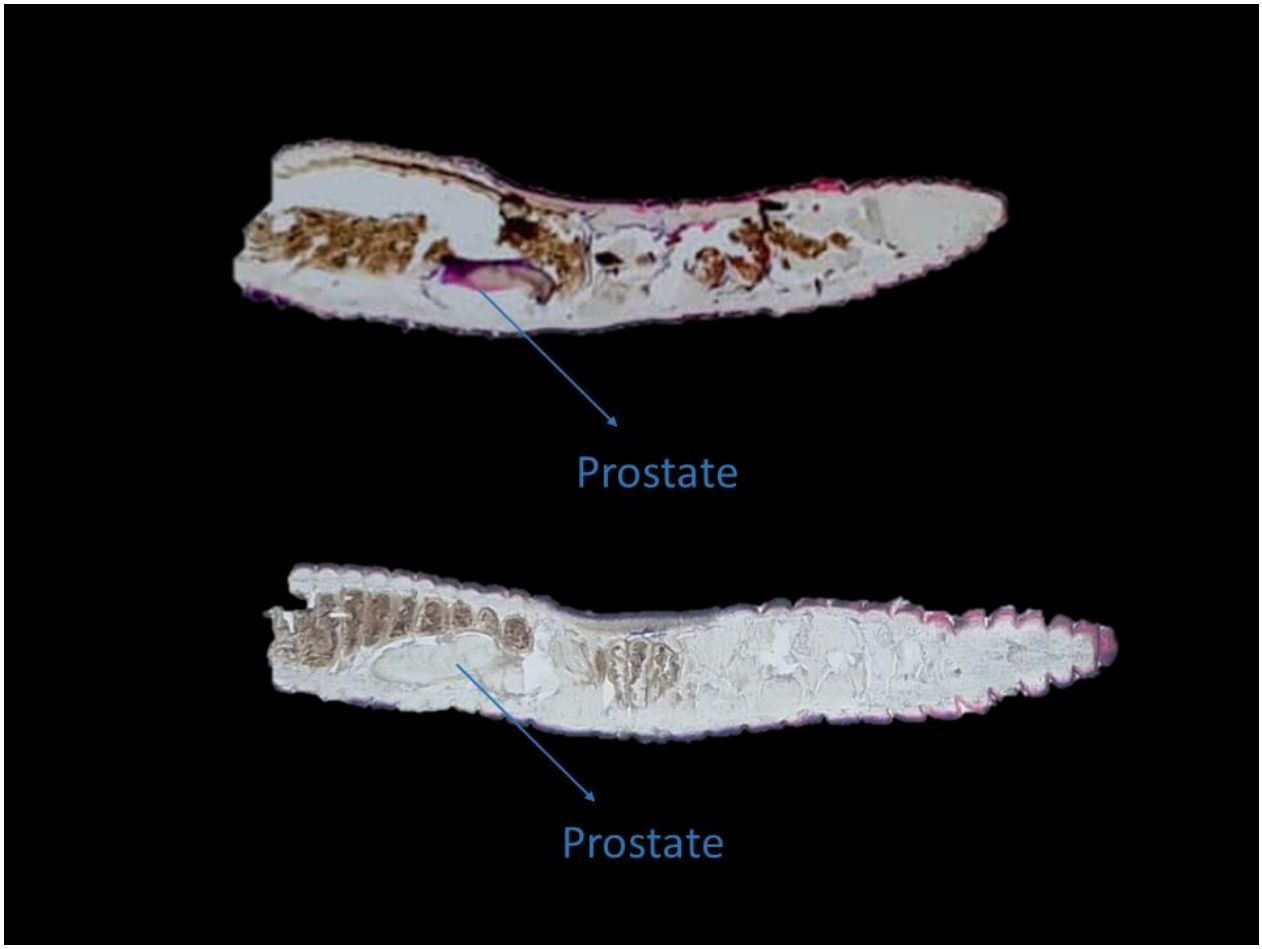


Figure 16: Coupes sagittales montrant la différence de la prostate entre *E. eugeniae* et la morpho-espèce 2

3.3. Survie, masse corporelle et reproduction des vers de terre en vermiculture

En vermiculture sur déchets de canne à sucre, le taux de survie des vers de terre pour *E. eugeniae a* été de 100%.

E. eugeniae en culture sur DCS montre une masse moyenne initiale variant de 1,24 à 1,47g, avec une moyenne de 1,35. La masse à 4 semaines de vermiculture a varié de 1,28 à 1,57g avec une moyenne de 1,3g. Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines a varié de 2,89 à 5,22 avec la moyenne de 4,06. L'accroissement de la population à 4 semaines a varié de 134,81 à 254,08% avec une moyenne de 194,44%. L'accroissement à 6 semaines a varié de 727,73 à 1200,05%, avec une moyenne de 963,89%.

En culture sur déchets de palmier à huile (DPH), le taux de survie pour *E. eugeniae* a été de 83,33%, sa masse initiale a variée de 1,24 à 1,47g, avec une moyenne de 1,35g.

La masse à 4 semaines a varié de 0.94 à 1,29g, avec la moyenne de 1,12g. Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines a varié de 1,15 à 2,25, avec une moyenne de 1,170. L'accroissement de la population à 4 semaines a varié de 142,79 à 263,88%, avec une moyenne de 203,33. L'accroissement de la population à 6 semaines a quant à lui varié de 150 à 185,68%, avec la moyenne de 296,67.

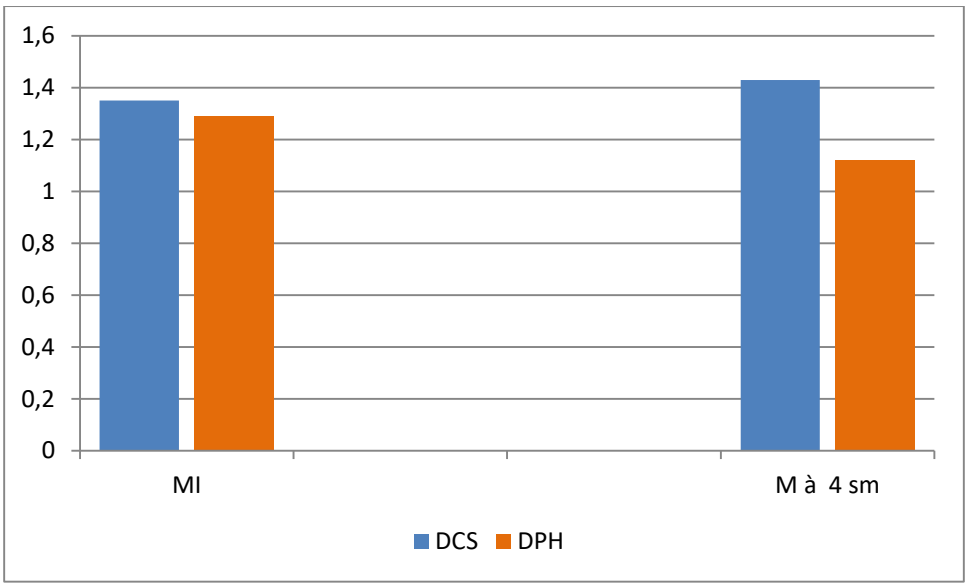


Figure 17: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez *Edrilus eugeniae*, selon le type de déchet (DCS : Déchets de canne à sucre; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI : Masse initiale (g); M à 4 sm: Masse à 4 semaines (g))

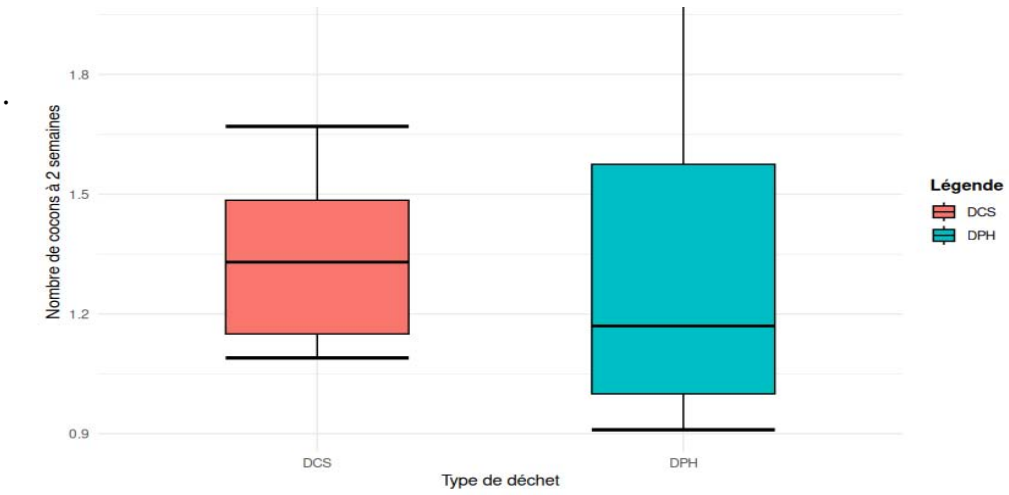


Figure 18: Comparaison du nombre de cocons chez *Edrilus eugeniae* à 2 semaines selon le type de déchet

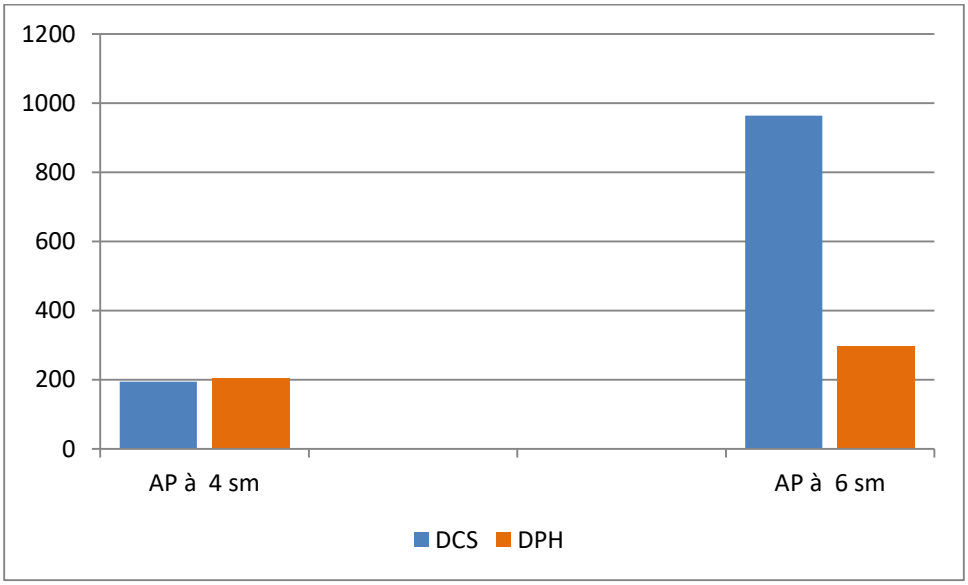


Figure 19: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez *Edrilus eugeniae*, selon le type de déchet (AP à 4 sm : Accroissement de la population à 4 semaines (%) ; AP à 6 sm: Accroissement de la population à 6 semaines (%))

Pour la morpho - espèce 2, le taux de survie a été de 100%. Les résultats obtenus ont révélé qu'en culture sur DCS, la masse moyenne initiale était en moyenne de 1,12g et la masse à 4 semaines était en moyenne de 1,17g. Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines était en moyenne de 5,67. L'accroissement de la population à 4 et 6 semaines était respectivement de 283,33 et 1916,67%.

En culture sur DPH, le taux de survie a été de 100 %, les résultats obtenus ont révélé que la masse moyenne initiale était en moyenne de 0,94g et la masse à 4 semaines était de 1,02g.

Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines était en moyenne de 0,67. L'accroissement de la population à 4 et 6 semaines était respectivement de 400 et 133,33%.

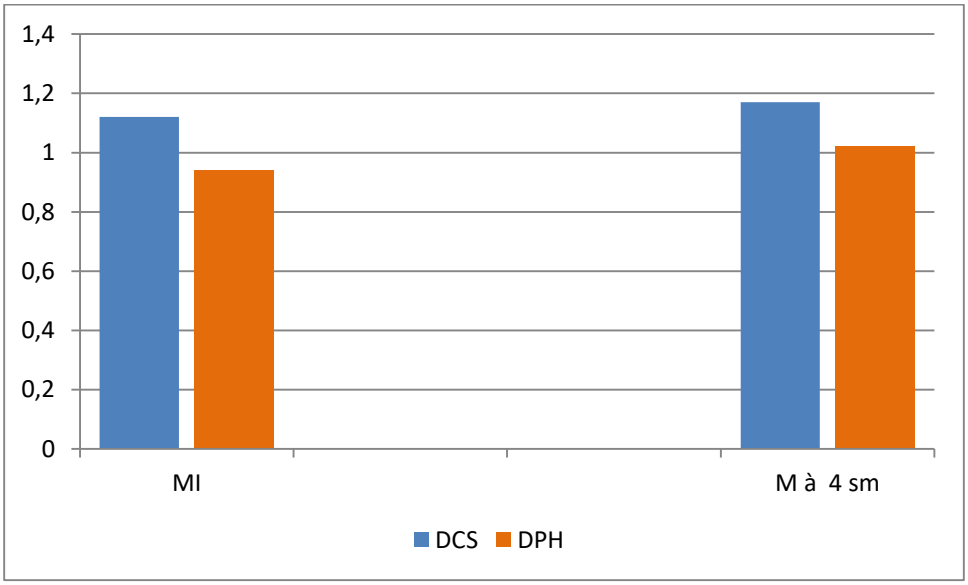


Figure 20: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez la morpho-espèce 2;selon le type de déchets (DCS : Déchets de canne à sucre; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI: Masse initiale(g) ; Masse à 4 sm : Masse à 4 semaines (g))

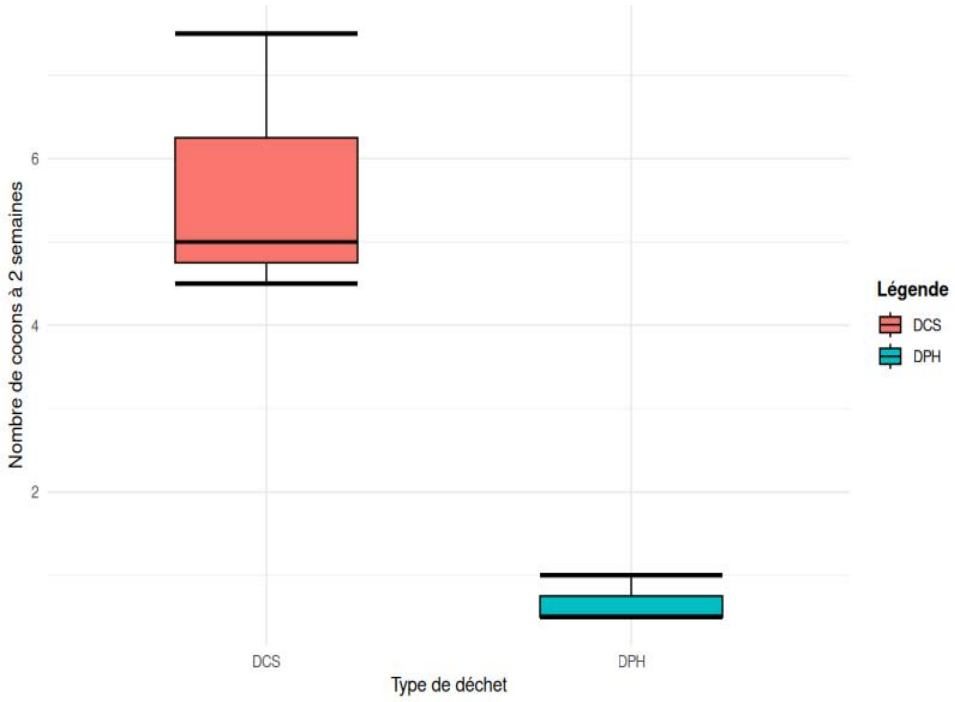


Figure 21: Comparaison du nombre de cocons chez la morpho - espèce 2 à 2 semaines, selon le type de déchet

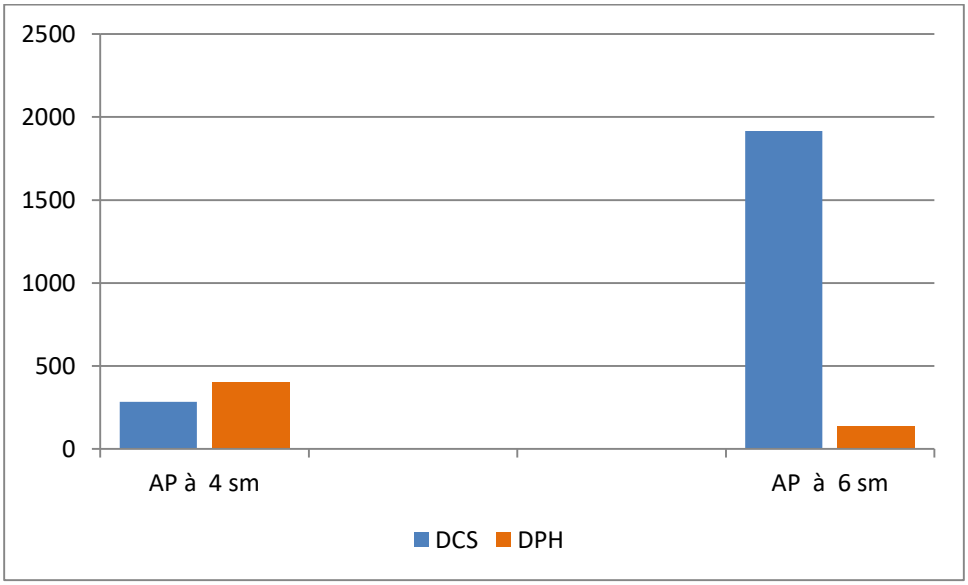


Figure 22: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez la morpho - espèce 3, selon le type de déchet (AP à 4 sm : Accroissement de la population à 4 semaines (%) ; AP à 6 sm: Accroissement de la population à 6 semaines (%))

Pour la morpho - espèce 3, le taux de survie a été de 100%.les résultats obtenus ont révélé qu'en culture sur DCS, la masse moyenne initiale était en moyenne de 1,35 g et la masse à 4 semaines était en moyenne de 1,63 g.

Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines était en moyenne de 3,00. L'accroissement de la population à 4 et 6 semaines était respectivement de 66,67 et 700,00%.

En culture sur DPH, le taux de survie a été de 100 %, les résultats obtenus ont révélé que la masse moyenne initiale était en moyenne de 0,98g et la masse à 4 semaines était de 0,74g. Le nombre de cocons par adulte à 2 semaines était en moyenne de 1,83. L'accroissement de la population à 4 et 6 semaines était respectivement de 66,67 et 133,33%.

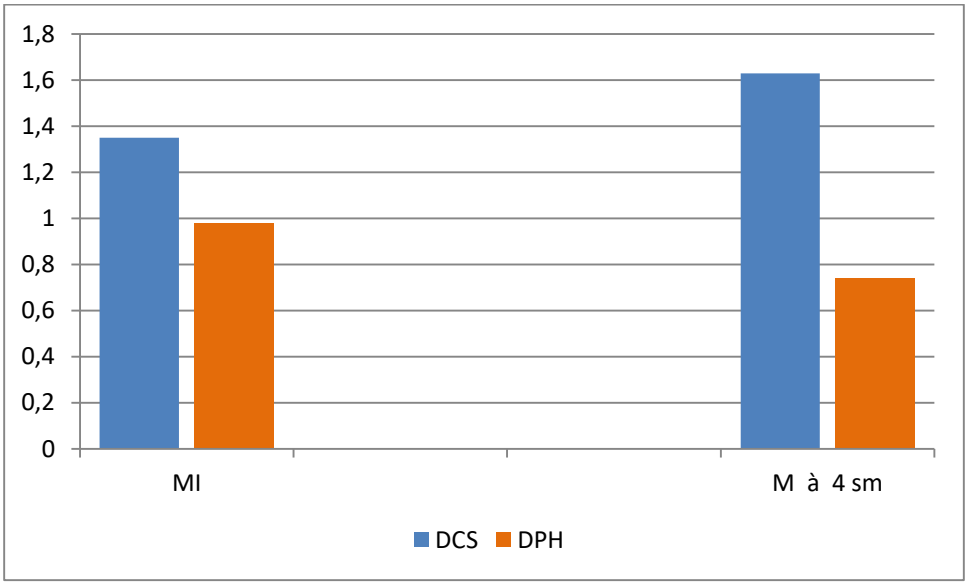


Figure 23: Masse moyenne initiale et masse à 4 semaines chez la morpho-espèce 3, selon le type de déchets (DCS : Déchets de canne à sucre ; DPH : Déchets de palmier à huile ; MI : Masse initiale (g); M à 4 sm: Masse à 4 semaines (g))

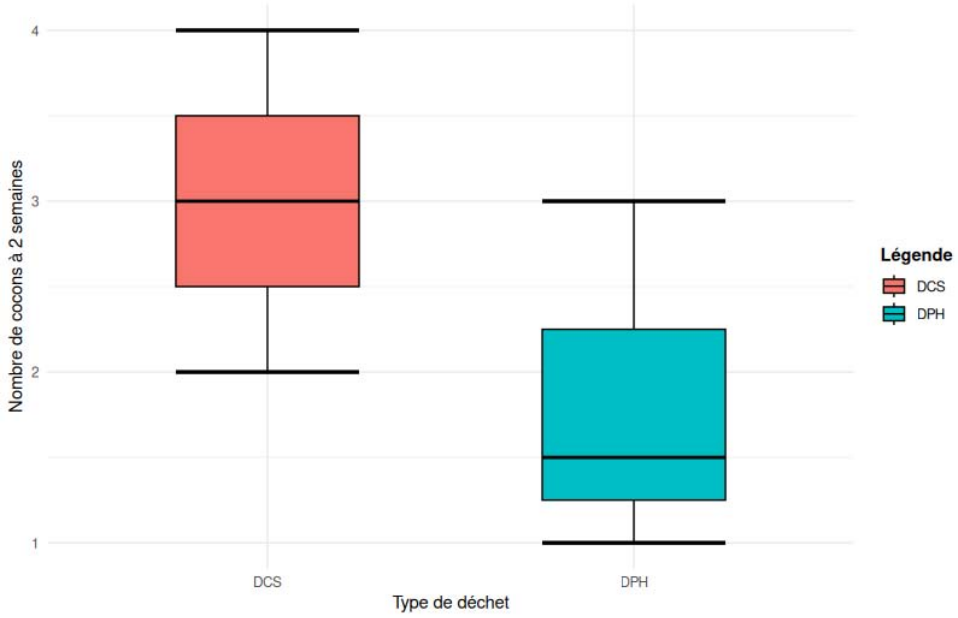


Figure 24: Comparaison du nombre de cocons chez la morpho-espèce 3 à 2 semaines, selon le type de déchet

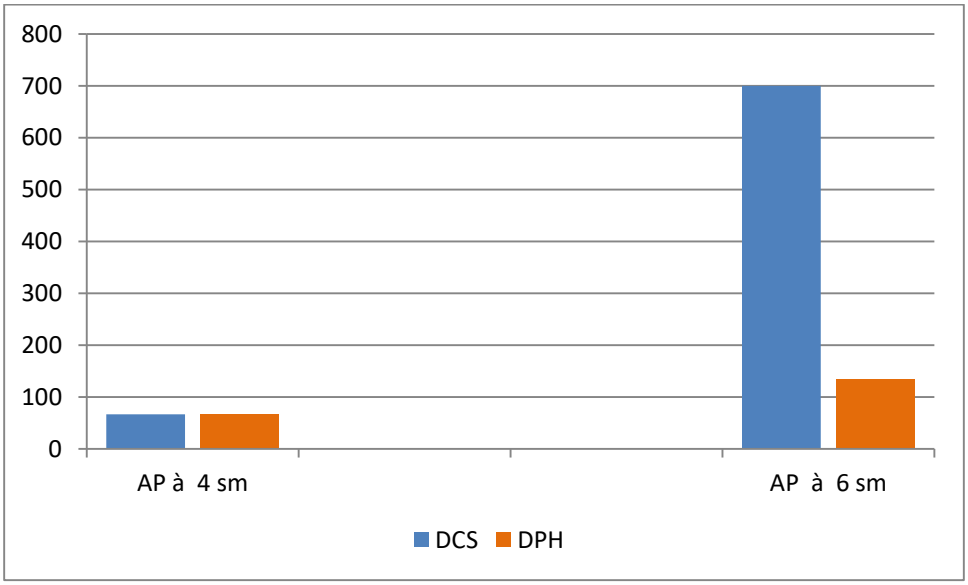


Figure 25: Accroissement de la population à 4 semaines et à 6 semaines chez la morpho-espèce 3, selon le type de déchet (AP à 4 sm: Accroissement de la population à 4 semaines (%); AP à 6 sm : Accroissement de la population à 6 semaines (%))

3.4. Changement physico-chimique des substrats en présence des vers de terre

Pendant la culture de la morpho espèce 1, les paramètres physicochimiques dans le substrat fait de DCS ont varié comme suit : pH de 6,77 à 8,30 ; TDS : de 1,09 à 8,42 ppm, Salinité : de 654 à 591 ppm, CE : de 15,32 à 11,8 µS/cm, Chlorures : 469,7 à 360,51 g/L. Pour DPH, ils ont varié comme suit : pH de 6,75 à 8,71 ; TDS : de 1.72 à 1.85 ppm ; Salinité : de 1,27 à 1,35 ppm, CE : de 2440 à 2600 µS/cm ; Chlorures : de 0,775 à 0,824 g/L. Ces résultats montrent que la présence des vers de terre a entraîné des modifications notables des paramètres physico-chimiques étudiés compatibles avec une bonne une activité microbienne et partant avec vermicompostage.

3.5. Composition physico-chimiques des vermicomposts produits

Les analyses physico-chimiques des vermicomposts obtenus à partir des déchets de canne à sucre, des déchets de palmier à huile avec la morpho espèce 1 ubiquiste présentaient les teneurs suivantes : Macronutriments : N (1,04 - 0,96 3%), P (2,49 % - 0,991), et K (0,762 -0,802 %) ; Oligo-nutriments : Fe (1,8-0,423 %), Cu (52,7-21,6 mg/kg), Ni (16,6-2,57 mg/kg), Zn (192-108 mg/kg), Co (< 5 mg/kg) et Mn (0,46-0,098 mg/kg).

Métaux lourds : Cu (52,7-21,6 mg/kg), Pb (19,5 - 0,374 mg/kg), Ni (16,6 - 2,57 mg/kg), Zn (192 -108 mg/kg), Co (< 5 mg/kg), Cd (< 0,8 mg/kg) et Mn (0,46 - 0,098 mg/kg).

Pour les macronutriments (N, P, K), les résultats montrent que vermicomposts issus des déchets de palmier à huile (VDPH) présentent la teneur la plus élevée en azote, atteignant 9,063%, ce qui en fait une ressource particulièrement enrichissante pour le sol. Le vermicompost à base de déchets de canne à sucre (VDCS) se distingue par des teneurs relativement élevées en phosphore (2,49 %) et en potassium (0,762 %). Les vermicomposts issus du fumier de vache et du contenu ruménal affichent des niveaux modérés en N, P et K, tout en restant dans les limites définies par les normes AFNOR NF U44-051. Les analyses toxicologiques ont montré des concentrations faibles en métaux lourds tels que le plomb, le nickel et le cadmium, variant de ≤ 0,8 à 625 mg/kg**.**

Le tableau 5 contient valeurs obtenues pour chaque paramètre et types de vermicompost analysés.

Tableau 4: Synthèse des résultats d'analyses physico-chimiques de quatre différents types de vermicomposts étudiés

Analyses	Vermicompost				
	Vermicompost à base de Déchets de canne à sucre	Vermicompost à base de fumier de vache	Vermicompost à base de Déchets de palmier à huile	Vermicompost à base de contenu ruménal	Vermicompost à base de Déchets de banane
Azote total (%N)	1,04	0,879	0,963	0,633	1,16
Carbone org (%C)	7,92	6,3	6,52	7,52	8,76
Rapport C/N	7,62	7,17	6,77	11,9	7,55
Phosphore total(%P2O 5)	2,49	1,26	0,991	1,32	1,88
Potassium (%K_20)	0,762	0,971	0,802	0,759	0,871
Sodium (%Na_20)	0,087	0,19	0,135	0,127	0,238
Calcium (%CaO)	4,71	1,97	1,81	2,41	1,52
Magnésium (%MgO)	1,24	1,027	0,978	0,802	0,596
Fer (%Fe)	1,8	0,38	0,423	0,545	0,469
Manganèse (%Mn)	0,46	0,11	0,098	0,117	0,099
Cuivre (mg/kg)	52,7	17,6	21,6	22,4	70,5
Zinc (mg/kg)	192	92,6	108	96,3	57,6
Cobalt (mg/kg)	<5	<5	<5	<5	<5
Nickel (mg/kg)	16,6	1,4	2,57	2,82	<2,5
Cadmium (mg/kg)	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8
Plomb (mg/kg)	19,5	8,72	0,374	5,58	6,77

CHAPITRE 4. DISCUSSION

4.1. Identification des vers de terre

L'identification des espèces de vers de terre épigés collectées dans différentes régions naturelles du Burundi a révélé la présence d'une espèce bien connue *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), trouvée dans 75% des sites échantillonnés (Bugesera, Buyenzi, Bututsi, Imbo, Kirimiro et Mirwa), ainsi que deux autres morpho - espèces localisées respectivement dans les régions de Kumoso et de Buyogoma.

La présence d'*Eudrilus eugeniae* avec une occurrence (six régions naturelle) au Burundi est cohérente avec les observations faites en Afrique subsaharienne. Originaire d'Afrique tropicale, *E. eugeniae* est connue pour sa forte reproduction, sa croissance rapide et sa capacité à décomposer efficacement une large gamme de déchets organiques (Edwards et Bohlen, 1996). Selon Buhintahe (2022), en conditions favorables, un adulte *E. eugeniae* peut produire 1 à 3 cocons par semaine avec chacun 1 à 4 vermisseaux.

Les deux autres morpho - espèces identifiées n'ont pas pu être rattachées à des espèces déjà répertoriées bien qu'elles aient présentées des similitudes morphologiques et anatomiques avec *E. Eugeniae* .L'analyse des différences subtiles, notamment au niveau de la morphologie du prostomium, de la position de la prostate et de la coloration de la peau, suggère que ces morpho - espèces pourraient appartenir au même genre mais représenter des sous-espèces ou des variantes écotypiques adaptées aux conditions environnementales locales (Blouin et al., 2013; Csuzdi, 2008).

Eudrilus eugeniae est probablement due à sa plasticité écologique et à sa capacité d'adaptation à divers substrats organiques et climats tropicaux (Domínguez & Edwards, 2011).

En revanche, les deux autres morpho-espèces ont une distribution plus restreinte, étant limitées à kumoso et Buyogoma, ce qui pourrait être attribué à des préférences écologiques spécifiques (pH du sol, humidité, température, présence de matières organiques particulières).

Des études antérieures montrent que la distribution des vers de terre est fortement influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- La température et l'humidité : les vers de terre tropicaux, en particulier *E. eugeniae*, prospèrent dans des environnements où la température est comprise entre 20 et 30 °C et où l'humidité du sol est supérieure à 60 % (Edwards et Arancon, 2004).

- La nature du sol : la présence de matière organique en décomposition est essentielle pour le développement des populations épigées. Les espèces observées dans cette étude ont été retrouvées principalement dans des sols riches en matière organique, confirmant les résultats d'autres études sur la niche écologique des vers de terre composteurs (Blakemore, 2012; Suthar, 2007).

- Les activités humaines : l'agriculture intensive et la gestion des déchets organiques influencent également la distribution des vers de terre. Dans certaines régions du Burundi, la déforestation et l'appauvrissement des sols pourraient limiter la présence de certaines espèces (Brown et al., 2000).

4.2. Performances biologiques en vermiculture

L'évaluation des performances biologiques des trois espèces de vers de terre identifiées a permis d'analyser leur taux de survie, leur croissance en masse corporelle et leur capacité de reproduction. Ces critères sont essentiels pour déterminer leur compatibilité avec la technologie du vermicompostage et leur rentabilité en vermiculture (Edwards et Bohlen, 1996; Domínguez et al., 2011).

Les résultats montrent que l'espèce (*Eudrilus eugeniae)* et les deux morpho - espèces présentent des taux de survie élevés (83,33-100 %) et des performances biologiques comparables aux vers de terre composteurs tropicaux connus. Ces résultats confirment leur potentiel d'exploitation pour la production de vermicompost au Burundi. Respectivement aux déchets étudiés, *Eudrilus eugeniae* avait en moyenne une masse corporelle de 1,43 et 1,12g ; un nombre de cocons par adulte de 4,04 et 1,70 ; un accroissement de la population à quatre semaine de 194,44 et 203,33 et un accroissement de la population à six semaine de 963,89 et 296,67%.

Ces résultats supportent les études antérieures réalisées au Burundi et ailleurs dans le monde et suggèrent une excellente compatibilité des individus de cette espèce à la technologie de vermicompostage.

Les valeurs observées pour la seconde et la troisième morpho - espèce étaient proches de celles trouvées pour *E. eugeniae*. Ce résultat suggère que ces espèces sont aussi biologiquement compatibles avec la technologie de vermicompostage. En somme avec les données de la littérature, avec la subtilité des différences morphologiques et anatomiques, le résultat suggère aussi que les trois espèces identifiées appartiendraient à différentes sous-espèces d'*E. eugeniae*.

La survie des vers de terre est un critère essentiel pour évaluer leur adaptabilité aux conditions de vermiculture. Nos résultats montrent que les trois espèces testées ont maintenu un taux de survie de proche de 100 % sur les substrats expérimentaux (déchets de canne à sucre et de palmier à huile mélangés à 25 % de fumier de vache). Ce taux est comparable à celui observé pour *E. eugeniae* dans d'autres études de vermiculture sous climats tropicaux (Suthar, 2007; Blouin et al., 2013).

Le taux de reproduction, mesuré en nombre moyen de cocons par adulte et en accroissement de la population après 4 et 6 semaines de culture, a révélé qu'*E. eugeniae* produit en moyenne 4,04 cocons par adulte sur DCS et 1,70 cocon sur DPH. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles observées pour les deux autres morpho espèces, bien que ces dernières affichent également des taux de reproduction intéressants. Elles suggèrent une reproduction explosive typique des vers de terre bons composteurs (Edwards et Bohlen, 1996; Domínguez et al., 2011).

L'accroissement de la population est un indicateur clé pour le développement de durable en vermiculture. Après 4 semaines, la population d'*E. eugeniae* a augmenté de 194,44 % sur DCS et 203,33 % sur DPH, atteignant 963,89 % sur DCS et 296,67 % sur DPH après 6 semaines. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études ayant évalué *E. eugeniae* sur différents substrats organiques, confirmant sa grande capacité de reproduction dans des conditions optimales (Domínguez & Edwards, 2011).

En effet, *E. eugeniae* a montré un taux de croissance élevé, atteignant la maturité sexuelle en 4 à 6 semaines selon le substrat utilisé, avec une production moyenne de 3 à 4 cocons par ver et par semaine.

Les cocons présentaient un taux d'éclosion supérieur à 80 %, et chaque cocon donnait naissance à 2 à 3 juvéniles en moyenne. Les performances observées pour *E. eugeniae* dans cette étude sont comparables à celles observées dans d'autres régions tropicales, où cette espèce est considérée comme l'une des meilleures pour le vermicompostage. En Inde et au Nigeria, *E.*

eugeniae a montré des taux d'accroissement de population similaires (entre 900 et 1 200 % en 6 à 8 semaines), confirmant sa robustesse en conditions tropicales (Suthar, 2007; Yadav & Garg, 2011).

D'autres espèces tropicales, comme *Perionyx excavatus* sont également largement utilisées en vermiculture. Cependant, *E. eugeniae* surpasse souvent *P. excavatus* en rapidité de reproduction et en capacité à traiter des déchets riches en matière organique (Domínguez et al., 2019).

Les morpho - espèces de Kumoso et de Buyogoma montrent également une capacité de reproduction notable, bien que légèrement inférieure à celle d'*E. eugeniae*. Cette observation souligne leur potentiel d'exploitation en vermiculture, sous réserve d'études complémentaires sur leurs exigences physiologiques et leur efficacité dans la dégradation des déchets organiques.

Plusieurs facteurs influencent la croissance et la reproduction des vers de terre en vermiculture en particulier la température et l'humidité, la nature du substrat et la densité des vers de terre.

Les déchets de canne à sucre (DCS) ont permis un meilleur développement des vers que les déchets de palmier à huile (DPH), suggérant que la composition chimique du substrat influence leur croissance et reproduction. Le taux élevé de lignine et de phénols dans les DPH pourrait expliquer cette différence, car ces composés sont connus pour ralentir la biodégradation et limiter l'activité des vers de terre (Suthar, 2007; Lazcano et Domínguez, 2011).

4.3. Changement physicochimique des substrats

L'un des rôles essentiels des vers de terre en vermicompostage est leur capacité à modifier les propriétés physicochimiques des substrats organiques, facilitant ainsi leur transformation en un amendement stable et enrichi en nutriments (Edwards & Bohlen, 1996; Domínguez et al., 2011).

Dans cette étude, les paramètres analysés avant et après l'activité des vers incluaient le pH, la conductivité électrique (CE), la salinité, les chlorures, le total des solides dissous (TDS), la concentration en nutriments (N, P, K), les métaux lourds et autres éléments traces.

Les résultats ont montré que les trois espèces de vers testées contribuaient à des modifications significatives des paramètres étudiés, confirmant leur efficacité dans la dégradation des déchets organiques et l'amélioration de la qualité du compost final. Le pH du substrat initial a varié de 6,75 à 6,77, valeurs compatibles avec un processus de compostage efficace. Après six semaines d'activité des vers, le pH a augmenté pour atteindre 8,30 dans le substrat DCS et 8,71 dans le substrat DPH. Cette alcalinisation progressive du substrat est un phénomène classique en vermicompostage, généralement attribué à la minéralisation de la matière organique, qui libère des cations alcalins comme le calcium, le potassium et le magnésium (Suthar, 2007; Yadav & Garg, 2011) et l'activité microbienne stimulée par les excrétions des vers, qui produit des carbonates et ammoniums responsables d'une élévation du pH (Domínguez & Edwards, 2011). Ce résultat est en accord avec d'autres études où le pH des substrats de vermicompostage tend vers des valeurs légèrement alcalines (7,5 à 8,5), favorisant une meilleure assimilation des nutriments par les plantes (Gupta & Garg, 2009). Cependant, un pH trop élevé (>8,5) peut poser un problème d'ammonification excessive ce qui peut être toxique pour certaines cultures (Bernal et al., 2009). Il serait donc pertinent de vérifier, dans des études ultérieures, les impacts du vermicompost obtenu sur différents types de sols et de plantes.

La conductivité électrique a diminué de 15,32 à 11,8 µS/cm pour le substrat DCS et de 2440 à 2600 µS/cm pour le substrat DPH.

Cette diminution de la CE après l'activité des vers peut être expliquée par différents facteurs. Primo, l'assimilation des ions solubles par les micro-organismes et les vers de terre, ce qui réduit la charge ionique totale du compost (Suthar, 2007). Secundo, l'évaporation et la lixiviation de certains sels solubles lors du processus de compostage, entraînant une stabilisation du milieu (Garg & Kaushik, 2006).

Une CE trop élevée peut être délétère pour la germination et la croissance des plantes, car elle réduit l'absorption de l'eau par osmose. Le fait que la CE ait diminué dans cette étude indique que le compost produit est stabilisé et adapté à une application agricole (Lazcano & Domínguez, 2011).

En ce qui concerne la salinité, les valeurs ont évolué comme suit : DCS : de 654 ppm à 591 ppm ; DPH : de 1,27 à 1,35 ppm. Ces faibles niveaux indiquent que les substrats sont faiblement salins, ce qui est favorable à leur utilisation agricole sans risque de dégradation des sols.

La concentration en chlorures a diminué : DCS : de 469,7 à 360,51 g/L ; DPH : de 0,775 à 0,824 g/L. Cette diminution traduit un processus d'humification avancé, où les composés organiques solubles initialement présents sont progressivement transformés en matière organique plus stable (Edwards et Bohlen, 1996).

Le TDS a augmenté de 1,09 à 8,42 ppm pour DCS, mais a peu varié pour DPH. Cette augmentation pour déchets de canne à sucre DCS peut être attribuée à une minéralisation accrue des déchets de canne à sucre, qui sont plus rapidement dégradables que les déchets de palmier à huile, plus riches en lignine et en polyphénols (Domínguez et al., 2019).

L'activité des vers a permis une augmentation significative des macronutriments : azote total (N) : de 0,63 % à 1,16 % ; phosphore assimilable (P_2O_5) : de 0,633 % à 2,49 % ; potassium (K) : de 0,759 % à 0,97 %. Ces résultats confirment que le vermicompostage améliore la biodisponibilité des nutriments, en particulier le phosphore et le potassium, essentiels pour la croissance des plantes (Suthar, 2007; Gupta & Garg, 2009).

L'augmentation de ces nutriments s'explique par : L'excrétion des vers qui enrichit le substrat en azote et en micro-organismes bénéfiques et l'activité bactérienne, favorisée par l'aération du compost par les vers, qui accélère la minéralisation de la matière organique (Aira et al., 2002).

L'analyse des métaux lourds dans les vermicomposts produits a révélé des concentrations faibles en Cu, Pb, Ni, Zn, Cd, Co et Mg, respectant les normes de sécurité internationales (AFNOR NF U44-051), garantissant ainsi l'absence de risques toxicologiques (Bhat et al., 2018). Les vers de terre contribuent à la stabilisation des métaux lourds par bioaccumulation (Suthar, 2007). En piégeant ces éléments dans leurs tissus, ils réduisent la biodisponibilité des métaux toxiques dans le compost final, améliorant ainsi sa sécurité pour un usage agricole (Edwards et Arancon, 2004).

Les résultats obtenus suggèrent que les vers de terre identifiées influenceraient positivement les propriétés physicochimiques des substrats et faciliteraient leur transformation en un compost de haute qualité par l'amélioration du pH, favorisant la disponibilité des nutriments (Gajalakshmi & Abbasi, 2004), la diminution de la conductivité électrique et de la salinité, rendant le compost adapté aux sols agricoles (Lim et al., 2016), l'augmentation des macronutriments (N, P, K), essentiels pour la fertilité des sols (Arancon et al., 2006) et la réduction de la toxicité des métaux lourds, garantissant la sécurité du compost (Bhat et al., 2018). Ces résultats suggèrent que les trois espèces de vers de terre identifiées pourraient servir à la production de vermicompost de qualité. Toutefois, des études complémentaires restent nécessaires pour explorer l'impact des vermicomposts sur différents types de sols et de cultures pour affiner leur utilisation en agriculture (Domínguez & Edwards, 2011).

4.4. Comparaison avec d'autres amendements organiques

Les vermicomposts obtenus dans cette étude présentent une composition chimique particulièrement riche, tant en macronutriments qu'en oligo-éléments et métaux lourds, tout en respectant les normes de sécurité établies pour les amendements organiques. Les teneurs en azote (N), phosphore (sous forme de P_2O_5) et potassium (K) sont respectivement comprises entre 0,63 et 1,16 %, 0,633 et 2,49 %, et 0,759 et 0,97 %.

Ces concentrations démontrent une forte valeur fertilisante, comparable, voire supérieure, à celle d'autres vermicomposts étudiés, notamment par Domínguez et Edwards (2011) qui soulignent l'efficacité des vers de terre dans la concentration et la stabilisation des nutriments essentiels. Le phosphore, en particulier, joue un rôle déterminant dans le développement racinaire, tandis que le potassium e.st essentiel à la résistance des plantes au stress hydrique et aux pathogènes (Edwards et al., 2004).

En ce qui concerne les oligo-éléments, les vermicomposts analysés contiennent des concentrations comprises entre 1,8 et 0,423 mg Fe/kg, 52,7 et 21,6 mg Cu/kg, 16,6 et 2,57 mg Ni/kg, 192 et 108 mg Zn/kg, <5 mg Co/kg, et entre 0,46 et 0,098 mg Mn/kg. Ces oligo-nutriments, bien qu'en quantités infimes, jouent un rôle crucial dans les processus enzymatiques et le métabolisme des plantes (Lazcano & Domínguez, 2011). Leur présence dans les vermicomposts en quantités équilibrées et non toxiques illustre l'intérêt agronomique de ces amendements.

Quant aux métaux lourds (Cu, Pb, Ni, Zn, Cd, Co, Mg), les concentrations trouvées, respectivement 52,7–21,6 mg Cu/kg, 19,5–0,374 mg Pb/kg, 16,6–2,57 mg Ni/kg, 192–108 mg Zn/kg, <0,8 mg Cd/kg, <5 mg Co/kg, et 0,46–0,098 mg Mg/kg restent largement en dessous des seuils critiques définis par les normes internationales telles que la norme AFNOR NF U44-051 (AFNOR, 2005). Cela suggère que les vermicomposts produits sont sûrs pour une utilisation en agriculture, sans risque de contamination des sols ou des cultures. Cette faible teneur en éléments toxiques est probablement liée à l'activité biologique des vers de terre, qui contribuent à la stabilisation et à la biodégradation des composés organiques et inorganiques (Aira et al., 2005). Ces résultats montrent que les vermicompost produits sont plus riche en N et P que le compost traditionnel. Ces résultats confirment aussi que le vermicompost est un amendement de choix pour améliorer la fertilité des sols agricoles au Burundi (Edwards et al., 2004).

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

La présente étude avait pour objectifs de (i) caractériser morphologiquement et anatomiquement les espèces de vers de terre épigés vivant au Burundi qui ont une masse corporelle, des taux de survie et taux d'accroissement de population conformes en 4 et 6 semaines de culture au laboratoire sur des déchets de canne à sucre et des déchets de palmier à huile à 18-32°C ; (ii) identifier ceux qui sont capables d'induire des transformations physicochimiques compatibles avec le vermicompostage dans les paramètres suivants : pH, total des solides dissout, Conductivité électrique, Salinité, Chlorures et (iii) aptes à produire en 60 jours des vermicomposts physico-chiquement conformes aux normes internationales à partir des déchets de canne à sucre et des déchets de palmier à huile mais aussi du fumier de vache et du contenu ruménal. L'identification de deux nouvelles morpho espèces de vers de terre au Burundi pourrait représenter une opportunité d'élargir les options disponibles pour la vermiculture, à condition que des études complémentaires confirment leur efficacité sur une gamme plus large de substrats.

Les performances biologiques des trois espèces de vers de terre identifiées dans la zone d'étude indiquent un fort potentiel pour le développement du vermicompostage dans le pays. La survie et la reproduction élevées d'*E. eugeniae* confirment son statut de meilleur candidat pour une exploitation en vermiculture. Cependant, les deux autres morpho-espèces locales identifiées présentent également un intérêt, bien que leur performance soit légèrement inférieure à celle d'*E. eugeniae*. Elles pourraient être exploitées dans des conditions spécifiques ou pour des substrats particuliers.

Les résultats obtenus sur les paramètres biologiques étudiés, sur l'identification spécifique et les analyses physicochimiques permettent de tirer les conclusions suivantes :

i) Il existe dans différentes régions naturelles du Burundi des vers de terre épigés capables de transformer des déchets de canne à sucre et des déchets de palmier à huile en vermicomposts de qualité au laboratoire et dans d'autres systèmes de vermicompostage.
ii) Biologiquement très proches, ces trois morpho - espèces ont des caractéristiquesbiologiques recommandées pour les espèces de vers de terre composteurs d'origine tropicale et sont très prolifiques.
iii) Parmi les vers de terre identifiés, l'espèce la plus distribuée était *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867).

Recommandations:

Il faut :

-Tester l'impact des vermicomposts sur différentes cultures et comparer leur efficacité à celle des engrais minéraux.

- Etudier le stockage et la conservation des vermicomposts pour garantir leur stabilité à long terme.

- Expérimenter l'enrichissement en biochar ou en microorganismes bénéfiques pour améliorer encore plus leur efficacité.

- Affiner les paramètres optimaux de croissance et de reproduction de ces nouvelles espèces.

- Tester leur efficacité sur d'autres types de déchets organiques, notamment les résidus agricoles abondants au Burundi.

- Evaluer leur impact à long terme sur la qualité des vermicomposts produits.

Ces résultats sont particulièrement prometteurs pour la promotion du vermicompostage au Burundi, car ils démontrent qu'il existe des ressources biologiques locales adaptées à cette technologie, réduisant ainsi la nécessité d'importer des espèces exotiques.

La présente étude contribue en outre à l'amélioration des connaissances sur la biologie des vers de terre du Burundi et leur compatibilité avec le vermicompostage. Les résultats obtenus vont aider dans le développement de la technologie de vermicompostage et d'autres vermitechnologies dans le pays.

Perspectives

La caractérisation morphologique et anatomique des vers de terre identifiés dans cette étude a des implications majeures pour le développement du vermicompostage au Burundi.

La confirmation de la présence d'*E. eugeniae* dans six régions suggère qu'il existe une ressource biologique locale pouvant être exploitée pour la production de vermicompost, réduisant ainsi la dépendance aux importations de vers exotiques.

En outre, la découverte de deux autres morpho-espèces dont les performances en vermicompostage sont comparables à celles d'*E. eugeniae* ouvre la voie à des recherches futures pour caractériser plus précisément leur biologie et leur potentiel agronomique. L'utilisation d'espèces locales pourrait présenter des avantages écologiques en évitant l'introduction d'espèces exotiques potentiellement invasives et en favorisant la biodiversité fonctionnelle des sols (Lazcano & Domínguez, 2011).

Enfin, ces résultats soulignent la nécessité de poursuivre les recherches sur la taxonomie et l'écologie des vers de terre au Burundi. Une meilleure connaissance de la diversité et des interactions entre les espèces locales et leur environnement permettrait d'optimiser les pratiques de vermicompostage et d'intégrer les vers dans des stratégies de gestion durable des sols et des déchets organiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aira, M., Monroy, F., & Domínguez, J. (2002). Changes in microbial biomass and microbial activity of pig slurry after the vermicomposting process. *Waste Management & Research*, 20(5), 436–442. https://doi.org/10.1177/0734242X0202000508.

Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., & Mato, S. (2005). How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure. *European Journal of Soil Biology*, 41(1-2), 29–34. Retrieved from. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2004.10.003.

Aira, M., Domínguez, J., & Monroy, F. (2016). Earthworms as ecosystem engineers: Interactions with microorganisms and effects on nutrient dynamics in managed ecosystems. *Soil Biology and Biochemsty*, *103, 1-11*. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.003.

Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., & King, S. (2009). Characterisation of food waste and bulking agents for composting. *Waste Management, 29(2),* 795–803. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.002.

AFNOR. (2006). *Organic amendments: Denominations, specifications and labelling (NF U44-051).* Association Française de Normalisation.

Ansari, A. A., & Saywack, R. (2011). Vermicomposting of sugarcane bagasse and its potential use as a soil amendment. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2(5), 817–826. https://doi.org/10.5251/abjna.2011.2.5.817.826.

Ansari, A. A., & Saywack, R. (2011). Vermicomposting of terrestrial weed Sida acuta (Burman f.) using Eudrilus eugeniae (Kinberg). *Biotechnology Research International*, 2011, 1–7. https://doi.org/10.4061/2011/562020.

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Metzger, J. D., & Lucht, C. (2006). Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries: The 2004 Ohio State University Extension. *Pedobiologia*, 50(6), 423–429. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.08.003.

Arora, S., Rajpal, A., & Bhargava, R. (2014). A pilot-scale study on vermifiltration process using earthworms for sewage treatment. *Ecological Engineering, 71, 373–377.* https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.027.

Arora, S., Rajpal, A., Bhargava, R., & Pruthi, V. (2014). An integrated approach for vermistabilisation of agro-industrial waste: Process optimization using response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research,21(4), 2987–2997.* https://doi.org/10.1007/s11356-013-2231-x.

AFNOR. (2005). *NF U44-051 : Amendements organiques – Définition, spécifications et marquage*. French Standardisation Association.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7.

Bachrouch, O., Ammar, E., & Hamdi, M. (2019). Utilisation des déchets agricoles dans le compostage et le vermicompostage : caractéristiques et perspectives. *Journal africain des sciences de l'environnement*, 15(2), 123–134.

Bachrouch, O., Rekik, B., & Feki, A. (2019). Contribution à l'étude du compostage et du vermicompostage de divers substrats organiques. *Journal des nouvelles sciences, 64(6),* 3895–3904.

Bancroft, J. D., & Gamble, M. (2008). *Theory and practice of histological techniques* (6th ed.). Churchill Livingstone Elsevier.

Butt, K. R., & Grigoropoulou, N. (2010). Earthworm-assisted remediation of contaminated soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1–4), 59–66.

Bala, R., Kumar, A., & Kumar, S. (2017). Comparative efficiency of *Eisenia fetida* and *Perionyx excavatus* in vermicomposting of organic waste. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 6, 343–349.*

Blakemore, R. (2015). *Cosmopolitan Earthworms – An eco-taxonomic Guide to the Peregrine Species of the World.* VermEcology.

Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R. ... & Brun, J. J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science, 64(2),* 161–182.

Bemba's, B., Kim, J., & Son, Y. (2017). Earthworm diversity in different forest types of South Korea. *Applied Soil Ecology, 119,* 57–64.

Berkel, T. (2017). Ecological diversity and soil adaptation of earthworms in tropical climates. *Journal of Soil Biology, 34(2),* 112-126.

Bongaarts, J., & Berrisford, S. (2020). Sustainable agriculture and vermicomposting technologies in sub-Saharan Africa. *Agricultural Science and Technology, 22(3),* 88-102.

Brown, G. G., Hendrix, P. F., & Beare, M. H. (2000). Earthworms as indicators of soil ecosystem health. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 78(1),* 28-37.

Byambas, B. (2020). Earthworm Ecology and Biogeography. *Biological Reviews.* https://doi.org/10.1111/brv.12672.

Coulibaly, L., & Zoro Bi, I. A. (2010). Influence de la matière organique sur la diversité et l'abondance des vers de terre. *Acta Zoologica, 91(2),* 150-162.

Coulibaly, A., Zoungrana, B. J. B., & Ouédraogo, M. (2020). Impact du vermicompostage sur les caractéristiques physico-chimiques des substrats organiques. *Revue africaine d'environnement et d'agriculture, 3(2),* 45–55.

Csuzdi, C., & Zicsi, A. (2003). *Earthworms of Hungary (Annelida: Oligochaeta, Lumbricidae).* Hungarian Natural History Museum. https://doi.org/10.5281/zenodo.4309820.

Darwin, C. (1881). *The Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms, with Observations on their Habits. London:* John Murray.

Domínguez, J. (2004). State of the art and new perspectives on vermicomposting research. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm ecology* (2nd ed., pp. 401–424). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420039719.ch20.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In C. A. Edwards, N. Q. Arancon, & R. Sherman (Eds.), Vermiculture Technology: *Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (pp. 27–40). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11221-5

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2004). Vermicomposting organic wastes: A review. *In Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st Century* (pp. 369–395). Cairo: Self-published.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used in vermicomposting. In C. A. Edwards, N. Q. Arancon, & R. Sherman (Eds.), *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management* (Vol. 5, pp. 45–67). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10453.

Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandón, M. (2019). Vermicomposting: Earthworms and Organic Waste Management. In C. A. Edwards, A. Tripathi, & R. L. Sherman (Eds.), *Earthworm ecology* (3rd ed., pp. 293–320). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429425414-15.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). Vermiculture technologies for organic waste management. *In C. A. Edwards (Ed.), Earthworm Ecology* (2nd ed., pp. 345–379).

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). The use of earthworms in the breakdown and management of organic wastes. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm ecology* (2nd ed., pp. 345–379). Boca Raton, FL: CRC Press.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). The influence of vermicomposts on plant growth and pest suppression. *Soil Biology and Biochemistry, 36*(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.09.034.

Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms* (3rd ed.). Chapman & Hall.

Organization of the United Nations. (1980). *Soil organic matter: Its role in crop production*. Rome, Italy: FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Soils, where food begins: How can soils continue to sustain the growing needs of food production?* Rome, Italy: FAO.https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a2952c41-05ff-4720-8a9a-44065dc440ce/content.

Feller, C., Albrecht, A., Blanchart, E., Cabidoche, Y.-M., Chevallier, T., Hartmann, C& Toucet, J. (2003). The importance of earthworms in tropical soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 100(2–3),* 127–153. https://doi.org/10.1016/S0167-8809 (03)00158-9.

Gabriella, A. S., Ntuli, F., & Mugomeri, E. (2019). Vermicomposting of organic waste: A sustainable approach using *Eudrilus eugeniae* for waste management in developing countries. *African Journal of Environmental Science and Technology, 13(2),* 41–46. https://doi.org/10.5897/AJEST2018.2633.

Garg, V. K., & Kaushik, P. (2005). Influence of vermicompost on plant growth and soil properties. *Environmental Science and Pollution Research, 12(3),* 195-202.

Garg, V. K., Kaushik, P., & Yadav, A. (2006). Influence of vermicompost application on the soil properties and productivity of rice crop. *International Journal of Environmental Science and Technology, 3(4),* 395–402.

Garg, V. K., & Kaushik, P. (2006). Vermistabilization of textile mill sludge spiked with poultry droppings by an epigeic earthworm Eisenia fetida. *Bioresource Technology, 97(3),* 391–395.

Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2008). Solid Waste Management by Composting: State of the art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 38(5),* 311–400. https://doi.org/10.1080/10643380701413633.

Gómez-Brandón, M., Lores, M., & Domínguez, J. (2012). Species-specific effects of epigeic earthworms on microbial community structure during first stages of decomposition of organic matter. *PLoS ONE, 7(12), e49571.* https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049571.

Ghorbani, R., & Sabour, M. (2021). The role of earthworms in soil remediation: A meta-analysis. *Journal of Environmental Science, 54(3),* 122-135.

Ghorbani, R., & Sabour, M. (2021). Vermicomposting smart closed reactor design and performance assessment by using sewage sludge. *Waste and Biomass Valorization, 12, 6177–6190.*

Gupta, R., & Garg, V. K. (2008). Stabilization of primary sludge during vermicomposting. Journal of Hazardous Materials, 153(1-2), 1023-1030.

Huang, J., Xu, Q., Jun, Z., Lan, G., & You, Z. (2007). Identifying earthworms through DNA barcodes. *Pedobiologia, 51, 301–309.* https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.05.003.

Howard, A. (1940). *An Agricultural Testament.* Oxford UniversitY.

Hervé, M., Dupont, L., & Leroy, B. (2007). Organic matter dynamics in tropical soils: The role of earthworms. *Soil Research, 45(4),* 275-290.

IFDC. (2022). *Vers une intensification durable de l'agriculture au Burundi : Rapport technique annuel 2022.* Centre international de développement des engrais.

Kaboneka,B(2015). Dégradation des sols au Burundi et stratégies de lutte. *Revue Burundaise des Sciences et Techniques Agricoles, 5(1),* 45–60.

Kale, R. D. (1998). *Earthworms: Nature's gift for utilization of organic wastes*. Zoological Survey of India.

Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture. *Agriculture and Environmental Science, 5(4),* 22-35.

Loh, T. C., Lee, Y. C., Liang, J. B., & Tan, D. (2017). Vermicomposting of cattle and goat manures by Eisenia fetida and their growth and reproduction performance. *Bioresource Technology, 241,* 89–96.

Marques, R., de Assis, J. C., Ferraz, M. R., & Baretta, D. (2014). Anatomical and morphological characterization of earthworms in subtropical regions. *Applied Soil Ecology*, *7*5, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.002.

MINEATU. (2016). State of the environment report on soil biodiversity in Burundi. *Ministry of Environment, Agriculture, and Land Use Planning, Bujumbura.*

Mubeen, A., & Hatti, P. (2018). Earthworm activity and its impact on soil fertility in agricultural landscapes. *Applied Soil Ecology, 70(3),* 190-210.

Nzigidahera, B. (2007). Contribution à l'étude écologique des vers de terre au Burundi. *Mémoire de DEA, Université du Burundi.*

Nzigidahera, B. (2007). Soil fauna and ecosystem services in Burundi's natural landscapes. *African Journal of Ecology, 45(1),* 56-72.

Ntibwunguka, F. (2019). Dynamique de la faune du sol au Burundi. *Bulletin Scientifique de l'Université du Burundi*, 20, 30–50.

Paul, M. (2017). Inventaire de la biodiversité de la faune épigée au Burundi. *Actes du Colloque Africain de Biodiversité* (Vol. 10, pp. 55–67).

Paul, A. (2017). Comparative study on *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida* for composting efficiency. *Composting Science & Technology, 24(2),* 66-79.

Pérès, G., Cluzeau, D., Menasseri, S., Soussana, J. F., & Bessler, H. (2011). Earthworm activities and organic matter dynamics in grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry, 43(8),* 1460–1467.

Plisko, J. D., Nxele, T. C., & Bornman, T. G. (2010). New data on the earthworm fauna of KwaZulu-Natal,South Africa. *African Invertebrates, 51(2),* 423–432. https://doi.org/10.5733/afin.051.0210.

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.2.0) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing.https://www.R-project.org/.

Reinecke, A. J., & Viljoen, S. A. (1990). The influence of worm density on growth and cocoon production of the compost worm *Eisenia fetida (Oligochaeta). Revue d'Écologie et de Biologie du Sol,* 27, 221–229.

Sinha, R. K., Heart, S., Bharambe, G., & Chauhan, K. (2010).Vermiculture and sustainable organic farming. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(3–4), 280–292. https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2010.037963.

Sinha, R. K., Heart, S., Agarwal, S., Asadi, R., & Carretero, E. (2010).Vermiculture and Sustainable Agriculture. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 8(4),* 407–421.

Singh, A., Singh, J., Vig, A. P., & Arora, S. (2020). Vermicomposting: A sustainable technology for organic waste management. *Environmental Sustainability, 3(1),* 37–43. https://doi.org/10.1007/s42398-020-00061-9.

Sinha, R. K., Bharambe, G., & Ryan, D. (2008). Converting organic wastes into biofertilizer and rural employment through vermicomposting. *International Journal of Global Environmental Issues, 8*(3), 348–365. https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2008.017269.

Suthar, S. (2007). Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugar industry waste by epigeic earthworm Perionyx excavatus. *Bioresource Technology,* 98(7), 1231–1237.

Suthar, S. (2007). Nutrient changes and biodynamic parameters during vermicomposting of agricultural wastes. *Bioresource Technology, 98*(8), 1606-1612.

Suthar, S. (2009). Bioconversion of post-harvest crop residues and cattle shed manure into value-added products using earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Ecological Engineering*, 35(7), 914–920.

Suthar, S. (2010). Vermicomposting and organic waste management: A biological approach to sustainable agriculture. *Nova Science Publishers.*

Savala, R., & Odhiambo, J. (2003). Earthworm biodiversity and soil health: A Kenyan perspective. *East African Journal of Soil Science, 19(3),* 102-119.

Tripathi, G., & Bhardwaj, P. (2004). Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg). Bioresource Technology, 92(3), 275–283. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.003.

World Bank. (2022). Soil biodiversity and climate resilience in East Africa: Case studies from Burundi and neighboring countries. Washington, DC: *World Bank Group.*

Yadav, A., & Garg, V. K. (2011). Vermicomposting of organic waste: A sustainable approach to environmental management. *Lambert Academic Publishing.*

Yadav, A., & Garg, V. K. (2011). Influence of vermicompost on growth and yield of marigold (Tagetes erecta). *Crop Research, 41(1-3),* 224–228.

Jamieson, B. G. M. (2000). Earthworm biology. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm Ecology* (pp. 1–24).

Sinha, R. K., Heart, S., Agarwal, S., Asadi, R., & Carretero, E. (2010). Vermiculture and sustainable agriculture: Studies on the protective and growth-promoting effects of earthworms and vermicompost on cowpea (*Vigna unguiculata*) plants. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 9(5), 456–463.

Sinha, R. K., Bharambe, G., & Chaudhari, U**.** (2008). Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: A low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist, 28, 409–420.* https://doi.org/10.1007/s10669-008-9162-y.

Sinha, R. K., Heart, S., Agarwal, S., Asadi, R., & Carretero, E. (2010). Vermiculture revolution for sustainable agriculture, environmental management and food security in the 21st century. In R.K. Sinha (Ed.), Earthworms: The Environmental Engineers and Managers (pp. 19–52). *International Journal of Global Environmental Issues.*

ANNEXES

Annexe 1: Données sur les détails pour les statistiques de chaque variable étudiée

	région	**espece**	**dechet**	**masse_moy_0**	**masse_moy_4S**	**cocons_2S**	**cocons_2S_par_adulte**	**cocons_4S**	**juveniles_4S**	**accroiss_pop_4S**	**juveniles_6S**	**accroiss_pop_6S**
1	Kirimiro	Espece_1	DCS	1,11	1,29	13	6,5	18	8	400	22	1100
2	Kirimiro	Espece_1	DCS	1,49	1,50	5	2,5	8	8	400	10	500
3	Kirimiro	Espece_1	DCS	1,48	1,62	7	3,5	8	6	300	40	2000
4	Kirimiro	Espece_1	DPH	1,20	1,09	4	2	4	5	250	9	450
5	Kirimiro	Espece_1	DPH	1,14	1,03	7	3,5	8	7	350	6	300
6	Kirimiro	Espece_1	DPH	1,00	0,85	2	1	8	6	300	12	600
7	Bututsi	Espece_1	DCS	1,41	1,38	18	9	13	2	100	36	1800
8	Bututsi	Espece_1	DCS	1,54	1,57	14	2,5	11	4	200	12	600
9	Bututsi	Espece_1	DCS	1,67	1,76	10	5	11	8	400	17	850
10	Bututsi	Espece_1	DPH	1,50	1,04	4	2	2	4	200	8	400
11	Bututsi	Espece_1	DPH	1,05	1,10	2	1	2	6	300	3	150

	région	espece	dechet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S	cocons_2S_par_adulte	cocons_4S	juveniles_4S	accroiss_pop_4S	juveniles_6S	accroiss_pop_6S
12	Bututsi	Espece_1	DPH	1,50	1,13	3	1,5	1	8	400	4	200
13	Bugesera	Espece_1	DCS	1,10	1,20	11	5,5	3	1	50	32	1600
14	Bugesera	Espece_1	DCS	1,09	1,24	13	6,5	18	2	100	24	1200
15	Bugesera	Espece_1	DCS	1,10	1,25	12	6	8	3	150	20	1000
16	Bugesera	Espece_1	DPH	0,97	0,95	8	4	11	8	400	16	800
17	Bugesera	Espece_1	DPH	1,00	1,00	2	1	7	5	250	5	250
18	Bugesera	Espece_1	DPH	0,91	0,79	5	2,5	2	2	100	8	400
19	Buyogoma	Espece_2	DCS	1,16	1,17	9	4,5	24	6	300	38	1900
20	Buyogoma	Espece_2	DCS	1,20	1,23	10	5	11	3	150	45	2250
21	Buyogoma	Espece_2	DCS	1,00	1,11	15	7,5	12	8	400	32	1600
22	Buyogoma	Espece_2	DPH	0,86	1,12	1	0,5	2	10	500	3	150
23	Buyogoma	Espece_2	DPH	0,95	0,99	2	1	2	8	400	2	100
24	Buyogoma	Espece_2	DPH	1,02	0,94	1	0,5	1	6	300	3	150

	région	espece	dechet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S	cocons_2S_par_adulte	cocons_4S	juveniles_4S	accroiss_pop_4S	juveniles_6S	accroiss_pop_6S
25	kumoso	Espece_3	DCS	1,11	1,27	4	2	10	1	50	18	900
26	kumoso	Espece_3	DCS	1,98	2,00	8	4	8	1	50	16	800
27	kumoso	Espece_3	DCS	0,98	1,61	6	3	2	2	100	8	400
28	kumoso	Espece_3	DPH	0,80	0,84	3	1,5	2	2	100	3	150
29	kumoso	Espece_3	DPH	1,03	0,76	2	1	2	1	50	3	150
30	kumoso	Espece_3	DPH	1,10	0,61	6	3	2	1	50	2	100
31	Buyenzi	Espece_1	DCS	1,41	1,57	6	3	4	2	100	24	1200
32	Buyenzi	Espece_1	DCS	2,00	2,24	7	3,5	10	2	100	24	1200
33	Buyenzi	Espece_1	DCS	1,22	1,55	8	4	8	3	150	11	550
34	Buyenzi	Espece_1	DPH	2,00	1,90	4	2	6	4	200	3	150
35	Buyenzi	Espece_1	DPH	1,60	1,56	2	1	2	6	300	2	100
36	Buyenzi	Espece_1	DPH	1,60	1,38	3	1,5	1	2	100	2	100
37	Mirwa	Espece_1	DCS	1,19	1,36	2	1	4	2	100	13	650

	région	espece	dechet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S	cocons_2S_par_adulte	cocons_4S	juveniles_4S	accroiss_pop_4S	juveniles_6S	accroiss_pop_6S
38	Mirwa	Espece_1	DCS	1,31	1,53	4	2	6	1	50	16	800
39	Mirwa	Espece_1	DCS	1,33	1,11	7	3,5	13	3	150	16	800
40	Mirwa	Espece_1	DPH	1,15	0,89	1	0,5	2	5	250	4	200
41	Mirwa	Espece_1	DPH	1,05	1,03	2	1	1	3	150	3	150
42	Mirwa	Espece_1	DPH	1,25	0,74	3	1,5	2	1	50	4	200
43	Imbo	Espece_1	DCS	1,20	1,18	6	3	2	4	200	6	300
44	Imbo	Espece_1	DCS	1,30	1,00	2	1	9	6	300	8	400
45	Imbo	Espece_1	DCS	1,45	1,32	1	0,5	8	5	250	16	800
46	Imbo	Espece_1	DPH	1,50	1,15	2	1	3	2	100	2	100
47	Imbo	Espece_1	DPH	1,60	1,31	2	1	2	2	100	3	150
48	Imbo	Espece_1	DPH	1,45	1,22	2	1	4	1	50	4	200

Annexe 2 : Sites d'échantillonnage pour chaque région naturelle échantillonnée ainsi que le niveau d'acclimatation des vers de terre

Site	Long, est	Lat, sud	Colline /Quartier	Commune	Province	Région	Acclimatation
1	30,08207	2,59147	Nyange-Bushaza	Kirundo	Kirundo	Bugesera	Non (mort)
2	30,09139	2,58806	Kabande	Kirundo	Kirundo	Bugesera	Très bonne*
3	29,7743	4,27288	Mabanda	Mabanda	Makamba	Buragane	Bonne
4	29,68018	3,77004	Kiremba	Kiremba	Bururi	Bututsi	Très bonne*
5	29,68018	3,77004	Matana	Batana	Bururi	Bututsi	Non (mort)
6	29,8285	2,90797	Gabiro	Ngozi	Ngozi	Buyenzi	Très bonne*
7	29,61967	2,91369	Kirema	Kayanza	Kayanza	Buyenzi	Non (mort)
8	30,39235	2,73247	Rugari	Muyinga	Muyinga	Bweru	Non (mort)
9	30,549167	3,215556	Cankuzo	Cankuzo	Cankuzo	Buyogoma	Très bonne*
10	29,44779	4,00365	Mutambara	Rumonge	Rumonge	Imbo	Très bonne
11	29,385	3,361389	Kigobe	Ntahangwa	Bujumbura mairie	Imbo	Excellente*
12	30,16714	3,03526	Rwingoma	Buhiga	Karusi	Kirimiro	Bonne*
13	29,85687	3,36311	Gisuru	Giheta	Gitega	Kirimiro	Non (mort)
14	30,13931	4,03066	Gihofi	Bukemba	Rutana	Kumoso	Excellente*
15	29,11256	2,74568	Rusagara	Mugina	Cibitoke	Mirwa	Excellente*

* retenu pour les expérimentations ultérieures

Annexe 3 : Statistiques descriptives de la masse, le nombre de cocons et l'accroissement de la population chez *l'Edrilus eugeniae*, en vermiculture au laboratoire selon le déchet

Déchet	Variable	Moyenne	Ecart-type	Minimum (IC 95)	Maximum (IC 95)	N
DCS	Masse initiale (g)	1,35	0,23	1,24	1,47	18
	Masse à quatre semaines (g)	1,43	0,29	1,28	1,57	18
	No. de cocons par adulte à deux semaines	4,06	2,34	2,89	5,22	18
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	194,44	119,91	134,81	254,08	18
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	963,89	474,90	727,73	1200,05	18
DPH	Masse initiale (g)	1,29	0,31	1,12	1,47	15
	Masse à quatre semaines (g)	1,12	0,31	0,94	1,29	15
	No. de cocons par adulte à deux semaines	1,70	1,00	1,15	2,25	15
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	203,33	109,33	142,79	263,88	15
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	296,67	200,42	185,68	150	15

Remarque : N représente le nombre de boîtes de vermiculture, avec deux vers de terre adultes au départ.

Annexe 4 : Statistiques descriptives de la masse, le nombre de cocons et l'accroissement de la population chez la morpho - espèce 2 en vermiculture au laboratoire selon le type de déchet

Déchet	Variable	Moyenne	Ecart_ Type	Minimum (IC 95)	Maximum (IC 95)	N
DCS	Masse initiale (g)	1,12	0,11	0,86	1,38	3
	Masse à quatre semaines (g)	1,17	0,06	1,02	1,32	3
	No. de cocons par adulte à deux semaines	5,67	1,61	1,67	9,66	3
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	283,33	125,83	-29,25	595,91	3
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	1916,67	325,32	1108,53	2724,81	3
DPH	Masse initiale (g)	0,94	0,08	0,74	1,14	3
	Masse à quatre semaines (g)	1,02	0,09	0,79	1,24	3
	Nombre de cocons par adulte à deux semaines	0,67	0,29	-0,05	1,38	3
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	400,00	100,00	151,59	648,41	3
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	133,33	28,87	61,62	205,04	3

Remarque : N représente le nombre de boîtes de vermiculture, avec deux vers de terre adultes au départ.

Annexe 5: Statistiques descriptives de la masse, le nombre de cocons et l'accroissement de la population chez la morpho - espèce 3 en vermiculture au laboratoire selon le déchet

Déchet	Variable	Moyenne	Ecart_ Type	Minimum (IC 95)	Maximum (IC 95)	N
DCS	Masse initiale (g)	1,35	0,54	0,01	2,70	3
	Masse à quatre semaines (g)	1,63	0,37	0,72	2,53	3
	No. de cocons par adulte à deux semaines	3,00	1,00	0,52	5,48	3
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	66,67	28,87	-5,04	138,38	3
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	700,00	264,58	42,76	1357,24	3
DPH	Masse initiale (g)	0,98	0,16	0,59	1,36	3
	Masse à quatre semaines (g)	0,74	0,12	0,45	1,03	3
	No. de cocons par adulte à deux semaines	1,83	1,04	-0,75	4,42	3
	Accroissement de la population à 4 semaines (%)	66,67	28,87	-5,04	138,38	3
	Accroissement de la population à 6 semaines (%)	133,33	28,87	61,62	205,04	3

Remarque : N représente le nombre de boîtes de vermiculture, avec deux vers de terre adultes au départ.

Annexe 6 : Normes internationales des vermicomposts Propriétés et nutriments

Paramètre	**AFNOR NF U44-051 (France)**	**US EPA 503 (USA)**	**IS 8705 (Inde)**	**Règlement UE**
pH	6,5 – 8,0	—	6,5 – 7,5	6,0 – 8,0
Humidité (%)	≤ 30	—	25 – 30	≤ 35
Matière organique (%)	≥ 20	—	≥ 18	≥ 25
C/N Ratio	10 – 20	—	10 – 20	10 – 15
Azote total (N, % MS)	≥ 0,5	—	≥ 0,5	≥ 0,6
Phosphore total (P, % MS)	≥ 0,2	—	≥ 0,3	≥ 0,3
Potassium total (K, % MS)	≥ 0,3	—	≥ 0,5	≥ 0,4

Annexe 7 : Normes internationales des vermicomposts pour les métaux lourds (mg/kg MS)

Métal lourd	**AFNOR NF U44-051**	**US EPA 503**	**IS 8705 (Inde)**	**Règlement UE**
Plomb (Pb)	≤ 120	≤ 300	≤ 100	≤ 150
Cadmium (Cd)	≤ 3	≤ 39	≤ 5	≤ 3
Cuivre (Cu)	≤ 300	≤ 1500	≤ 300	≤ 600
Zinc (Zn)	≤ 1000	≤ 2800	≤ 1000	≤ 1500
Nickel (Ni)	≤ 50	≤ 420	≤ 50	≤ 75
Chrome total (Cr)	—	≤ 3000	≤ 50 (Cr VI)	≤ 100
Mercure (Hg)	≤ 1	≤ 17	≤ 0,15	≤ 1

Annexe 8 : Données biologiques pour *Edrilus eugeniae*

déchet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S_par_adulte	accroiss_pop_4S	accroiss_pop_6S
DCS	1,11	1,29	6,5	400	1100
DCS	1,49	1,50	2,5	400	500
DCS	1,48	1,62	3,5	300	2000
DPH	1,20	1,09	2	250	450
DPH	1,14	1,03	3,5	350	300
DPH	1,00	0,85	1	300	600
DCS	1,41	1,38	9	100	1800
DCS	1,54	1,57	7	200	600
DCS	1,67	1,76	5	400	850
DPH	1,50	1,04	2	200	400
DCS	1,10	1,20	5,5	50	1600
DCS	1,09	1,24	6,5	100	1200
DCS	1,10	1,25	6	150	1000
DPH	0,97	0,95	4	400	800
DPH	1,00	1,00	1	250	250
DPH	0,91	0,79	2,5	100	400
DCS	1,41	1,57	3	100	1200
DCS	2,00	2,24	3,5	100	1200
DCS	1,22	1,55	4	150	550
DPH	2,00	1,90	2	200	150
DPH	1,60	1,56	1	300	100
DPH	1,60	1,38	1,5	100	100
DCS	1,19	1,36	1	100	650
DCS	1,31	1,53	2	50	800

déchet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S_par_adulte	accroiss_pop_4S	accroiss_pop_6S
DCS	1,33	1,11	3,5	150	800
DPH	1,15	0,89	0,5	250	200
DPH	1,05	1,03	1	150	150
DPH	1,25	0,74	1,5	50	200
DCS	1,20	1,18	3	200	300
DCS	1,30	1,00	1	300	400
DCS	1,45	1,32	0,5	250	800
DPH	1,60	1,31	1	100	150
DPH	1,45	1,22	1	50	200

Annexe 9: Données biologiques pour la morpho - espèce 2

dechet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S	cocons_2S_par_adulte	cocons_4S	juveniles_4S	accroiss_pop_4S	juveniles_6S	accroiss_pop_6S
DCS	1.16	1.17	9	4.5	24	6	300	38	1900
DCS	1.20	1.23	10	5	11	3	150	45	2250
DCS	1.00	1.11	15	7.5	12	8	400	32	1600
DPH	0.86	1.12	1	0.5	2	10	500	3	150
DPH	0.95	0.99	2	1	2	8	400	**2**	**100**
DPH	1.02	0.94	1	0.5	1	6	300	**3**	**150**

Annexe 10: Données biologiques pour la morpho - espèce 3

	dechet	masse_moy_0	masse_moy_4S	cocons_2S_par_adulte	accroiss_pop_4S	accroiss_pop_6S
1	DCS	1,11	1,27	2	50	900
2	DCS	1,98	2,00	4	50	800
3	DCS	0,98	1,61	3	100	400
4	DPH	0,80	0,84	1,5	100	150
5	DPH	1,03	0,76	1	50	150
6	DPH	1,10	0,61	3	50	100