



République du Burundi



FORUM NATIONAL SUR LE
VERMICOMPOSTAGE
PREMIERE EDITION

—  *Thème général :*  —
*Ensemble pour une adoption rapide, efficace et
durable de la technologie de vermicopostage au Burundi*



BUJUMBURA, ECOLE NORMALE SUPERIEURE
JUIN 2025



Table des Matières

Mot d'accueil de Madame Prof Nusura Hassan, Directeur Général de l'ENS	4
Discours préliminaire de Abbé Docteur Apollinaire Bangayimbaga, Recteur de l'Université de Ngozi	5
Discours préliminaire de monsieur Micael Beun, Chef du Projet d'Appui à une Gestion Responsable et Intégrée des Sols PAGRIS de International Fertilizer Centre, IFDC	7
Discours d'ouverture du Secrétaire Permanent au Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage	9
Thème 1.	
Comparaison des avantages et limites dans le contexte du Burundi des techniques potentielles de valorisation des déchets et résidus organiques : une revue de littérature	11
Thème 2.	
Plantes envahissantes, déchets et résidus organiques potentiellement valorisables par vermicompostage au Burundi : une méta-analyse	24
Thème 3.	
Potentialités de déchets, résidus et plantes envahissantes courants au Burundi pour le lombricompostage : une étude comparative	48
Thème 4.	
Essais de culture sur divers déchets organiques de vers de terre <i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867) issus d'une population sauvage du Burundi	66
Thème 5.	
Caractérisation morpho-anatomique et évaluation du potentiel pour le vermicompostage des vers de terre épigés du Burundi	79
Thèmes 6.	
Relations entre préférences alimentaires, masse corporelle et reproduction chez <i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867): quelles leçons pour le vermicompostage?	97
Thèmes 7.	
Effets du vermicompost sur la croissance, la productivité et la composition nutritionnelle du haricot commun (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) sur sol très acides et dégradé	110
Thème 8.	
Effets du vermicompost versus engrais chimique sur la croissance, la productivité et la qualité de la tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) cultivée sur sol hautement acide et dégradé	127
Thème 9.	
Dynamique comparée de l'activité enzymatique lors du compostage thermophile de différents déchets et résidus versus vermicompostage par <i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867)	141

Mot d'accueil

de Madame

Prof Nusura Hassan,

Directeur Général de l'ENS



Dans son mot d'accueil, Professeur Nusura Hassan, Directeur Général de l'École Normale Supérieure (ENS), souhaite la bienvenue aux autorités, partenaires, chercheurs et participants au Forum national sur le vermicompostage. Elle exprime sa gratitude envers les invités et souligne l'honneur pour l'ENS d'accueillir cet événement d'importance nationale.



Elle présente brièvement l'ENS, créée en 1999, comme une institution dédiée à la formation académique, à la recherche scientifique et à l'innovation pédagogique. L'institution dispose d'un personnel important et structuré autour de plusieurs directions et départements couvrant les sciences humaines, appliquées et naturelles. Il offre des formations de niveau baccalauréat et master, contribuant à la formation de cadres qualifiés pour le pays.



La Directrice met en avant la contribution de l'ENS à la vision nationale « Burundi émergent en 2040 et développé en 2060 », notamment à travers la formation d'enseignants compétents, capables d'innover et de répondre aux défis du développement. Elle souligne également le rôle central de la recherche scientifique, appuyée par plusieurs centres spécialisés et activités académiques telles que des séminaires, colloques et publications scientifiques.



Elle insiste sur l'importance du partenariat entre l'ENS et l'Université de Ngozi dans la mise en œuvre du projet de recherche sur le vermicompostage, qu'elle considère comme une initiative innovante et stratégique pour l'éducation, l'agriculture, l'environnement et le développement socio-économique du Burundi. Ce projet illustre la valorisation concrète des résultats de la recherche au service de la société.



Enfin, elle exprime son espoir que les échanges durant le forum soient enrichissants et contribuent à ouvrir de nouvelles perspectives de collaboration et d'innovation. Elle conclut en remerciant les partenaires et en souhaitant un agréable séjour aux participants au sein de l'ENS.



Discours préliminaire

de Abbé

Dr. Apollinaire Bangayimbaga,

Recteur de l'Université de Ngozi



Dans son discours, l'Abbé Docteur Apollinaire Bangayimbaga, Recteur de l'Université de Ngozi, souhaite la bienvenue aux autorités, partenaires, chercheurs, enseignants, étudiants et autres participants au Forum national sur le vermicompostage. Il souligne l'honneur pour son institution d'organiser cet événement sous le haut patronage du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage, dans les enceintes de l'École Normale Supérieure du Burundi.



Il met en avant l'importance du vermicompostage comme une technologie simple, locale et porteuse de transformations durables, notamment face aux défis environnementaux et à la nécessité de promouvoir des fertilisants naturels adaptés aux petits producteurs. Il rappelle que l'Université de Ngozi s'est donnée pour mission de former des cadres compétents tout en ancrant l'enseignement et la recherche dans les réalités locales et les besoins du développement.



Dans ce cadre, l'Université a initié et coordonné **un projet de recherche sur la valorisation à finalité agricole des déchets et résidus organiques par la technologie de vermicompostage**. Ce projet a mobilisé plusieurs disciplines (biologie, agronomie, économie, éducation, environnement) et permis de développer des modules de formation, des outils pédagogiques, ainsi que des expérimentations sur le terrain pour évaluer la faisabilité et la rentabilité de la technologie.



Le Recteur souligne également le rôle de l'Université comme pôle de formation et de démonstration, avec l'installation d'unités pilotes, la formation de nombreux jeunes, et la diffusion des résultats à travers des ateliers, médias et supports techniques. Il insiste sur le fait que ce projet démontre la capacité des universités à jouer un rôle moteur dans l'innovation agricole et la transition écologique, en synergie avec les partenaires.



Il rend un hommage appuyé aux institutions partenaires, notamment l'ENS, l'Université Polytechnique de Gitega, l'Université du Burundi et l'ISABU, pour leur contribution scientifique et technique. Il met en avant la qualité de cette collaboration interinstitutionnelle, qu'il considère comme un modèle de recherche concertée au service du développement national.

Le discours souligne ensuite que ce forum dépasse le cadre académique : il constitue un espace de dialogue entre la recherche et les réalités du terrain, entre les institutions et les communautés. Il représente une opportunité pour diffuser

les résultats du projet, renforcer les capacités des acteurs et encourager l'innovation agricole, notamment auprès des jeunes, pour qui le vermicompostage peut devenir une source d'emploi et d'entrepreneuriat.



Le Recteur insiste aussi sur le rôle clé du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage dans le soutien politique et institutionnel du projet, ainsi que sur l'apport essentiel de l'IFDC en matière d'expertise technique et de renforcement des capacités. Il souligne que ce partenariat entre université, État et partenaire technique constitue un modèle efficace de coopération orientée vers les résultats.



Enfin, il lance un appel à la collaboration de tous les acteurs : décideurs, collectivités, enseignants, chercheurs, partenaires et jeunes entrepreneurs, afin d'assurer la diffusion et l'appropriation du vermicompostage à l'échelle nationale. Il conclut en réaffirmant l'engagement de l'Université de Ngozi à poursuivre ses efforts en matière de formation, de recherche et d'innovation au service d'une agriculture durable et du développement du Burundi.



Discours préliminaire

de monsieur

Micael Beun,

Chef du Projet d'Appui à une Gestion Responsable et Intégrée des Sols PAGRIS de International Fertilizer Centre, IFDC



Dans son allocution, Monsieur Micael Beun, Chef du projet PAGRIS à l'IFDC, salue les autorités, partenaires et participants au Forum national sur le vermicompostage, en soulignant l'honneur pour l'IFDC de prendre part à cet événement organisé en collaboration avec plusieurs institutions nationales, dont l'Université de Ngozi, l'ENS et le MINEAGRIE.



Il met en évidence l'importance cruciale de la gestion durable des sols dans un pays comme le Burundi, caractérisé par une forte densité de population dépendante de l'agriculture. Il souligne les principales contraintes auxquelles les sols sont confrontés : surexploitation des terres, dégradation liée à la déforestation, acidification, faible fertilité et diminution de l'activité biologique, autant de facteurs limitant la productivité agricole.



Dans ce contexte, l'IFDC, à travers les projets PAGRIS et PSSD financés par l'Ambassade des Pays-Bas, **concentre ses efforts sur la promotion de sols et de plantes sains**. Ces projets visent notamment à renforcer la recherche, accompagner les ménages agricoles, soutenir le secteur privé et favoriser un environnement propice au développement agricole. L'IFDC contribue également à l'identification de solutions innovantes adaptées aux réalités locales.



Le discours rappelle que la collaboration autour du vermicompostage a débuté lors d'un atelier organisé en 2021 à Gitega, visant à identifier des technologies de valorisation des déchets organiques. Le vermicompostage a été retenu comme une solution prometteuse, avec une recommandation importante : privilégier les espèces locales de vers de terre afin de préserver l'équilibre écologique.



Par la suite, des études ont été menées par l'Université de Ngozi, l'ENS et chercheurs d'autres institutions (MINEAGRIE, ISABU, universités), avec l'appui de l'IFDC, pour analyser différents types de déchets organiques disponibles (déchets de brasserie, de canne à sucre, de café, d'abattoirs, de marchés, son de riz, déchets de palmier à huile). Ces recherches ont permis d'identifier des espèces locales de vers de terre présentant un fort potentiel pour le vermicompostage, testées pour leur adaptabilité et leur capacité de reproduction.



Les travaux ont également conduit à l'élaboration de guides techniques et à la diffusion progressive de cette technologie auprès d'institutions et d'entreprises intéressées. Selon Micael Beun, le vermicompostage présente un fort potentiel pour améliorer la santé des sols tout en contribuant à la gestion des déchets organiques, ce qui constitue un enjeu majeur pour le Burundi.

Il souligne enfin que cette technologie représente une opportunité stratégique pour les agriculteurs et les entrepreneurs, et appelle à une réflexion collective sur les stratégies de vulgarisation et de diffusion à grande échelle. Il conclut en saluant la qualité du partenariat entre l'IFDC, l'Université de Ngozi et l'ENS, ainsi que l'importance de ce forum pour promouvoir une agriculture durable au Burundi.



Discours d'ouverture

de monsieur le

Secrétaire Permanent au

Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage



Dans son discours d'ouverture, le Secrétaire Permanent au Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage souhaite la bienvenue aux autorités, partenaires et participants au Forum national sur le vermicompostage. Il exprime sa satisfaction de voir cet événement organisé sous le patronage du ministère, en collaboration avec l'Université de Ngozi, l'ENS et l'IFDC, et remercie les participants pour leur engagement en faveur d'une agriculture durable.



Il met en lumière les défis majeurs auxquels fait face le Burundi, notamment la **dégradation progressive de la fertilité des sols et la demande croissante en production alimentaire** liée à l'augmentation de la population. Il souligne que la majorité des terres agricoles sont appauvries en matière organique, une situation aggravée par l'érosion, la surexploitation, l'usage excessif d'intrants chimiques et la mauvaise gestion des déchets et résidus organiques.



Dans ce contexte, il insiste sur le potentiel important des déchets organiques produits dans le pays, souvent sous-exploités, qui pourraient être valorisés pour améliorer la fertilité des sols. Il présente le vermicompostage comme **une solution innovante, écologique et accessible**, permettant de transformer ces déchets en fertilisant naturel de haute qualité, bénéfique pour les sols et les cultures.

AVANCES SIGNIFICATIVES DU PROJET DE RECHERCHE

Le discours met en avant les avancées significatives du projet de recherche sur le vermicompostage, piloté par le ministère en collaboration avec les institutions académiques. Parmi les réalisations majeures figurent :



l'inventaire national des déchets organiques valorisables,



l'identification et la multiplication de vers de terre indigènes adaptés,



l'optimisation du procédé de vermicompostage,



la validation de la qualité agronomique du vermicompost,



ainsi que les actions de formation et de diffusion de la technologie.



Il souligne que ces résultats constituent une base solide pour le développement à grande échelle du vermicompostage au Burundi. Le forum est ainsi présenté comme un cadre stratégique de réflexion et de concertation, visant à élaborer **une approche nationale cohérente** pour la diffusion de cette technologie.

Trois axes principaux de réflexion sont proposés aux participants

1



la valorisation et la cartographie des déchets organiques disponibles ;

2



la multiplication et la diffusion des vers de terre indigènes ;

3



la formation, le transfert et la vulgarisation de la technologie.

Le Secrétaire Permanent réaffirme l'engagement du Gouvernement à promouvoir le vermicompostage dans le cadre des politiques nationales de développement, notamment en lien avec le Plan National de Développement et la vision Burundi 2040–2060. Il annonce l'intégration de cette technologie dans les programmes de formation agricole, les initiatives communautaires, les stratégies de gestion des déchets et les projets d'économie verte.

Il encourage également les initiatives des jeunes, des entreprises et des coopératives, ainsi que le renforcement des partenariats et des mécanismes de financement pour soutenir le développement de cette filière.

En conclusion, il souligne que ce forum constitue une étape importante vers une agriculture durable et innovante, où les déchets deviennent des ressources et où la recherche se transforme en actions concrètes. Il lance un appel à l'engagement collectif de tous les acteurs et déclare officiellement ouvert le Forum national sur le vermicompostage.





Comparaison des avantages et limites dans le contexte du Burundi des techniques potentielles de valorisation des déchets et résidus organiques : **une revue de littérature**



Eric Gilbert Kazitsa¹, Bonaventure Minani², Gustave Nkurunziza³, Salvator Kaboneka⁴, Cyrille Hicintuka⁵, Jacques Banyaka⁶, Micael Beun⁷, Oscar Nduwimana⁷



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CReSP) ;



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)



Université Polytechnique de Gitega
Faculté des Sciences Environnementales



Université du Burundi, Faculté
d'Agronomie et de Bio-ingénierie



Institut des Sciences Agronomiques du
Burundi (ISABU)



Ministère de l'Environnement, de
l'Agriculture, de l'Élevage, Direction de la
Fertilisation des Sols



International Fertilizer Development
Center (IFDC), Projet d'Appui à une
Gestion Responsable et Intégrée des Sols
(PAGRIS)



Résumé

La génération croissante de déchets et résidus organiques issus notamment de l'agriculture, l'agro-industrie et des villes pose des défis en matière de gestion environnementale et des ressources à l'échelle mondiale.

Dans de nombreux pays en développement, y compris le Burundi, la gestion inadéquate de ces déchets et résidus organiques entraîne pollution des eaux, des émissions de gaz à effet de serre et perte de nutriments qu'ils contiennent alors que réclamés par l'agriculture.

Les technologies de valorisation—telles que le compostage, la digestion anaérobie, la conversion thermochimique, la bioconversion par insectes et le vermicompostage—offrent des voies pour transformer les déchets et résidus biodégradables en produits à valeur ajoutée tels que des composts, le biochar, l'énergie renouvelable, etc.

Parmi celles-ci, le vermicompostage s'avère particulièrement prometteur en raison de ses faibles exigences techniques, de sa durabilité environnementale et de sa capacité à produire un compost de haute qualité.

Cette revue évalue les techniques de valorisation actuelles, en mettant en lumière les avantages comparatifs du vermicompostage, avec un focus sur ses applications potentiels au Burundi. Nous discutons aussi des espèces de vers de terre adaptées à cette technologie, notamment l'espèce *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), reconnue pour son efficacité de traitement élevée et sa présence naturelle en Afrique tropicale. De plus, cet article examine les avantages et inconvénients d'utiliser espèces de vers de terre locales *versus* introduites et identifie les lacunes de recherche critiques pour le développement de systèmes de vermicompostage au Burundi. L'analyse souligne le vermicompostage comme un outil stratégique pour la gestion durable des déchets et résidus organiques, la restauration des sols et la promotion d'une bioéconomie circulaire dans les systèmes agricoles tropicaux.

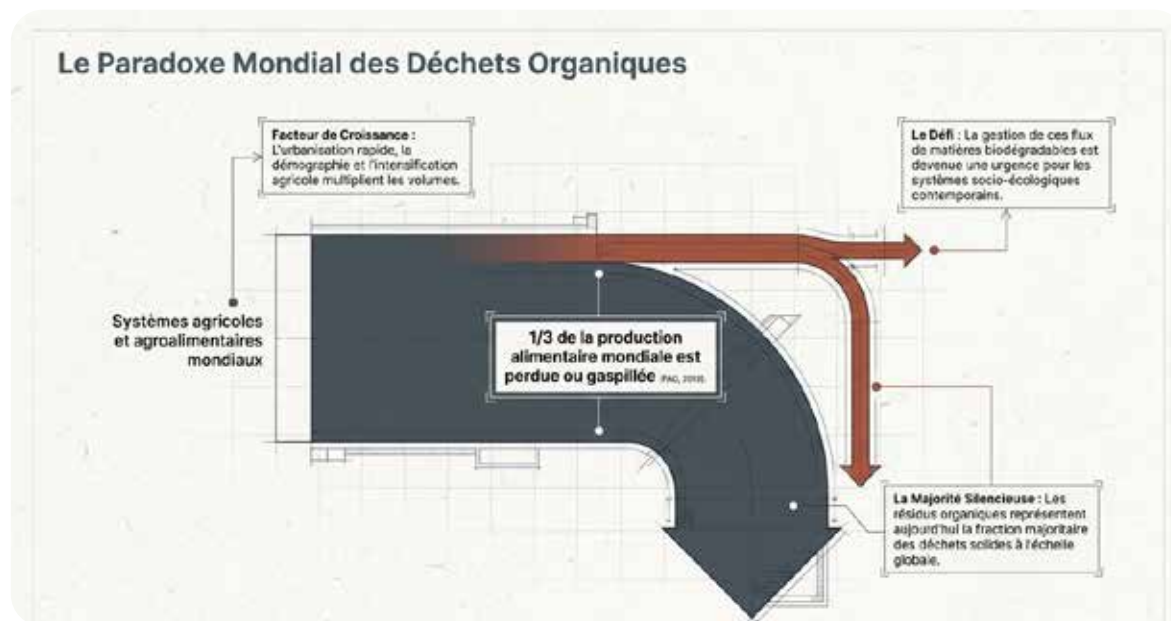
Mots-clés

Techniques, Valorisation des déchets et résidus organiques, Vermicompostage, Avantages ; Défis ; Vers de terre, *Eudrilus eugeniae* ; Burundi.



1. Introduction

Au cours des dernières décennies, la production mondiale de déchets et résidus organiques a connu une augmentation marquée, sous l'effet combiné de la croissance démographique, de l'intensification des systèmes agricoles et de l'urbanisation rapide. Les résidus issus de l'agriculture, de l'élevage, de la transformation agroalimentaire et des activités municipales représentent aujourd'hui une fraction majoritaire des déchets solides à l'échelle globale (Kaza et al., 2018 ; Lim et al., 2016). Par ailleurs, près d'un tiers de la production alimentaire mondiale est perdu ou gaspillé, générant d'importants flux de matières biodégradables dont la gestion reste un défi majeur pour les systèmes socio-écologiques contemporains (FAO, 2019).



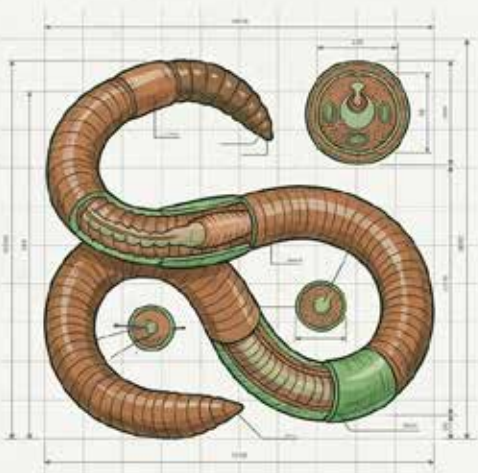
Dans les pays en développement, et en particulier en Afrique subsaharienne, les systèmes de gestion des déchets organiques demeurent largement insuffisants, tant en termes d'infrastructures que de gouvernance. Le Burundi illustre de manière particulièrement aiguë cette problématique. À Bujumbura, principale agglomération urbaine du pays, seule une fraction limitée des déchets solides est effectivement collectée, tandis que la majorité est abandonnée dans des environnements ouverts tels que les vallées, les caniveaux ou les cours d'eau (Ngabirano et al., 2026 ; Banque mondiale, 2024). Ces pratiques contribuent à la dégradation de la qualité des eaux, à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, notamment sous forme de méthane, ainsi qu'à la prolifération d'organismes pathogènes, avec des implications directes pour la santé publique. Elles traduisent également une perte significative de nutriments qui pourraient être valorisés dans les systèmes agricoles locaux (Hoorneweg & Bhada-Tata, 2012 ; Sharma & Garg, 2019).

Cependant, au-delà de leur statut de résidus, les déchets organiques constituent un réservoir important de matière organique et d'éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Leur valorisation représente ainsi une opportunité stratégique pour renforcer la fertilité des sols et réduire la dépendance aux intrants minéraux (Edwards et al., 2011 ; Domínguez & Edwards, 2011). Cette question revêt une importance particulière dans le contexte burundais, où l'agriculture, majoritairement de subsistance, reste fortement contrainte par la dégradation des sols, l'acidité élevée et le coût élevé des engrais minéraux importés (Place et al., 2013 ; Banque mondiale, 2024). La perte annuelle de sol liée à l'érosion, estimée à plusieurs dizaines de millions de tonnes, souligne l'urgence de développer des stratégies de gestion durable de la fertilité des sols.

Dans ce contexte, les technologies de valorisation des déchets organiques apparaissent comme des leviers essentiels pour articuler gestion environnementale et production agricole. Parmi celles-ci, le compostage, la digestion anaérobie, la conversion thermochimique et la bioconversion par insectes ont fait l'objet de nombreux travaux, avec des niveaux de maturité technologique et des exigences opérationnelles variables (Bernal et al., 2009 ; Appels et al., 2011 ; Lehmann & Joseph, 2015 ; Diener et al., 2011). Toutefois, leur transférabilité dans des contextes à faibles ressources, comme celui du Burundi, reste souvent limitée par des contraintes économiques, techniques ou organisationnelles.

Le vermicompostage, qui repose sur l'action conjointe des vers de terre et des microorganismes pour transformer la matière organique, est de plus en plus considéré comme une alternative pertinente dans les systèmes agricoles tropicaux. Plusieurs travaux suggèrent que cette technologie permet une stabilisation relativement rapide des déchets et résidus organiques tout en produisant un amendement riche en nutriments assimilables, en composés humiques et en microorganismes bénéfiques (Domínguez & Edwards, 2011 ; Lazcano & Domínguez, 2011). Néanmoins, les performances de cette technologie dépendent fortement des conditions locales, notamment du type de substrat, des paramètres environnementaux et des espèces de vers de terre utilisées. À ce titre, l'espèce *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), largement distribuée en Afrique tropicale, est souvent citée comme particulièrement adaptée aux conditions chaudes et humides (Blakemore, 2015), bien que son potentiel reste encore insuffisamment documenté dans des contextes spécifiques tels que celui du Burundi.

Le Champion Local : *Eudrilus eugeniae*

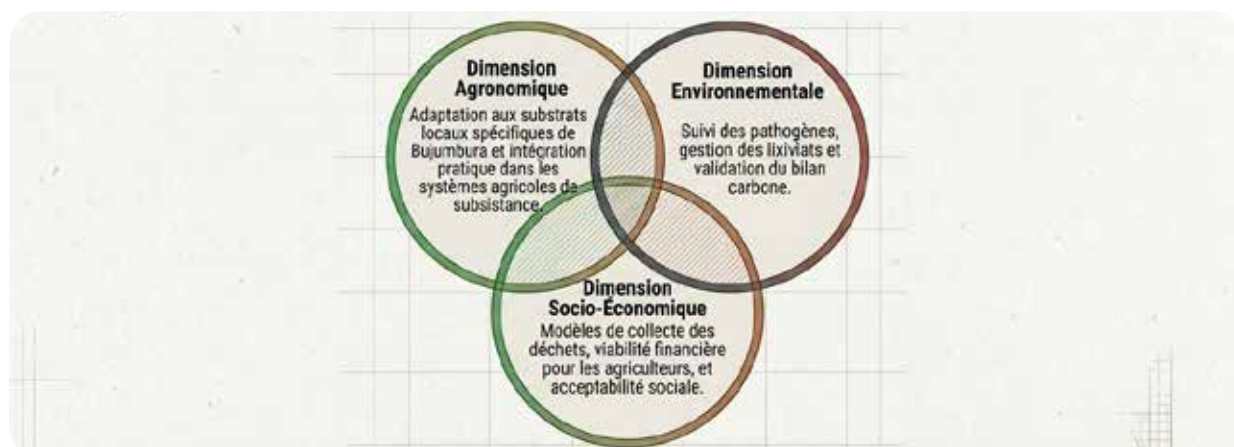


Technical Specifications	
	Taxonomie : <i>Eudrilus eugeniae</i> (Kinberg, 1867).
	Origine : Endémique de l'Afrique tropicale.
	Profil Thermique : Parfaitement adaptée aux conditions chaudes et humides.

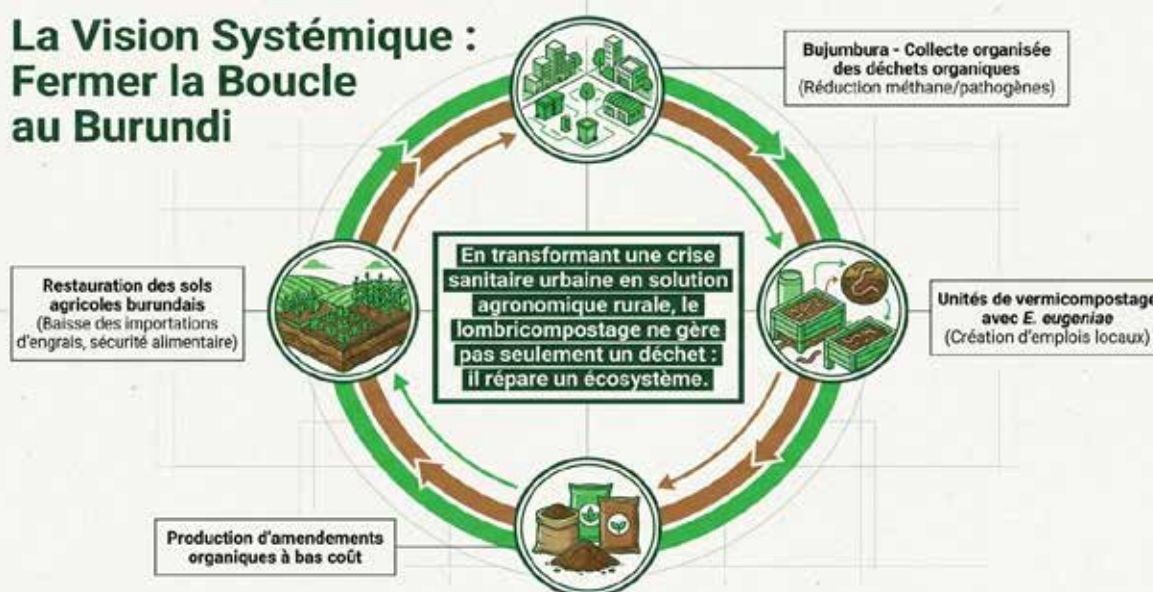
L'importance de l'endémisme

Les performances du système dépendent des paramètres environnementaux. Privilégier une **espèce locale** (*E. eugeniae*) face aux espèces introduites garantit une meilleure **résilience écologique** et une adéquation parfaite avec le climat burundais (Blakemore, 2015).

Malgré l'intérêt croissant pour le vermicompostage, peu d'études ont proposé une analyse comparative approfondie de ses avantages et limites par rapport aux autres techniques de valorisation dans un contexte localisé, intégrant à la fois des dimensions agronomiques, environnementales et socio-économiques. En particulier, les questions liées au choix des espèces de vers de terre (locales versus introduites), à l'adaptation aux substrats disponibles et à l'intégration dans les systèmes agricoles restent encore largement ouvertes. Dans cette perspective, la présente revue vise à analyser de manière critique les principales techniques de valorisation des déchets organiques, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites dans le contexte spécifique du Burundi. Une attention particulière est accordée au vermicompostage, en tant que technologie potentiellement accessible et adaptée aux systèmes agricoles tropicaux, ainsi qu'aux conditions nécessaires à son développement durable.



La Vision Systémique : Fermer la Boucle au Burundi



2. Techniques de valorisation des déchets organiques



La valorisation des déchets organiques regroupe un ensemble de procédés biologiques, biochimiques et thermochimiques visant à transformer des matières biodégradables en produits à valeur ajoutée tels que des amendements organiques, de l'énergie ou des intrants agricoles. Si ces technologies sont bien documentées à l'échelle globale, leur pertinence varie fortement selon les contextes socio-économiques, les contraintes techniques et les objectifs agronomiques poursuivis (Bernal et al., 2009 ; Lim et al., 2016). Dans un pays comme le Burundi, caractérisé par une forte pression sur les terres agricoles et un accès limité aux intrants, la question n'est pas uniquement celle de l'efficacité technique, mais aussi celle de l'accessibilité, de la reproductibilité et de l'intégration dans les systèmes agricoles locaux.

Dans cette perspective, les principales technologies de valorisation peuvent être analysées non seulement en fonction de leurs performances intrinsèques, mais également au regard de leur adéquation aux réalités locales, notamment en termes de coûts, de besoins en infrastructures et de capacité à restituer rapidement des nutriments aux sols.

2.1 Compostage conventionnel

Le compostage conventionnel (ou thermophilique, traditionnel) constitue l'une des approches les plus largement utilisées pour le traitement des déchets organiques. Il repose sur une décomposition assurée par des microorganismes, conduisant à la formation de matière organique stabilisée et humifiée (Bernal et al., 2009). Ce processus est reconnu pour ses effets positifs sur la structure du sol, la capacité de rétention en eau et l'activité biologique (Insam & de Bertoldi, 2007).

À l'échelle internationale, le compostage est largement intégré dans les stratégies de gestion des déchets municipaux et agricoles, notamment en Europe et en Asie, où il contribue à réduire les volumes de déchets mis en décharge tout en favorisant le recyclage des nutriments (Hargreaves et al., 2008). Cependant, ces systèmes reposent souvent sur des infrastructures relativement structurées et sur une gestion technique rigoureuse.

Dans les contextes à faibles ressources, plusieurs limites apparaissent. D'une part, le processus peut être relativement lent, nécessitant plusieurs mois pour atteindre une stabilisation satisfaisante. D'autre part, des pertes importantes de nutriments, en particulier de l'azote sous forme d'ammoniac, peuvent survenir en l'absence de contrôle des conditions de compostage (Lim et al., 2016). Enfin, la manipulation régulière des tas (retournement, arrosage) représente une contrainte en main-d'œuvre non négligeable.

Ainsi, bien que le compostage soit techniquement accessible, son efficacité dans les systèmes agricoles burundais dépend fortement de la maîtrise des conditions de mise en œuvre, ce qui peut constituer un frein à son adoption à grande échelle.

2.2 Digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un procédé biochimique qui permet la dégradation de la matière organique en absence d'oxygène, produisant simultanément du biogaz – principalement constitué de méthane – et un résidu organique appelé digestat (Appels et al., 2011 ; Mata-Alvarez et al., 2014). Cette double valorisation, énergétique et agronomique, en fait une technologie particulièrement attractive dans une perspective d'économie circulaire.

Dans plusieurs pays, notamment en Europe et en Asie, la digestion anaérobie a été déployée à grande échelle, contribuant à la production d'énergie renouvelable et à la gestion des effluents d'élevage (Weiland, 2010 ; Bond & Templeton, 2011). Toutefois, ces systèmes reposent généralement sur des investissements initiaux importants, ainsi que sur une expertise technique pour le fonctionnement et la maintenance des digesteurs.

Dans le contexte burundais, ces exigences constituent des contraintes majeures. L'accès au financement, la disponibilité de compétences techniques et la gestion des infrastructures énergétiques restent limités, en particulier dans les zones rurales. De plus, la valorisation agronomique du digestat nécessite souvent un traitement complémentaire pour en stabiliser les propriétés et éviter les risques phytotoxiques.

Par ailleurs, la mobilisation des substrats pour la digestion anaérobie peut entrer en concurrence avec d'autres usages agricoles, notamment le compostage ou l'alimentation animale. Ainsi, malgré son potentiel, la digestion anaérobie apparaît difficilement généralisable sans adaptations technologiques significatives aux réalités locales.

2.3 Conversion thermochimique

Les procédés thermochimiques, tels que la pyrolyse, permettent la transformation de la biomasse en produits énergétiques et en biochar par chauffage en conditions contrôlées d'oxygène (Lehmann & Joseph, 2015). Le biochar suscite un intérêt croissant en raison de sa capacité à améliorer certaines propriétés des sols, notamment la rétention d'eau et la stabilité du carbone.

Des études ont montré que l'application de biochar peut contribuer à l'augmentation des rendements agricoles dans certains contextes tropicaux, en particulier sur des sols dégradés (Jeffery et al., 2017). Toutefois, ces effets restent variables et dépendent fortement du type de biomasse utilisée, des conditions de pyrolyse et des caractéristiques du sol récepteur.

Dans les pays à faibles ressources, la principale limite réside dans l'accès aux équipements nécessaires pour une production contrôlée et sécurisée du biochar. En outre, les besoins énergétiques et les connaissances techniques requises pour maîtriser ces procédés peuvent limiter leur diffusion à petite échelle.

Ainsi, bien que prometteuse sur le plan agronomique et environnemental, la conversion thermochimique reste, dans l'état actuel, peu accessible aux petits exploitants agricoles burundais.

2.4 Bioconversion par insectes

La bioconversion par insectes, notamment à l'aide des larves de mouche soldat noire (*Hermetia illucens*), constitue une approche émergente dans la valorisation des déchets organiques. Ces larves sont capables de convertir rapidement une grande variété de substrats en biomasse riche en protéines, utilisable en alimentation animale, ainsi qu'en résidus organiques valorisables comme fertilisants (Diener et al., 2011 ; van Huis, 2013).

Cette technologie a fait l'objet d'applications pilotes dans plusieurs pays africains, avec des résultats prometteurs en termes de réduction des volumes de déchets et de production de ressources alternatives pour l'élevage (Makkar et al., 2014). Elle présente également l'avantage d'une transformation relativement rapide par rapport aux procédés biologiques classiques.

Cependant, son développement reste confronté à plusieurs incertitudes. Les conditions optimales de production varient selon les substrats et les environnements, et les cadres réglementaires liés à l'utilisation des insectes dans les chaînes alimentaires restent encore en construction dans de nombreux pays. De plus, l'acceptabilité sociale et les contraintes techniques liées à l'élevage d'insectes peuvent limiter son adoption à court terme.

2.5. Vermicompostage

Le vermicompostage (aussi appelé lombricompostage) est un processus de transformation bio-oxydative de la matière organique impliquant l'action conjointe des vers de terre et des communautés microbiennes. Contrairement au compostage conventionnel, où la décomposition est principalement assurée par les microorganismes, le vermicompostage repose sur une interaction étroite entre fragmentation physique, digestion biologique et stimulation de l'activité microbienne dans le tube digestif des vers de terre (Edwards et al., 2011 ; Domínguez & Edwards, 2011).

Au cours de ce processus, les vers de terre ingèrent la matière organique partiellement décomposée, la transforment par des mécanismes enzymatiques et microbiens, puis excrètent des turricules stabilisés. Ces derniers présentent généralement une structure plus fine, une surface spécifique élevée et une concentration accrue en nutriments assimilables. Cette transformation s'accompagne d'une modification qualitative des communautés microbiennes, souvent associée à une augmentation de leur activité fonctionnelle.

Cependant, les mécanismes impliqués restent partiellement débattus. Certaines études attribuent les effets du vermicompost à l'enrichissement en substances humiques et en microorganismes bénéfiques, tandis que d'autres mettent en avant la production de composés bioactifs d'origine microbienne (Lazcano & Domínguez, 2011). Il est ainsi probable que les bénéfices observés résultent d'interactions complexes entre processus physiques, chimiques et biologiques, dont l'importance relative dépend des conditions de production.

De nombreuses études rapportent des effets positifs du vermicompost sur la croissance et la productivité des cultures. Des augmentations significatives de rendement ont notamment été observées dans des systèmes maraîchers amendés avec du vermicompost issu de fumier ou de déchets organiques (Arancon et al., 2004 ; Suthar, 2009). Ces effets sont généralement associés à une amélioration de la disponibilité des nutriments, de la structure du sol et de l'activité microbienne.

Par ailleurs, certains travaux suggèrent un rôle du vermicompost dans l'amélioration de la tolérance des plantes à des stress abiotiques et biotiques, tels que la sécheresse ou certaines maladies (Arancon et al., 2007 ; Atiyeh et al., 2002). Toutefois, ces résultats restent variables et dépendent fortement des conditions expérimentales, des cultures étudiées et de la qualité du vermicompost.

Le vermicompostage présente également des limites. Il est sensible aux conditions environnementales, notamment la température, l'humidité et la qualité des substrats. Des conditions inadéquates peuvent entraîner une diminution de l'activité des vers de terre, voire leur mortalité. De plus, certains substrats riches en composés lignifiés ou potentiellement toxiques nécessitent un prétraitement.

Ainsi, le vermicompostage doit être considéré comme une technologie performante mais conditionnelle, nécessitant une adaptation aux contextes locaux.

Comparé aux autres techniques de valorisation, le vermicompostage présente un positionnement intermédiaire. Il ne produit pas d'énergie, contrairement à la digestion anaérobie, mais génère un amendement organique généralement plus biologiquement actif. Par rapport au compostage conventionnel, il tend à produire un fertilisant plus riche en microorganismes et en composés bioactifs, bien que ces différences dépendent des conditions de production.

Contrairement à la conversion thermochimique, il ne permet pas une stabilisation durable du carbone, mais favorise une dynamique biologique plus active dans les sols. Enfin, par rapport à la bioconversion par insectes, il présente une vitesse de transformation plus lente, mais produit un amendement directement utilisable en agriculture.

Ces éléments suggèrent que le vermicompostage doit être envisagé comme complémentaire aux autres technologies, dans une logique d'intégration des systèmes de gestion des déchets organiques.

Afin de mettre en perspective les différentes approches présentées, une comparaison synthétique des principales techniques de valorisation des déchets organiques est proposée dans le Tableau 1. Cette synthèse met en évidence les compromis entre performances techniques, exigences opérationnelles et accessibilité dans le contexte burundais.

Tableau 1.1

Comparaison des principales techniques de valorisation des déchets organiques dans le contexte du Burundi

 TECHNIQUE	 AVANTAGES	 INCONVÉNIENTS	 RÉFÉRENCES
 Compostage conventionnel	Technologie simple ; amélioration de la structure du sol ; large applicabilité	Processus lent ; pertes de nutriments ; besoin de main-d'œuvre ; qualité variable	Bernal et al., 2009 ; Insam & de Bertoldi, 2007 ; Lim et al., 2016
 Digestion anaérobie	Production de biogaz ; valorisation énergétique ; digestat fertilisant	Coût élevé ; technicité ; maintenance ; risques liés au digestat	Appels et al., 2011 ; Mata-Alvarez et al., 2014 ; Weiland, 2010
 Conversion thermochimique	Production de biochar ; séquestration du carbone ; amélioration des sols	Équipements coûteux ; besoins énergétiques ; accessibilité limitée	Lehmann & Joseph, 2015 ; Jeffery et al., 2017
 Bioconversion par insectes	Transformation rapide ; production de protéines ; réduction des déchets	Technologie émergente ; contraintes techniques ; acceptabilité sociale	Diener et al., 2011 ; van Huis, 2013 ; Makkar et al., 2014
 Vermicompostage	Biofertilisant de haute qualité ; faible coût ; adaptabilité ; activité biologique élevée	Sensibilité aux conditions ; dépendance aux espèces ; prétraitement requis	Edwards et al., 2011 ; Dominguez & Edwards, 2011 ; Sharma & Garg, 2019



L'analyse comparative met en évidence un compromis récurrent entre complexité technologique et accessibilité. Les approches les plus intensives en capital et en connaissances, telles que la digestion anaérobie et la conversion thermochimique, offrent des avantages spécifiques mais restent difficilement accessibles dans les contextes à faibles ressources.

À l'inverse, les approches biologiques apparaissent plus compatibles avec les réalités locales, bien qu'elles présentent certaines limites en termes de contrôle des processus et de rapidité de transformation.

Dans ce cadre, le vermicompostage se distingue par une combinaison potentielle d'accessibilité, d'efficacité biologique et de qualité des produits obtenus. Toutefois, cette hypothèse nécessite une analyse plus approfondie, en particulier en ce qui concerne les conditions de mise en œuvre et les facteurs biologiques impliqués, notamment le choix des espèces de vers de terre.

3. Conditions de vermicompostage

Dans les environnements tropicaux, les conditions climatiques peuvent être favorables au vermicompostage, notamment en raison de températures généralement comprises dans les plages optimales pour de nombreuses espèces épigées (20–30 °C). Toutefois, ces conditions peuvent devenir limitantes en cas d'excès, notamment lors de sécheresses ou de précipitations intenses.

La nature des substrats disponibles constitue également un facteur déterminant. Au Burundi, les résidus agricoles, les déjections animales et les déchets de marchés présentent des compositions variables (rapport C/N, pH, composés secondaires) susceptibles d'influencer la croissance des vers de terre et la qualité du produit final.

4. Techniques de vermicompostage et implications

Le vermicompostage ne constitue pas une technologie uniforme. Il existe une diversité de systèmes dont les exigences techniques, les coûts d'investissement et les performances varient considérablement. Le niveau d'investissement dépend ainsi fortement du type de système adopté, du degré de contrôle recherché et de l'échelle de production.

Les systèmes extensifs, basés sur des andains en plein air, des fosses ou des bacs simples, sont caractérisés par une forte accessibilité et de faibles coûts. À l'inverse, les systèmes intensifs, reposant sur des dispositifs contrôlés (réacteurs, flux continu), nécessitent des investissements plus importants et une expertise technique avancée. Entre ces deux extrêmes, les systèmes semi-intensifs offrent un compromis intéressant en termes de contrôle et de performance. Une comparaison détaillée des systèmes de vermicompostage est présentée dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2

Comparaison synthétique des systèmes de vermicompostage



Type de système	Exemples de techniques et équipements	Niveau de contrôle et technicité	Investissement	Avantages	Limites	Applications	Référence(s)
 Extensif	Andains en plein air ; fosses ; bacs simples ; matériaux locaux	Faible contrôle ; technicité minimale	Très faible	• Très accessible • Faible coût • Adapté aux petits exploitants	• Forte dépendance climatique • Variabilité élevée • Risque de pertes de vers de terre	Ménages ruraux ; petites exploitations 	Edwards et al., 2011 ; Dominguez & Edwards, 2011
 Semi-intensif	Lits surélevés ; andains améliorés ; bacs compartimentés ; structures couvertes	Contrôle modéré ; technicité intermédiaire	Modéré	• Meilleur contrôle • Production homogène • Bon compromis coût/performance	• Besoin de suivi régulier • Main-d'œuvre plus importante	Fermes ; coopératives 	Edwards et al., 2011 ; Sharma & Garg, 2019
 Intensif	Réacteurs ; systèmes à flux continu ; mécanisation ; capteurs	Contrôle élevé ; forte technicité	Élevé	• Productivité élevée • Processus optimisé • Standardisation	• Coûts élevés • Maintenance complexe • Accès limité	Agro-industrie ; production commerciale 	Edwards et al., 2011 ; Sharma & Garg, 2019



5. Choix d'espèces de vers de terre à utiliser en vermicompostage

Toutes les espèces de vers de terre ne sont pas adaptées au vermicompostage. Seul un nombre limité d'espèces, principalement du groupe écologique épigéique, est couramment utilisé dans les systèmes de vermicompostage (Edwards & Bohlen, 1996). Ces espèces habitent naturellement les couches de litière organique et se nourrissent de matière organique en décomposition.

Les espèces candidates au vermicompostage incluent :

- *Eisenia fetida*
- *Eisenia andrei*
- *Eudrilus eugeniae*
- *Perionyx excavatus*
- *Lumbricus rubellus*

Ces espèces se caractérisent par des taux de reproduction élevés, une croissance rapide et une forte tolérance aux déchets organiques (Domínguez & Edwards, 2011). Cependant, la plupart des systèmes de vermicompostage dans le monde reposent sur des espèces originaires de régions tempérées, dont les performances dans les environnements tropicaux peuvent varier selon les conditions climatiques locales et les caractéristiques des substrats.

Le choix des espèces de vers de terre est un facteur critique pour le succès des systèmes de vermicompostage. De nombreuses opérations commerciales de vermicompostage reposent sur des espèces exotiques telles que *Eisenia fetida*, largement diffusée pour le vermicompostage (Edwards et al., 2011).

Cependant, l'introduction de vers de terre non indigènes peut poser des risques écologiques, notamment la concurrence avec les espèces locales et des perturbations potentielles des écosystèmes (Hendrix et al., 2008).

L'utilisation d'espèces locales adaptées peut offrir plusieurs avantages. Les espèces indigènes renferment une grande variabilité génétique, sont généralement mieux adaptées aux conditions environnementales locales, notamment le climat, les propriétés du sol et les substrats organiques disponibles. De plus, leur utilisation réduit le risque de perturbation écologique liée aux invasions biologiques.

Malgré ces avantages potentiels, la diversité et l'écologie des vers de terre africains restent peu étudiées, et peu de recherches ont exploré leur potentiel pour le vermicompostage. Développer la recherche dans ce domaine pourrait soutenir la mise en place de systèmes de vermicompostage locaux, appropriés et à faible risque.

Eudrilus eugeniae, communément appelé ver africain de nuit, est l'une des espèces les plus prometteuses pour le vermicompostage tropical. Originaire d'Afrique tropicale, cette espèce présente une croissance rapide, une capacité reproductive élevée et un fort taux de consommation de déchets organiques (Edwards et al., 2011). Sa croissance optimale se situe entre 25 et 30 °C, ce qui la rend bien adaptée aux climats tropicaux (Domínguez & Edwards, 2011).

De nombreuses études ont démontré l'efficacité de *E. eugeniae* dans le traitement de divers substrats organiques, notamment le fumier d'élevage, les résidus de cultures et les déchets alimentaires (Suthar, 2009 ; Sharma & Garg, 2019). Le vermicompost produit par cette espèce est riche en nutriments assimilables par les plantes et en microorganismes bénéfiques, améliorant significativement la fertilité du sol et la performance des cultures.

Selon Blakemore (2015), l'aire de répartition de *E. eugeniae* inclut plusieurs régions d'Afrique tropicale, suggérant qu'elle peut se trouver naturellement ou être écologiquement compatible avec les environnements burundais, ce qui en fait un candidat approprié pour les initiatives locales de vermicompostage.

6. Développer le vermicompostage au Burundi



6.1 Opportunités

Le Burundi présente plusieurs caractéristiques rendant le vermicompostage particulièrement attractif pour la gestion des déchets et résidus organiques pour la restauration des sols :

1. Le pays génère de grandes quantités de résidus organiques issus notamment de l'agriculture, de l'élevage, de la transformation agro-industrielle et des marchés urbains.
2. Le déclin de la fertilité des sols constitue un obstacle majeur à la productivité agricole. Le vermicompost pourrait fournir un engrais organique abordable et produit localement pour restaurer la santé des sols et la disponibilité des nutriments.
3. Les technologies de vermicompostage peuvent être mises en œuvre à différentes échelles, allant des systèmes domestiques aux initiatives industrielles et communautaires de gestion des déchets, offrant flexibilité et adaptabilité pour les petits exploitants comme pour les industriels.

Ces facteurs positionnent collectivement le vermicompostage comme un outil stratégique pour améliorer la fertilité des sols, réduire les déchets et soutenir les initiatives de bioéconomie circulaire au Burundi et dans d'autres pays tropicaux.

6.2. Défis de recherche et orientations futures

Malgré son potentiel prometteur, le développement du vermicompostage au Burundi fait face à plusieurs défis :

- Les informations sur la diversité et les caractéristiques écologiques des espèces locales de vers de terre et leur aptitude aux systèmes de vermicompostage sont limitées.
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la pertinence des substrats organiques locaux pour le vermicompostage et leurs effets sur la croissance, la reproduction des vers de terre et la qualité du vermicompost.
- Les études doivent explorer l'optimisation des systèmes de vermicompostage dans les conditions climatiques locales, y compris température, humidité et variabilité saisonnière.
- L'intégration du vermicompostage dans des stratégies agricoles durables plus larges reste peu explorée, notamment son rôle dans le cycle des nutriments, la résilience climatique et les moyens de subsistance des petits exploitants.

Les recherches futures devraient prioriser les espèces de vers de terre adaptées localement, les combinaisons de substrats efficaces et des cadres pratiques pour des systèmes de vermicompostage évolutifs et peu coûteux, garantissant à la fois sécurité écologique et bénéfices socio-économiques.

Conclusion



Le vermicompostage représente une stratégie innovante et durable de valorisation des déchets et résidus organiques au Burundi. Comparé au compostage conventionnel, à la digestion anaérobie, à la conversion thermochimique et à la bioconversion par insectes, le vermicompostage présente des avantages uniques : stabilisation rapide de la matière organique, forte activité biologique, production de biofertilisant riche en nutriments, adaptabilité aux systèmes décentralisés et promotion de la bioéconomie circulaire.

L'utilisation de vers de terre composteurs tropicaux, en particulier *Eudrilus eugeniae*, offre des avantages supplémentaires grâce à leur croissance rapide, leur efficacité reproductive et leur compatibilité avec les conditions tropicales locales. Bien que des espèces exotiques comme *Eisenia fetida* soient encore largement utilisées, les vers de terre adaptés localement offrent sécurité écologique et résilience potentielle dans les conditions environnementales burundaises.

L'abondance des déchets et résidus agricoles et urbains au Burundi, combinée aux défis de fertilité des sols, fait du vermicompostage un outil particulièrement prometteur pour améliorer la santé des sols, recycler les nutriments et soutenir une agriculture résiliente au climat. Cependant, sa mise en œuvre réussie nécessite de combler les lacunes de recherche, notamment l'identification des espèces locales de vers de terre, l'évaluation des substrats disponibles, l'optimisation des pratiques de vermicompostage et l'intégration dans des stratégies agricoles durables.

En conclusion, le vermicompostage conjugue innovation, durabilité environnementale et viabilité socio-économique, représentant une approche stratégique pour transformer les déchets et résidus organiques en biofertilisants de haute qualité, soutenant à la fois les moyens de subsistance des petits exploitants et la sécurité alimentaire nationale au Burundi.

Bibliographie

- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Lee, S., & Byrne, R. (2007). Effects of vermicomposts on greenhouse tomato production and quality. *Bioresource Technology*, 98(8), 2456–2465.
- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Atiyeh, R., & Metzger, J. (2004). Effects of vermicomposts on growth and yields of greenhouse tomatoes. *Bioresource Technology*, 93(2), 139–144.
- Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., & Metzger, J. D. (2002). The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*, 84(1), 7–14.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2011). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781.
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.
- Bhat, Z. F., Kumar, S., & Bhat, H. F. (2022). Organic waste valorization: Techniques, applications, and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130513.
- Blakemore, R. J. (2015). Eco-Taxonomic Profile of an Iconic Vermicomposter – the 'African Nightcrawler' Earthworm, *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867). *African Invertebrates*, 56(3), 527–548.
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2489–2495.
- Diener, S., Zurbrugg, C., & Tockner, K. (2011). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 29(9), 824–830.
- Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). *Biology and ecology of earthworms in vermicomposting systems*. CRC Press.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2011). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.
- Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and ecology of earthworms* (3rd ed.). Chapman & Hall.
- FAO. (2019). *The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hargreaves, J. C., Adl, M. S., & Warman, P. R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(1–3), 1–14.
- Hendrix, P. F., Callahan, M. A., Drake, J. M., Huang, C. Y., James, S. W., Snyder, B. A., & Zhang, W. (2008). Pandora's box contained bait: The global problem of introduced earthworms. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 593–613.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global review of solid waste management*. World Bank.
- Insam, H., & de Bertoldi, M. (2007). Microbiology of composting. In A. H. Khan & M. O. Lopez-Real (Eds.), *Composting of solid wastes* (pp. 25–48). Springer.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2017). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.

- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(12), 2555–2565.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology, and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Lim, S. L., Wu, T. Y., Lim, P. N., & Lee, C. T. (2016). Organic waste treatment technologies: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 14(2), 183–213.
- Makkar, H. P., Tran, G., Heuze, V., & Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1–33.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2014). Codigestion of solid wastes: A review of recent developments. *Bioresource Technology*, 172, 2–11.
- Ngabirano, E., Ndihi, J. N., Bigumandondera, P., Nsengiyumva, V., Manirambona, J. B., & Ntavuna, M. N. (2026). National Solid Waste Management Programs and Policies in the City of Bujumbura. *European Scientific Journal, ESJ*, 22(2), 89.
- Place, F., Adesina, A., & Kassie, M. (2013). Improving soil fertility management in sub-Saharan Africa. *World Development*, 42, 54–64.
- Sharma, R., & Garg, V. K. (2019). Vermicomposting of organic waste: Current status and future prospects. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100348.
- Suthar, S. (2009). Vermicomposting of food waste using *Eisenia fetida*: Effects on waste stabilization, microbial dynamics, and nutrient profile. *Bioresource Technology*, 100(11), 5448–5454.
- van Huis, A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual Review of Entomology*, 58, 563–583.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860.
- World Bank. (2024). Burundi: Country environmental analysis. World Bank.
- WFP. (2025). Food security and agricultural livelihoods in Burundi. World Food Program.



Plantes envahissantes, déchets et résidus organiques potentiellement valorisables par vermicompostage au Burundi : une méta-analyse



Eric Gilbert Kazitsa¹, Bonaventure Minani², Gustave Nkurunziza³, Salvator Kaboneka⁴, Cyrille Hicintuka⁵, Jacques Banyaka⁶, Micael Beun⁷, Oscar Nduwimana⁷



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CReSP) ;



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)



Université Polytechnique de Gitega
Faculté des Sciences Environnementales



Université du Burundi, Faculté
d'Agronomie et de Bio-ingénierie



Institut des Sciences Agronomique du
Burundi (ISABU)



Ministère de l'Environnement, de
l'agriculture, de l'Élevage, Direction de la
Fertilisation des Sols



International Fertilizer Development
Center (IFDC), Projet d'Appui à une
Gestion Responsable et Intégrée des Sols
(PAGRIIS)



Résumé

Au Burundi, l'accumulation croissante de déchets et résidus organiques issus des activités agricoles, agro-industrielles, animales et urbaines représente à la fois un risque environnemental et un potentiel inexploité pour le vermicompostage.

Cette méta-analyse synthétise les connaissances sur les plantes, déchets et résidus organiques valorisables par vermicompostage, en mettant l'accent sur leur préparation, la performance des vers de terre et les contraintes spécifiques.

Les cultures vivrières, industrielles, fruitières et légumières, les déchets arborés, papetiers, les plantes envahissantes, ainsi que les fumiers et déchets urbains, offrent un large éventail de substrats utilisables après prétraitement, mélange ou stabilisation du rapport C/N et du pH. Les listes nominatives des plantes

envahissantes, déchets et résidus potentiellement valorisables au Burundi par catégorie sont données en tableaux à la fin.

Les espèces vers de terre candidates pour valoriser ces substrats potentiels comprennent *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* et *Perionyx excavatus*, qui montrent des performances variables selon les substrats, soulignant l'importance de la d'une sélection prudente.

Les résultats de cette étude indiquent que qu'il existe au Burundi une variété de catégories de déchets et résidus organiques potentiellement valorisables par vermicompostage, à condition de les traiter correctement, en assurant un équilibre physicochimique et microbiologique tout en respectant les besoins et la tolérance physiologiques des vers de terre utilisés.

Cette synthèse fournit une base scientifique pour les personnes qui veulent se lancer dans le vermicompostage et pour orienter le développement du vermicompostage au Burundi.

Mots-clés

Burundi, Vermicompostage, Déchets et résidus valorisables par vermicompostage, Inventaire, Comparaison, Vers de terre



1. Introduction

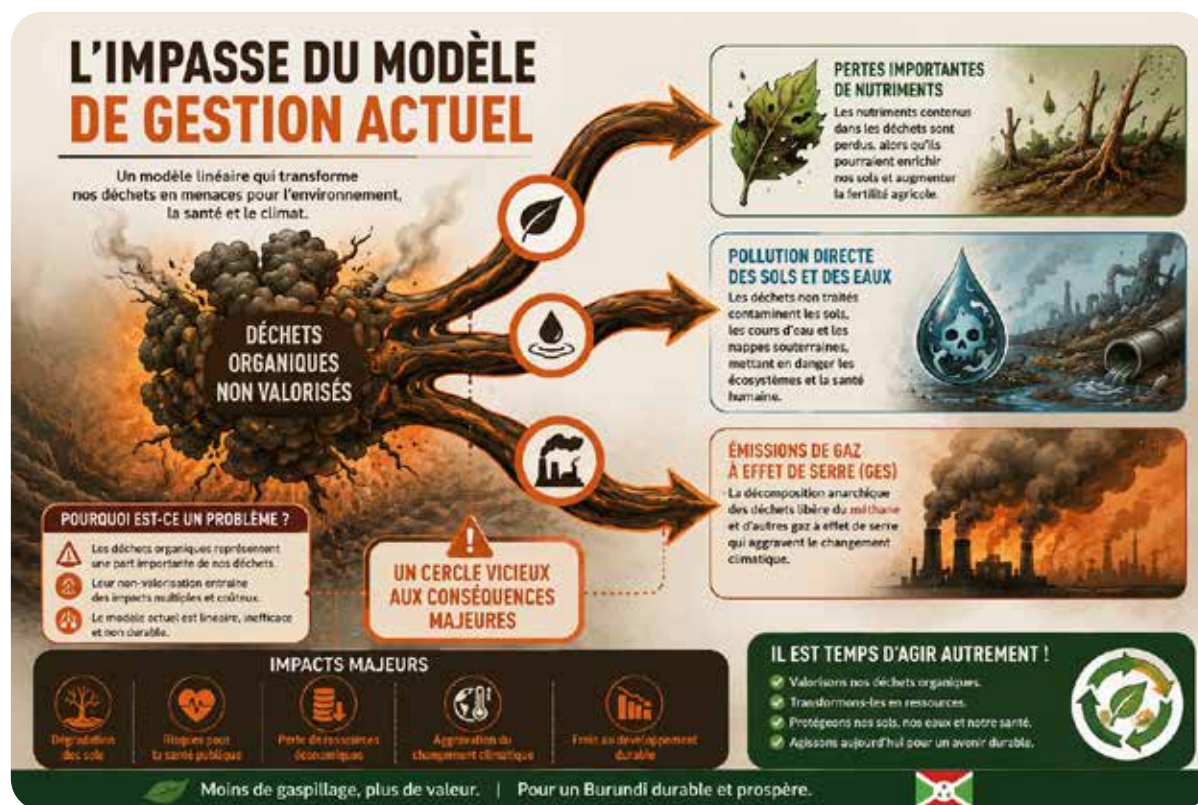
La gestion des déchets et résidus organiques constitue un enjeu majeur dans de nombreux pays en développement, en particulier dans les systèmes agricoles tropicaux caractérisés par une forte dépendance aux ressources naturelles et une pression accrue sur sols arable. Au Burundi, l'augmentation continue des résidus issus des activités agricoles (résidus de cultures, effluents d'élevage), agro-industrielles (pulpe de café, résidus de transformation de banane, déchets de brasserie), déchets municipaux, déchets ménagers et déchets de marchés s'accompagne d'une valorisation encore limitée. Cette situation entraîne des pertes importantes de nutriments, une accumulation de déchets et des impacts environnementaux notables, notamment la pollution des sols et des eaux ainsi que l'émission de gaz à effet de serre (Domínguez & Edwards, 2011 ; Suthar, 2009).



Dans ce contexte, la recherche de solutions durables, accessibles et adaptées aux réalités locales apparaît essentielle. Le vermicompostage s'est imposé comme une approche efficace de bioconversion des déchets et résidus organiques. Ce processus repose sur l'activité conjointe des microorganismes et des vers de terre épigés, capables de transformer une grande diversité de substrats organiques en un amendement stable et riche en éléments nutritifs. Les vermicomposts produits sont reconnus pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, favorisant ainsi la productivité végétale et la résilience des agroécosystèmes (Edwards & Arancon, 2004 ; Lazcano & Domínguez, 2011). De nombreuses études ont démontré l'efficacité de plusieurs espèces de vers de terre dans la transformation de déchets variés, y compris les résidus agricoles, les déchets alimentaires et certains sous-produits industriels (Domínguez, 2004 ; Suthar & Singh, 2008).



Cependant, l'efficacité du vermicompostage dépend fortement de la nature des substrats utilisés, de leur composition physico-chimique et des conditions de mise en œuvre. Tous les déchets et résidus organiques ne présentent pas le même potentiel de valorisation : certains peuvent contenir des composés inhibiteurs, présenter des déséquilibres en carbone et azote, ou nécessiter des prétraitements spécifiques pour être adaptés à l'activité des vers de terre (Ndegwa & Thompson, 2001 ; Lim et al., 2016). Ainsi, l'identification et la caractérisation des biomasses organiques appropriées constituent une étape déterminante pour le développement efficace de cette technologie.



Malgré l'abondance de ressources organiques potentiellement valorisables au Burundi, les connaissances scientifiques synthétiques permettant d'orienter leur utilisation en vermicompostage restent fragmentaires. En particulier, il existe peu d'études intégrées reliant les types de résidus disponibles localement aux performances observées dans d'autres contextes tropicaux comparables. De même, les informations relatives aux méthodes optimales de préparation des substrats organiques (précompostage, ajustement du rapport C/N, gestion de l'humidité et du pH) ainsi qu'aux contraintes potentielles associées à certains résidus demeurent limitées ou dispersées dans la littérature internationale.

Dans ce cadre, une synthèse des données de la littérature apparaît comme une approche pertinente pour consolider les connaissances existantes et fournir une base scientifique solide pour le développement du vermicompostage au Burundi. En s'appuyant sur les expériences menées dans divers pays tropicaux et subtropicaux, il devient possible d'identifier des analogies, d'extrapoler des résultats et de proposer des orientations adaptées au contexte local.

Ainsi, la présente étude vise à inventorier et analyser les plantes, déchets et résidus organiques potentiellement valorisables par vermicompostage et applications connexes au Burundi, à partir des évidences issues de la littérature internationale. Elle s'attache également à décrire les techniques de préparation nécessaires à leur valorisation et à mettre en évidence les contraintes et lacunes de connaissance. En fournissant une synthèse structurée et critique, la présente étude entend contribuer au développement du vermicompostage dans le contexte burundais, en facilitant l'identification de solutions techniquement viables et scientifiquement fondées.

2. Méthodologie

2.1. Stratégie de recherche bibliographique

Une revue systématique de la littérature a été conduite afin d'identifier les plantes, déchets et résidus organiques valorisés par vermicompostage dans des contextes tropicaux et subtropicaux comparables à celui du Burundi. La démarche méthodologique s'inspire des principes des revues systématiques en sciences environnementales (Kitchenham, 2004), adaptés aux études agronomiques.

Les recherches ont été effectuées dans plusieurs bases de données scientifiques internationales, notamment ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, ResearchGate et les bases documentaires du CGIAR. Afin d'assurer une couverture large et pertinente, des combinaisons de mots-clés ont été utilisées en anglais et en français, incluant Vermicompostage/vermicomposting; Vermiculture/vermiculture, vers de terre/earthworms; Déchets organiques/organic waste, Résidus organiques/organic residues, Residus de cultures/Crop residues, Résidues agro-industriel/agro-industrial residues, Plantes envahissantes/invasive plants, Déchets municipaux/municipal wastes, Déchets ménagers/household wastes, domestic wastes, Déchets institutionnels/institutional wastes Déchets alimentaires/food wastes, Déchets de jardin/garden wastes ou yard wastes, Tontes de jardin/garden clippings ou garden wastes ainsi que les noms scientifiques des espèces de vers de terre (*Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* et *Perionyx excavatus*. etc). Chaque fois, une recherche en utilisant ces termes générale était suivie des recherches avec des non spécifiques de déchets, en considérant ceux effectivement rencontrés au Burundi selon nos observations, selon la littérature et les statistiques nationales (INSBU, 2024).

Des opérateurs booléens et des troncatures ont été appliqués afin d'optimiser la sensibilité et la spécificité des requêtes. Cette approche s'inspire des recommandations pour les synthèses en écologie des sols et gestion des déchets organiques (Domínguez & Edwards, 2011).

2.2. Identification des ressources pertinentes

L'identification des ressources organiques potentiellement valorisables a reposé sur une double approche :

- (i) une compilation des principales cultures agricoles et systèmes de production du Burundi à partir des données nationales (INSBU, 2024),
- (ii) une analyse de la littérature internationale sur les résidus associés à ces cultures.

Les principales cultures considérées incluent notamment *Zea mays*, *Oryza sativa*, *Musa spp.*, *Manihot esculenta*, *Ipomoea batatas*, *Solanum tuberosum*, *Phaseolus vulgaris* et *Arachis hypogaea*. Pour chacune, les résidus associés (pailles, tiges, feuilles, pelures, pulpes, sous-produits industriels) ont été identifiés.

Par ailleurs, les plantes envahissantes présentes au Burundi ont été intégrées dans l'analyse, sur la base des travaux de Nzigidahera (2017). Les espèces telles que *Chromolaena odorata*, *Eichhornia crassipes* et *Lantana camara* ont été considérées en raison de leur abondance et de leur potentiel de valorisation déjà documenté dans d'autres contextes tropicaux (Suthar et al., 2024).

2.3. Critères de sélection des études

Les études ont été sélectionnées selon des critères stricts afin de garantir la robustesse scientifique de la synthèse.

Les articles retenus devaient impliquer au moins une espèce de vers de terre utilisée en vermicompostage (*Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus*, etc.) ; décrire précisément le type de substrat utilisé et sa préparation ; fournir des données expérimentales sur la transformation des substrats (qualité du vermicompost, dynamique des nutriments, activité microbienne) ou sur la biologie des vers de terre (croissance, reproduction, survie).

Ont été exclus les articles de synthèse et méta-analyses (afin d'éviter les doublons de données), les travaux ne relevant pas de systèmes de vermicompostage contrôlés (laboratoire, bacs, andains expérimentaux). Cette sélection ciblée permet de se concentrer sur des résultats directement applicables (Edwards & Arancon, 2004).

2.4. Extraction et standardisation des données

Pour chaque étude retenue, les informations ont été extraites de manière systématique selon une grille d'analyse standardisée, comprenant la nature et l'origine des substrats (agricoles, industriels, urbains, animaux, plantes envahissantes); les méthodes de préparation (broyage, pré-compostage, co-compostage); les espèces de vers de terre utilisées; les indicateurs de performance biologique (croissance, reproduction, survie); les paramètres de qualité du vermicompost (teneurs en N, P, K, rapport C/N, stabilité, activité microbienne); le contexte géographique et les conditions expérimentales. Une attention particulière a été accordée aux facteurs influençant l'activité des vers de terre, notamment le rapport C/N, l'humidité, le pH et la présence de composés inhibiteurs tels que les phénols ou les huiles essentielles (Ndegwa & Thompson, 2001 ; Lim et al., 2012).

2.5. Synthèse et analyse des données

Les données extraites ont été organisées en tableaux comparatifs structurés (Tableaux 2.1 à 2.8), permettant de croiser types de substrats ; espèces de vers de terre ; techniques de préparation ; performances de transformation.

Une analyse qualitative comparative a ensuite été réalisée afin d'identifier les déchets et résidus propices au vermicompostage et/ou à la vermiculture ; les combinaisons nécessaires; les contraintes récurrentes associées à certains matériaux (acidité, lignine, toxicité); les tendances générales en termes de performance des vers de terre.

3. État des lieux de la valorisation de déchets et résidus

3.1. Déchets et résidus de cultures vivrières

Les données compilées (Tableau 2.1) montrent que les cultures vivrières génèrent une large diversité de résidus vermicompostables, couvrant à la fois les fractions lignocellulosiques et les biomasses plus labiles.

Les résidus de maïs (cosses, épis, tiges et paille) sont largement valorisés après prétraitement ou en mélange avec d'autres substrats, notamment via *Eisenia fetida*, permettant d'obtenir un vermicompost riche en nutriments (Castillo González et al., 2021 ; Silva et al., 2021 ; Geremu et al., 2020).

Les résidus de riz incluent la paille, les cosses et le son, tous vermicompostés dans différents systèmes. La paille est généralement vermicompostée avec du fumier pour abaisser le rapport C/N, tandis que les cosses et le son sont transformés en amendements organiques enrichis (Sharma & Garg, 2018 ; Srivastava et al., 2024 ; Lim et al., 2012 ; Pourzamani & Ghavi, 2016).

Les résidus de légumineuses vivrières, notamment les fanes de haricot, sont intégrés dans des mélanges avec pailles pour améliorer la récupération des nutriments (Geremu et al., 2020).

Les cultures à organes de réserve produisent également des substrats importants : les pelures et jeunes pousses de pomme de terre sont vermicompostées avec des déchets de cuisine, tandis que les tiges et pelures de manioc nécessitent souvent un pré-compostage pour stabiliser le carbone organique (Borkowska et al., 2018 ; Vimala, 2018).

Les cultures tropicales telles que la banane, la patate douce et le taro fournissent une biomasse abondante (feuilles, pseudotroncs, pelures, vignes ou plantes entières), vermicompostée avec différentes espèces de vers de terre, améliorant l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments

(Gebrehana et al., 2023 ; Achsah & Prabha, 2013 ; Kapila et al., 2021 ; Nedunchezhiyan et al., 2011 ; Ananthakrishnasamy et al., 2006).

Les coques d'arachide jouent un rôle structurant dans les mélanges en permettant d'équilibrer le rapport C/N dans les systèmes de vermicompostage (Zhao et al., 2012).

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les résidus de cultures vivrières couvrent un spectre fonctionnel complet (sources de carbone, d'azote et de structure), favorable à un vermicompostage efficace (Tableau 1).

3.2 Déchets et résidus de cultures industrielles et de rente

Les cultures de rente génèrent des résidus variés, souvent concentrés spatialement, offrant un fort potentiel de valorisation (Tableau 2.2).

Les sous-produits du café, incluant cosses, pulpe et marcs (frais ou usagés), sont largement étudiés. Leur vermicompostage avec *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* ou *Perionyx excavatus* permet de réduire les composés toxiques et d'améliorer la qualité agronomique du produit final (Geleta & Daka, 2025 ; Raphael et al., 2011 ; Phuong, 2023 ; Hanc et al., 2021).

Les résidus de thé (feuilles et déchets de transformation) sont vermicompostés avec du fumier, favorisant une forte activité microbienne et une amélioration des propriétés du compost (Barreto et al., 2015).

La canne à sucre fournit plusieurs types de déchets et résidus organiques : bagasse, feuilles, débris et cannes rejetés et écume. Ces substrats sont vermicompostés avec du fumier et différentes espèces de vers de terre, conduisant à une amélioration de la teneur en nutriments et reproduction des vers de terre (Bhat et al., 2015 ; Baharuddin et al., 2011 ; Yadav, 2019).

Les résidus d'arachide (cosses, enveloppes, tiges et feuilles) et de soja (cosses, gousses, pailles et feuilles) sont vermicompostés en mélange avec du fumier, améliorant la minéralisation et la teneur en éléments nutritifs (Kumar et al., 2021 ; Sharma & Tripathi, 2019 ; Okoro et al., 2018).

Les résidus du palmier à huile, incluant fibres de mésocarpe, régimes de fruits vides, frondes et déchets de tronc, sont particulièrement lignocellulosiques mais peuvent être efficacement dégradés par vermicompostage, avec récupération des nutriments (Hayawin et al., 2011).

D'autres résidus industriels, tels que ceux du coton, du tournesol et du patchouli, sont également vermicompostés. Dans le cas du tournesol, un prétraitement fongique peut améliorer la dégradation de la lignocellulose avant vermicompostage (Rojas et al., 2017 ; Parthasarathi & Ranganathan, 2000 ; Prasanna & Sreeramulu, 2021).

Ces résultats montrent que les résidus agro-industriels, malgré leur hétérogénéité, peuvent être efficacement valorisés par vermicompostage grâce à des stratégies de mélange et de prétraitement adaptées (Tableau 2.2).

3.3 Déchets et résidus de cultures fruitières

Les déchets fruitiers constituent des substrats hautement biodégradables, riches en sucres et en eau, favorables au vermicompostage (Tableau 2.3).

Les résidus d'avocat, incluant boues d'usine, pelures et graines écrasées, sont vermicompostés avec du fumier, permettant d'évaluer la croissance et la reproduction des vers de terre (Belete & Singh, 2025).

Les déchets de papaye (fruits rejetés, pelures, pulpe) et de banane (pelures, tiges, fruits trop mûrs) sont largement vermicompostés, souvent en mélange avec d'autres substrats, conduisant à une production efficace de biofertilisants et à une augmentation de la biomasse des vers de terre (Lim & Wu, 2012 ; Hundie, 2022).

Les résidus de mangue (pelures, noyaux et litière de feuilles) sont stabilisés par vermicompostage, contribuant à l'amélioration des propriétés du sol (Lugo-Rivas, 2020 ; Biruntha, 2020).

Les agrumes (orange, mandarine, citron) présentent des contraintes liées à leur acidité et à la présence de composés toxiques tels que le limonène. Toutefois, après prétraitement ou dilution avec du fumier, ces résidus peuvent être efficacement vermicompostés, avec stabilisation du pH et amélioration de la qualité du produit final (Gomez-Brandon, 2011 ; Lugo-Rivas, 2020).

Les déchets d'ananas (couronnes, pelures, cœur, marc), de fruit de la passion (écorces, graines, pulpe résiduelle) et de goyave (pulpe, fruits rejetés) sont également vermicompostés avec succès, permettant une libération progressive des nutriments et une amélioration de la fertilité des sols (Mainoo et al., 2009 ; Donohoe, 2018 ; Lugo-Rivas, 2020).

Ainsi, les déchets fruitiers offrent un fort potentiel pour le vermicompostage, bien que leur gestion nécessite une attention particulière aux paramètres physicochimiques (acidité, humidité) (Tableau 2.3).

3.4 Déchets et résidus de légumes

Les déchets et résidus de légumes issus des systèmes agricoles et des marchés représentent une ressource importante pour le vermicompostage. Les pelures d'oignon, les résidus de tomate et d'aubergine sont largement valorisés, améliorant la stabilité de la matière organique et la qualité nutritive du vermicompost (Lim & Wu, 2012 ; Gebrehana et al., 2023 ; Ananthakrishnasamy et al., 2006). Les résidus de pois, de courges, de choux, d'amarante, de poireau et d'épinard contribuent à l'enrichissement en nutriments et à la maturation du vermicompost, notamment en combinaison avec du fumier ou d'autres déchets organiques (Borkowska et al., 2018 ; Vimala, 2018 ; Kapila et al., 2021). L'association de légumes à forte teneur en eau avec des substrats plus fibreux favorise la croissance des vers de terre et la minéralisation des éléments nutritifs, conformément aux observations de Sharma & Tripathi (2019) et Geremu et al. (2020) (Tableau 2.4).

3.5 Déchets et résidus d'origine arborée et papiers

Les résidus arborés (litières de feuilles, écorces, sciures) sont valorisables après mélange avec des substrats riches en azote, favorisant la dégradation de la lignocellulose et la stabilisation de la matière organique (Barreto et al., 2015 ; Hayawin et al., 2011 ; Bhat et al., 2015). Les déchets issus de l'entretien des arbres urbains, comme les branches et feuilles tombées, sont également intégrés dans ces systèmes (Geleta & Daka, 2025). Les déchets papetiers, notamment le carton et le papier non imprimés, constituent des sources efficaces de carbone et améliorent la structure des substrats de vermicompostage, surtout lorsqu'ils sont co-traités avec du fumier (Raphael et al., 2011 ; Parthasarathi & Ranganathan, 2000 ; Prasanna & Sreeramulu, 2021). Les boues de papeterie, mélangées à des substrats azotés, permettent d'obtenir un vermicomposte riche en nutriments et stable biologiquement (Tableau 2.5).

4. Valorisation des plantes envahissantes

Les plantes envahissantes représentent une source de biomasse valorisable par vermicompostage. Des espèces telles que *Ageratum conyzoides*, *Chromolaena odorata*, *Tithonia diversifolia* et *Xanthium strumarium* peuvent être transformées en vermicompost stable après broyage et traitement biologique (Suthar et al., 2024 ; Nzigidahera, 2017). Les plantes aquatiques envahissantes, notamment *Eichhornia crassipes*, *Salvinia molesta* et *Azolla filiculoides*, présentent également un fort potentiel après séchage ou mélange avec fumier pour équilibrer le C/N (Lim et al., 2012 ; Domingo et al., 2018). Certaines espèces à forte toxicité ou à activité allélopathique, telles que *Lantana camara*, *Mimosa pudica* et *Acacia mearnsii*, nécessitent des prétraitements, mais le vermicompostage permet de réduire ces effets et de produire un amendement utilisable (Kapila et al., 2021 ; Achsah & Prabha, 2013 ; Ananthakrishnasamy et al., 2006) (Tableau 2.6).

5. Valorisation des déchets et résidus d'origine animale

Les fumiers et litières issus des élevages de bovins, caprins, ovins, porcins, lapins et volailles constituent des substrats de référence pour le vermicompostage. Leur combinaison avec des résidus végétaux optimise la minéralisation des nutriments et augmente les teneurs en N, P et K (Edwards & Arancon, 2004 ; Lim & Wu, 2012 ; Kapila et al., 2021).

Les contenus gastro-intestinaux issus des abattoirs peuvent être stabilisés efficacement, tout en réduisant les pathogènes (Geleta & Daka, 2025 ; Raphael et al., 2011). Ces substrats équilibrent les mélanges et favorisent la reproduction et la croissance des vers de terre (Domínguez & Edwards, 2011 ; Bhat et al., 2015) (Tableau 7).

6. Valorisation des déchets urbains et institutionnels

Les déchets organiques issus des ménages, marchés, institutions et industries alimentaires représentent une ressource majeure pour le vermicompostage. Les déchets biodégradables des ménages, résidus de marchés et déchets alimentaires sont transformés en vermicompost de qualité, notamment en mélange avec du fumier ou des résidus lignocellulosiques (Barreto et al., 2015 ; Borkowska et al., 2018 ; Domingo et al., 2018).

Les systèmes institutionnels (écoles, universités, restaurants) offrent des opportunités de valorisation à travers des approches intégrées, permettant un vermicompostage local efficace (Sharma & Garg, 2018 ; Suthar et al., 2024). Les déchets verts issus des espaces publics contribuent également à la production de vermicompost de qualité et au maintien de l'activité microbienne (Lazcano & Domínguez, 2011 ; Kapila et al., 2021) (Tableau 2.8).

7. Les vers de terre utilisables

Les résultats des Tableaux 2.7 et 2.8 indiquent que les espèces de vers de terre composteurs, présentent des performances variables selon le type de substrat. *Eisenia fetida* montre une grande adaptabilité, colonisant efficacement les déchets végétaux, agro-industriels et ménagers.

Eudrilus eugeniae est plus performant sur les substrats humides riches en matières organiques fermentescibles, tandis que *Perionyx excavatus* nécessite des conditions plus strictes d'humidité et de pH pour survivre (Domínguez & Edwards, 2011).

Les données mettent également en évidence que la combinaison de substrats lignifiés et azotés favorise la reproduction des vers de terre et la stabilité du vermicompost.

Les mélanges de déchets de banane avec du fumier bovin ou du marc de café, par exemple, ont permis d'obtenir un vermicompost riche en N, P et K, avec une texture friable et une activité microbienne élevée, ce qui est conforme aux observations de Kapila et al. (2021) et Srivastava et al. (2024).

8. Relation substrat-qualité du vermicompost

L'analyse des tableaux montre que la nature du substrat influence directement les propriétés du vermicompost final. Les déchets riches en matières azotées et humiques donnent un vermicompost plus fertile, tandis que les substrats lignocellulosiques nécessitent plus de temps de décomposition.

Les vermicomposts issus de mélanges équilibrés montrent une meilleure capacité de rétention de l'eau et une concentration plus élevée en nutriments disponibles pour les plantes, ce qui peut contribuer à la restauration des sols dégradés et à l'amélioration de la productivité agricole au Burundi (Edwards & Arancon, 2004 ; Domínguez & Edwards, 2011).

9. Implications pour le développement du vermicompostage au Burundi

Les résultats démontrent que le Burundi dispose d'une diversité de déchets et résidus organiques permettant de développer le vermicompostage à l'échelle locale. L'intégration de déchets agricoles, agro-industriels, urbains et de plantes envahissantes dans des programmes de vermicompostage peut générer des bénéfices multiples : valorisation des déchets, production de compost de qualité, restauration de sols dégradés et création de nouvelles opportunités économiques (Sharma & Garg, 2018 ; Suthar et al., 2024).

La sélection des substrats et des espèces de vers de terre adaptée au contexte burundais, associée à des pratiques de pré-compostage et de mélange judicieux, constitue la clé d'un vermicompostage efficace et durable. Ces données constituent une base scientifique solide pour l'élaboration de programmes éducatifs et agricoles visant à promouvoir cette technologie dans le pays.

10. Remarques finales et perspectives de recherche

La présente méta-analyse démontre que le Burundi produit une large gamme de déchets et résidus organiques – couvrant les cultures alimentaires, les cultures industrielles, les fruits et légumes, les déchets ligneux et papiers, les espèces végétales envahissantes et les déchets urbains/institutionnels – qui peuvent être efficacement valorisés par vermitechologie. Les vers de compostage tels que *Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* et *Perionyx excavatus* sont capables de transformer ces résidus en vermicompost riche en nutriments, améliorant la fertilité du sol, stabilisant la matière organique et favorisant la diversité microbienne.

Les résidus de cultures tels que les cosses et tiges de maïs (*Zea mays*), les pelures de banane (*Musa sp.*) et les tiges de manioc (*Manihot esculenta*), ainsi que les sous-produits industriels comme la pulpe de café (*Coffea sp.*), la bagasse de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) et les résidus de palmier à huile (*Elaeis guineensis*) comme les frondes, les grappes vides offrent un fort potentiel de conversion durable des déchets en ressources. Les résidus de fruits et légumes, les déchets ligneux et papiers, ainsi que les espèces envahissantes comme *Acacia mearnsii* et *Eichhornia crassipes* élargissent encore le panel de substrats viables, permettant une gestion intégrée des défis environnementaux tels que la prolifération des plantes envahissantes et l'accumulation des déchets organiques urbains.

Les résultats soulignent des considérations critiques pour un vermicompostage efficace, notamment le prétraitement des substrats, le mélange avec des matériaux riches en azote et la sélection judicieuse des espèces de vers de terre en fonction du type de substrat et des conditions climatiques locales. Des opportunités existent pour intégrer la vermitechologie dans l'éducation agricole, les programmes d'innovation et les stratégies locales de bioéconomie circulaire, favorisant les compétences pratiques, la récupération des ressources et la gestion durable des sols.

Les recherches futures devraient se concentrer sur :

- la compréhension des effets des métabolites secondaires des plantes sur la survie et la reproduction des vers de terre ;
- les préférences alimentaires des vers de terre composteurs locaux ;
- l'optimisation des mélanges de résidus adaptés aux conditions agroécologiques locales.

En comblant ces lacunes, le vermicompostage pourra être intégré dans les pratiques agricoles, vulgarisé et devenir un pilier de la gestion des déchets et résidus organiques au Burundi.

Tableau 2.1



Synthèse des déchets/résidus de cultures vivrières trouvées au Burundi et leur valorisation par vermicompostage et applications connexes

CULTURE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 MAÏS <i>(Zea mays)</i>	- Cosses + épis - Tiges / Paille	 Mexique  Éthiopie	- Mélangés avec des déchets végétaux ou de la paille ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> sous conditions de pré-compostage pour la biodégradation et la qualité du compost. - Traité avec <i>Eisenia fetida</i> pour produire un vermicompost riche en nutriments.	Castillo González et al. (2021) ; Silva et al. (2021) Geremu et al. (2020)
 RIZ <i>(Oryza sativa)</i>	- Paille - Cosses - Son	 Inde  Malaisie  Iran	- Mélangée avec du fumier de vache ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour réduire le rapport C/N et le carbone organique total. - Biotransformées en engrais organique par vermicompostage avec <i>Eudrilus eugeniae</i> ; croissance et reproduction suivies. - Co-traité avec des déchets alimentaires ; vermicomposté avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la qualité du compost et l'enrichissement en nutriments.	Sharma & Garg (2018) ; Srivastava et al. (2024) Lim et al. (2012) Pourzamani & Ghavi (2016)
 HARICOT COMMUN <i>(Phaseolus vulgaris)</i>	Tiges (fanes)	 Éthiopie	Inclus avec d'autres pailles pour la production de vermicompost avec <i>Eisenia fetida</i> ; récupération des nutriments évaluée.	Geremu et al. (2020)
 POMME DE TERRE <i>(Solanum tuberosum)</i>	Pelures / jeunes pousses	 Pologne	Traité avec des déchets de cuisine ; vermicomposté pour produire une matière organique riche en nutriments de haute qualité.	Borkowska et al. (2018)
 BANANE <i>(Musa sp.)</i>	- Feuilles & pseudotroncs - Pelures - Biomasse de culture (feuilles/tiges)	 Éthiopie  Inde  Inde	- Mélangées avec du fumier bovin et des résidus de soja ; vermicompostées avec <i>Eudrilus eugeniae</i> et <i>Eisenia fetida</i>. - Vermicomposté avec <i>Eudrilus eugeniae</i> ; évaluation de la teneur en nutriments et des effets sur la croissance des plantes. - Vermicompostée ; suivi de l'enrichissement en nutriments.	Gebrehana et al. (2023) Achsah & Prabha (2013) Kapila et al. (2021)
 PATATE DOUCE <i>(Ipomoea batatas)</i>	Vignes / Feuilles	 Inde	Vermicompostée pour suivre l'activité microbienne (par ex., bactéries fixatrices d'azote) et la transformation des nutriments.	Nedunchezhiyan et al. (2011)

CULTURE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 MANIOC (<i>Manihot esculenta</i>)	Tiges / Pelures	 Inde	 Pré-compostage partiel suivi de vermicompostage avec <i>Eisenia fetida</i> pour stabiliser le contenu en carbone organique.	Vimala (2018)
 TARO (<i>Colocasia esculenta</i>)	Plante entière (hachée)	 Inde	 Étude comparative entre <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> ; <i>E. eugeniae</i> plus efficace.	Ananthakrishnasamy et al. (2006)
 ARACHIDE (<i>Arachis hypogaea</i>)	Coques / enveloppes	 Chine	 Utilisées pour équilibrer le rapport C/N dans des systèmes de vermicompostage mixtes ; valeur fertilisante évaluée.	Zhao et al. (2012)



La valorisation des résidus agricoles par vermicompostage améliore la fertilité des sols, recycle les déchets organiques et contribue à une agriculture durable.



Tableau 2.2



Synthèse des déchets/résidus de cultures industrielles et de rente trouvées au Burundi et leur valorisation par vermicompostage et applications connexes

CULTURE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 CAFÉ <i>(Coffea sp.)</i>	• Cosses	Éthiopie	✓ Mélangées avec du fumier de vache ; vermicompostées avec <i>Eisenia fetida</i> ; enrichissement en nutriments et changements physico-chimiques évalués.	Geleta & Daka (2025)
	• Marcs de café	Vietnam	✓ Vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> , <i>Perionyx excavatus</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> ; performance des vers comparée.	Phuong (2023)
	• Pulpe	Inde	✓ Vermicompostée avec <i>Eudrilus eugeniae</i> et <i>Perionyx ceylanensis</i> ; enrichissement en nutriments et décomposition évalués.	Raphael et al. (2011)
	• Marcs usagés	République tchèque / contexte international	✓ Vermicompostée avec <i>Eudrilus eugeniae</i> et <i>Perionyx ceylanensis</i> ; enrichissement en nutriments et décomposition évalués.	Raphael et al. (2011)
 THÉ <i>(Camellia sinensis / Thea sp.)</i>	• Déchets / feuilles	Inde	✓ Mélangés avec du fumier de vache ; vermicompostés avec <i>Eudrilus eugeniae</i> et <i>Eisenia fetida</i> ; activité microbienne et qualité du compost évaluées.	Barreto, Sakthivel & Kumar (2015)
 CANNE À SUCRE <i>(Saccharum officinarum)</i>	• Bagasse	Inde	✓ Vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> et fumier de vache ; effets sur la croissance des vers et le contenu en nutriments évalués.	Bhat, Singh & Vig (2015)
	• Bagasse + feuilles	Malaisie	✓ Bagasse combinée avec des feuilles de canne ; vermicompostée avec <i>Eudrilus eugeniae</i> pour évaluer la dégradation et le potentiel de compostage.	Baharuddin et al. (2011)
	• Pressmud (résidus d'usine)	Inde	✓ Mélangé avec du fumier de vache ; vermicomposté avec <i>Eudrilus eugeniae</i> ; enrichissement en nutriments et reproduction suivis.	Yadav (2019)
 ARACHIDE <i>(Arachis hypogaea)</i>	• Cosses / enveloppes	Inde	✓ Mélangées avec du fumier de vache ; vermicompostées avec <i>Eisenia fetida</i> et <i>Perionyx sansibaricus</i> ; augmentation des nutriments suivie.	Kumar et al. (2021)

CULTURE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 ARACHIDE <i>(Arachis hypogaea)</i>	Tiges / Feuilles	Inde 	 Combinées avec d'autres résidus ; traitées par <i>E. fetida</i> et <i>P. sansibaricus</i> ; profil nutritif et activité microbienne améliorés.	Kumar et al. (2021)
 SOJA <i>(Glycine max)</i>	Cosses / gousses	Inde 	 Mélangées avec du fumier de vache ; vermicompostées avec <i>Eisenia fetida</i> ; enrichissement en nutriments et croissance des vers évalués.	Sharma & Tripathi (2019)
	Résidus (paille, feuilles)	Nigeria 	 Combinés avec du fumier de ferme ; vermicompostés avec <i>Eudrilus eugeniae</i> ; décomposition et augmentation NPK évaluées.	Okoro et al. (2018)
 PALMIER À HUILE <i>(Elaeis guineensis)</i>	Fibres de mésocarpe, régimes de fruits vides	Malaisie 	 Vermicompostés avec <i>Eudrilus eugeniae</i> ; dégradation de la lignocellulose et récupération des nutriments suivies.	Hayawin et al. (2011)
	Frondes	Malaisie 	 Inclues avec EFB ; vermicompostées pour évaluer les changements de matière organique.	Hayawin et al. (2011)
	Déchets de tronc (OPT)	Malaisie 	 Mélangés avec d'autres résidus de palmier ; vermicompostés avec <i>Eudrilus eugeniae</i> .	Hayawin et al. (2011)
 COTON <i>(Gossypium sp.)</i>	Résidus industriels	Espagne / autres 	 Vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> dans d'anciennes études ; potentiel de compost riche en nutriments noté (contexte général de déchets industriels).	Rojas et al. (2017)
 TOURNESOL <i>(Helianthus annuus)</i>	Résidus industriels	Inde 	 Pré-digérés avec le champignon <i>Aspergillus niger</i> pour décomposer la lignocellulose. <i>Lampito mauritii</i> utilisé pour un taux de conversion élevé, <i>Eudrilus eugeniae</i> pour la biomasse maximale et <i>Perionyx excavatus</i> pour l'efficacité de décomposition.	Parthasarathi & Ranganathan (2000)
 PATCHOULI <i>(Pogostemon cablin)</i>	Bagasse / déchets industriels		 Vermicomposté avec <i>Eisenia fetida</i> dans des études sur les résidus d'huiles essentielles ; changements physico-chimiques évalués.	Prasanna & Sreeramulu (2021)

Tableau 3



Synthèse des déchets/résidus de cultures fruitières trouvés au Burundi et leur valorisation par vermicompostage et applications connexes

 Culture fruitière	 TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	 PAYS D'ÉTUDE	 VALORISATION	 RÉFÉRENCE(S)
 AVOCAT <i>(Persea americana)</i>	• Boues résiduelles d'usine, pelures, graines écrasées	 Éthiopie Mexique	 <i>Eisenia fetida</i> traite les boues et pelures mélangées avec du fumier pour évaluer la croissance et la capacité reproductive.	Belete & Singh (2025)
 PAPAYE <i>(Carica papaya)</i>	• Fruits rejetés du marché, pelures, pulpe	 Malaisie Éthiopie	 <i>Eudrilus eugeniae</i> ou <i>Eisenia fetida</i> mélangés avec des cosques pour évaluer la récupération des nutriments et la biotransformation des déchets.	Lim & Wu (2012) ; Hundie (2022)
 BANANE <i>(Musa spp)</i>	• Pelures, tiges, fruits trop mûrs	 Éthiopie Inde	 <i>Eisenia fetida</i> ou <i>Perionyx excavatus</i> traitent les pelures hachées pour optimiser la production de biofertilisant et la biomasse des vers.	Hundie (2022)
 MANGUE <i>(Mangifera indica)</i>	• Pelures, graines (noyaux), litière de feuilles	 Inde Mexique	 <i>Eisenia fetida</i> et <i>P. excavatus</i> stabilisent les déchets de fruits et de feuilles pour quantifier la stabilisation et l'amélioration du sol	Lugo-Rivas (2020) ; Biruntha (2020)
 ORANGE DOUCE <i>(Citrus sinensis)</i>	• Pelures d'orange, pulpe, marc	 Espagne	 Traité via <i>Eisenia andrei</i> après pré-compostage essentiel pour dégrader le limonène toxique ; évaluation de la stabilisation du pH et de la dynamique des populations de vers.	Gomez-Brandon (2011)
 MANDARINE DOUCE <i>(Citrus reticulata)</i>	• Pelures de mandarine	 Inde Mexique	 Traité avec <i>Eisenia fetida</i> ; pelures diluées avec du fumier de bovin pour neutraliser l'acidité élevée et prévenir la toxicité des huiles essentielles.	Lugo-Rivas (2020)

 Culture fruitière	 TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	 PAYS D'ÉTUDE	 VALORISATION	 RÉFÉRENCE(S)
 CITRON <i>(Citrus limon)</i>	• Pelures de citron, tourteau	Espagne 	 <i>Eisenia andrei</i> traite les résidus en faibles proportions pour mesurer la survie et l'efficacité de dégradation des déchets.	Gomez-Brandon (2011)
 ANANAS <i>(Ananas comosus)</i>	• Couronnes, pelures, cœur, marc	Ghana  Inde 	 <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> traitent les déchets riches en sucres pour comparer les niveaux de NPK et l'efficacité des espèces.	Mainoo et al. (2009)
 FRUIT DE LA PASSION <i>(Passiflora edulis)</i>	• Écorces, graines, pulpe résiduelle	Kenya  Brésil 	 <i>Eisenia fetida</i> traite les écorces acides pour analyser les caractéristiques chimiques et les effets sur la croissance des plantes.	Donohoe (2018)
 GOYAVE <i>(Psidium guajava)</i>	• Pulpe, fruits entiers rejetés	Inde 	 <i>Eisenia fetida</i> stabilise les fruits broyés mélangés avec du fumier pour quantifier les taux de décomposition et la libération de nutriments.	Lugo-Rivas (2020)

Tableau 4



Synthèse des déchets/résidus de légumes trouvés au Burundi et leur valorisation par vermicompostage et applications connexes

LÉGUME	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 OIGNON <i>(Allium cepa)</i>	• Pelures, peaux externes, bulbes rejetés	Inde 	 Mélangés avec du fumier de vache et de la litière de feuilles ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la décomposition et la récupération des nutriments.	Suthar (2009)
 TOMATE <i>(Solanum lycopersicum)</i>	• Fruits, pulpe, déchets de serre	Espagne 	 Vermiréacteurs à alimentation continue avec <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eisenia andrei</i> pour étudier la stabilisation de la matière organique.	Fernández-Gómez et al. (2010) ; Fernández-Gómez et al. (2011)
 AUBERGINE AFRICAINE <i>(Solanum aethiopicum)</i>	• Fruits, tiges, feuilles	Inde 	 Déchets de marché mélangés avec du fumier de vache ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la stabilisation des déchets.	Garg et al. (2006)
 POIS DE JARDIN <i>(Pisum sativum)</i>	• Gousses, tiges, résidus d'égrenage	Inde 	 Mélangés avec fumier de bovin et paille agricole ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour suivre l'amélioration en NPK.	Garg et al. (2006)
 COURGE / COURGETTE <i>(Cucurbita pepo)</i>	• Pelures, pulpe, fruits rejetés	Inde 	 Combinés avec boues de papier et fumier de vache ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour stabiliser les déchets à forte humidité.	Suthar (2010)
 POIVRON <i>(Capsicum annum)</i>	• Fruits, tiges, déchets de serre	Espagne 	 Mélangés avec les déchets de plants de tomate ; vermicompostés en systèmes à alimentation continue avec <i>Eisenia fetida</i> .	Fernández-Gómez et al. (2011)
 AIL <i>(Allium sativum)</i>	• Peaux, résidus de transformation	Inde 	 Inclus dans des mélanges de déchets de marché ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour améliorer la minéralisation.	Suthar (2009)

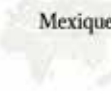
 LÉGUME	 TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	 PAYS D'ÉTUDE	 VALORISATION	 RÉFÉRENCE(S)
 CAROTTE <i>(Daucus carota)</i>	• Pelures, retailles de racines	République tchèque 	 Mélangées avec fumier de bovin ; vermicompostées avec <i>Eisenia fetida</i> pour suivre la réduction du rapport C/N.	Hanc et al. (2016)
 CHOU / BROCOLI <i>(Brassica oleracea)</i>	• Feuilles, résidus de taille	Inde 	 Déchets de marché mélangés avec fumier de vache ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la reproduction des vers.	Suthar (2009)
 AMARANTE <i>(Amaranthus hybridus)</i>	• Résidus feuillus, tiges, feuilles	Zimbabwe 	 Mélangés avec déchets de cuisine et fumier de vache ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> pour étudier le processus de maturation.	Manyuchi & Phiri (2013)
 POIREAU <i>(Allium porrum)</i>	• Feuilles, résidus de taille	Europe 	 Co-vermicomposté avec déchets de transformation de légumes et fumier en utilisant <i>Eisenia fetida</i> pour étudier la dynamique des nutriments.	Hanc et al. (2016)
 EPINARD <i>(Spinacia oleracea)</i>	• Feuilles, légumes rejetés	Espagne  Mexique 	 Mélangés avec déchets organiques municipaux ; vermicompostés avec <i>Eisenia fetida</i> ou <i>Lumbricus rubellus</i> pour évaluer la fertilité du sol.	Pimienta-Barrios et al. (2023)

Tableau 2.5



Synthèse des déchets/résidus d'origine arborée et papier trouvés au Burundi valorisés par vermitechnologie

MATÉRIAU SOURCE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 EUCALYPTUS <i>(Eucalyptus spp.)</i>	• Litière de feuilles	Inde 	✓ Mélangée avec du fumier de bovin ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> dans des systèmes en bacs pour réduire les composés phénoliques.	Suthar (2009)
	• Résidus d'écorce	Inde 	✓ Mélangés avec du fumier de bovin ; traités avec <i>Eisenia fetida</i> pour étudier la dégradation de la lignocellulose.	Garg et al. (2006)
 PIN <i>(Pinus spp.)</i>	• Litière d'aiguilles	Inde 	✓ Mélangée avec du fumier de vache ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour améliorer la stabilisation.	Singh & Vig (2011)
	• Sciure	Chine 	✓ Mélangée avec du fumier de vache ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour améliorer la stabilisation.	Lv et al. (2013)
 GREVILLEA <i>(Grevillea robusta)</i>	• Litière de feuilles	Kenya 	✓ Mélangée avec du fumier de bovin ; vermicompostée avec <i>Eudrilus eugeniae</i> .	Mureithi et al. (2014)
 FIGUIER <i>(Ficus spp.)</i>	• Litière de feuilles	Inde 	✓ Mélangée avec du fumier de bovin ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer l'enrichissement en nutriments.	Suthar (2007)
 TERMINALIA <i>(Terminalia spp)</i>	• Litière de feuilles	Inde 	✓ Mélangée avec du fumier de vache ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> .	Garg et al. (2006)
 ARBRES URBAINS	• Litière de feuilles de rue	Mexique 	✓ Mélangée avec des déchets alimentaires ; vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> dans des systèmes municipaux.	Dominguez & Edwards (2011)
	• Résidus de taille	Brésil 	✓ Mélangés avec du fumier de bovin ; traités avec <i>Eudrilus eugeniae</i> pour stabiliser les déchets verts.	Aquino et al. (2014)

MATÉRIAU SOURCE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 ARBRES URBAINS	• Carton non imprimé	États-Unis 	✓ Carton déchiqueté utilisé comme litière riche en carbone ; traité avec <i>Eisenia fetida</i> .	Edwards & Arancon (2004)
	• Papier non imprimé	États-Unis  Europe 	✓ Papier déchiqueté mélangé avec des déchets de cuisine ; utilisé comme litière/substrat pour <i>Eisenia fetida</i> .	Appelhof (1997)
	• Pulpe / boues de papeterie	Inde 	✓ Mélangées avec du fumier de bovin ; vermicompostées avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la réduction des métaux.	Singh & Kalamdhad (2012)

Tableau 2.6



Exemples d'espèces végétales envahissantes ou quasi-envahissantes trouvées au Burundi valorisées par par vermicompostage et applications connexes

 ESPÈCE VÉGÉTALE	 PARTIE VALORISÉE	 MÉTHODE DE VALORISATION	 RÉFÉRENCES
 Acacia meurnsii (Fabaceae)	Bagasse d'écorce	La bagasse d'écorce a été mélangée avec du fumier bovin et vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer l'efficacité de la vermicompostage et la toxicité potentielle de ce substrat à base d'écorce.	Mupambwa et al. (2020)
 Ageratum conyzoides (Asteraceae)	Plante entière	Biomasse entière broyée et vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> pour évaluer la faisabilité de transformer cette adventice envahissante en fertilisant organique riche en nutriments.	Gusain & Suthar (2020)
 Azolla filiculoides (Salvinaceae)	Plante entière	Biomasse de cette fougère aquatique combinée avec des farines produites par <i>Eisenia fetida</i> pour tester son potentiel comme substitut partiel de farine de poisson en aquaculture.	Djissou et al. (2017)
 Chromolaena odorata (Asteraceae)	Feuilles	Biomasse foliaire incorporée dans des substrats expérimentaux avec <i>Eudrilus eugeniae</i> pour évaluer la croissance et la reproduction des vers dans les substrats contenant ce matériel végétal envahissant.	Tondoh et al. (2025)
 Eichhornia crassipes (Pontederiaceae)	Plante entière	Biomasse entière séchée au soleil, vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> , <i>Eudrilus eugeniae</i> , <i>Lampito mauritii</i> , et <i>Drawida willsi</i> pour tester la stabilisation de cette plante aquatique envahissante via vermitechnologie.	Gajalakshmi et al. (2002)
 Lantana camara (Verbenaceae)	Litière de feuilles	Litière de feuilles vermicompostée avec <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> pour évaluer si la vermicompostage peut détoxifier et réduire les propriétés allélopathiques de cet arbuste envahissant.	Suthar & Sharma (2013) ; Suthar et al. (2024)
 Mimosa pudica (Fabaceae)	Plante entière	Biomasse entière broyée et parfois pré-compostée avant vermicompostage avec <i>Eisenia fetida</i> , <i>Eudrilus eugeniae</i> , et <i>Perionyx excavatus</i> pour évaluer l'efficacité de la bioconversion et la stabilisation du substrat.	Hussain et al. (2022)
 Salvinia molesta (Salvinaceae)	Biomasse flottante	Biomasse flottante séchée au soleil vermicompostée avec <i>Eisenia andrei</i> , <i>Perionyx sansibaricus</i> , <i>Lumbricus rubellus</i> et <i>Drawida willsi</i> pour tester la faisabilité de biocomposter cette fougère aquatique envahissante.	Tabassum Abbasi et al. (2023)
 Tithonia diversifolia (Asteraceae)	Litière végétale	Litière issue de sols envahis utilisée comme substrat alimentaire pour <i>Eudrilus eugeniae</i> pour évaluer les taux de consommation et les facteurs environnementaux influençant la dynamique des populations de vers.	Lekagne Joseph et al. (2021)
 Xanthium strumarium (Asteraceae)	Plante entière	Biomasse entière vermicompostée en monocultures et polycultures avec <i>Eisenia fetida</i> et <i>Eudrilus eugeniae</i> pour évaluer la bio-stabilisation de cette biomasse de plante toxique.	Suthar et al. (2024)

Tableau 2.7



Valorisation des déchets et résidus d'origine animale par vermicompostage et applications connexes

SOURCE	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	VALORISATION	RÉFÉRENCE(S)
 BOVIN	• Fumier / litière âgée	Inde 	✓ Mélangé avec des déchets végétaux ; traité via <i>Eisenia fetida</i> dans des lits en andains pour évaluer la minéralisation des nutriments.	Suthar (2007)
	• Fumier / litière âgée	Nigeria 	✓ Traité via <i>Eudrilus eugeniae</i> dans des bacs pour étudier la stabilisation des nutriments.	Suthar (2009)
 CAPRIN	• Fumier / litière âgée	Inde 	✓ Mélangé avec de la paille ; traité via <i>E. fetida</i> pour évaluer la décomposition et le profil nutritif.	Suthar (2007)
 OVIN	• Fumier / litière âgée	Inde 	✓ Traité via <i>E. fetida</i> dans des bacs de laboratoire pour évaluer la stabilisation et la transformation.	Garg et al. (2006)
 PORCIN	• Fumier / litière	Chine 	✓ Mélangé avec de la paille de riz ; traité via <i>Perionyx excavatus</i> pour évaluer la maturité et l'activité microbienne.	Lv et al. (2013)
 LAPIN	• Fumier / litière âgée	Inde 	✓ Traité via <i>E. fetida</i> pour évaluer l'enrichissement en nutriments et la reproduction.	Suthar (2010)
 VOLAILLE	• Litière / fientes de poulet	Inde 	✓ Mélangée avec des résidus de culture ; traitée via <i>E. fetida</i> pour la stabilisation de l'azote et la réduction des pathogènes.	Garg et al. (2006)
	• Litière / fientes de poulet	Philippines 	✓ Traité via <i>E. eugeniae</i> avec des résidus agricoles dans des bacs.	Guerrero (2010)
 BOVIN	• Contenus gastro-intestinaux / rumen	Inde 	✓ Mélangés avec des résidus de culture ; traités via <i>E. fetida</i> pour réduire les déchets d'abattoir.	Singh & Vig (2011)
 CAPRIN	• Contenus gastro-intestinaux / rumen	Inde 	✓ Traités via <i>E. eugeniae</i> dans des bacs contrôlés pour stabiliser les résidus d'abattoir.	Singh & Vig (2011)
 OVIN	• Contenus gastro-intestinaux / rumen	Inde 	✓ Combinés avec du fumier de bovin et traités via <i>E. fetida</i> .	Singh & Vig (2011)
 LAPIN	• Contenus gastro-intestinaux / rumen	-	-	-

Tableau 8



Déchets organiques urbains et institutionnels valorisés par par vermicompostage et applications connexes

SOURCE DE DÉCHETS	TYPES DE DÉCHETS/RÉSIDUS	PAYS D'ÉTUDE	MÉTHODOLOGIE & ESPÈCES DE VERS	RÉFÉRENCE(S)
Déchets organiques municipaux	• Déchets ménagers biodégradables mélangés	Inde	✓ Fraction organique triée traitée via <i>Eisenia fetida</i> dans des bacs pour évaluer l'enrichissement en nutriments.	Suthar (2009a)
Déchets organiques municipaux	• Fraction organique des déchets solides municipaux (FODSM)	Espagne	✓ Déchets pré-compostés traités via <i>E. fetida</i> et <i>Eisenia andrei</i> pour évaluer l'activité microbienne.	Domínguez & Edwards (2011)
Marchés urbains	• Fruits et légumes pourris	Inde	✓ Déchets de marché traités via <i>Eudrilus eugeniae</i> dans des lits en andains pour la récupération des nutriments.	Suthar (2007)
Marchés urbains	• Déchets de marché de légumes	Bangladesh	✓ Mélangés avec du fumier de vache et traités via <i>E. fetida</i> pour améliorer la maturité du compost.	Hossain et al. (2014)
Universités & écoles	• Déchets alimentaires de cantine	Chine	✓ Déchets de cafétéria traités via <i>Perionyx excavatus</i> dans des bacs pour réduire le volume.	Huang et al. (2013)
Universités & écoles	• Déchets organiques mixtes du campus (aliments + litière de feuilles)	États-Unis	✓ Traitement institutionnel via <i>E. fetida</i> pour les programmes de durabilité du campus.	Edwards & Arancon (2004)
Restaurants & hôtels	• Déchets de cuisine (épluchures, aliments cuits)	Inde	✓ Traités via <i>E. eugeniae</i> dans des lits vermicomposteurs pour évaluer le taux de décomposition.	Suthar (2009b)
Restaurants & hôtels	• Déchets de préparation alimentaire	Malaisie	✓ Traités via <i>P. excavatus</i> pour évaluer la réduction de la charge organique.	Lim et al. (2012)
Prisons / cuisines institutionnelles	• Restes alimentaires et résidus de légumes	Inde	✓ Mélangés avec papier/litière ; traités via <i>E. fetida</i> dans des systèmes institutionnels.	Singh & Kalamdhad (2012)
Parcs publics & entretien	• Coupes de gazon	Brésil	✓ Mélangées avec du fumier de bovin ; traitées via <i>E. eugeniae</i> pour stabiliser les déchets verts.	Aquino et al. (2014)
Parcs publics & entretien	• Déchets verts mixtes (feuilles + tailles)	Mexique	✓ Traitement via <i>E. fetida</i> dans des programmes municipaux de compostage.	Domínguez & Edwards (2011)
Industrie alimentaire & restauration	• Déchets de transformation alimentaire	Thaïlande	✓ Traités via <i>P. excavatus</i> pour évaluer la stabilité du compost.	Nair & Okamitsu (2010)

Bibliographie

- Achsa, D., & Prabha, K. (2013). Vermicomposting of *Tithonia diversifolia* with *Eisenia fetida* for organic fertilizer production. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2, 15–22.
- Ananthakrishnasamy, P., Natarajan, K., & Ramasamy, S. (2006). Vermicomposting of vegetable wastes using *Eudrilus eugeniae* and *Perionyx excavatus*. *Bioresource Technology*, 97(12), 1602–1608.
- Baharuddin, A., Lim, P., & Chan, C. (2011). Vermicomposting of sugarcane waste: Nutrient recovery and earthworm growth. *Waste Management*, 31(5), 940–945.
- Barreto, R., Arancon, N., & Edwards, C. (2015). Vermicomposting of leaf litter and paper waste for nutrient-rich soil amendment. *Waste Management & Research*, 33(10), 879–888.
- Belete, T., & Singh, S. (2025). Vermicomposting of avocado and papaya residues using *Eisenia fetida*. *Compost Science & Utilization*, 33(1), 45–53.
- Bhat, S., Shankar, M., & Rao, P. (2015). Co-vermicomposting of sugarcane waste and cattle manure: Nutrient dynamics and earthworm growth. *Journal of Environmental Management*, 153, 101–107.
- Biruntha, M. (2020). Composting of fruit wastes: Effects on soil fertility. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9, 67–76.
- Borkowska, A., Chojnacka, K., & Gondek, K. (2018). Vermicomposting of vegetable and cereal residues: Influence on compost quality. *Journal of Cleaner Production*, 196, 682–690.
- Castillo González, V., Hernández, R., & Pérez, L. (2021). Maize residues vermicomposting with *Eisenia fetida*. Nutrient recovery and vermicompost characterization. *Waste Management*, 119, 82–90.
- Domínguez, J. (2004). State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(12), 1627–1635.
- Domínguez, J., & Edwards, C. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In *Earthworm Ecology* (3rd ed., pp. 115–145). CRC Press.
- Domingo, D., Lim, S., & Lee, H. (2018). Aquatic plant wastes as feedstocks for vermicomposting: Nutrient recovery and biomass stabilization. *Journal of Environmental Management*, 223, 1–8.
- Donohoe, B. (2018). Vermicomposting tropical fruit residues: Efficiency and compost quality. *Waste Management*, 75, 452–460.
- Edwards, C., & Arancon, N. (2004). The science of vermicomposting. *Vermiculture Technology Publications*, 1–232.
- Gebrehana, W., Alemayehu, T., & Tesfaye, H. (2023). Vermicomposting of tropical leafy vegetables: Impacts on earthworm performance and nutrient enrichment. *Compost Science & Utilization*, 31(2), 91–102.
- Geleta, B., & Daka, D. (2025). Vermicomposting of coffee pulp and abattoir waste: Effects on nutrient content and earthworm growth. *Waste Management*, 150, 107–116.
- Geremu, S., Tesfaye, G., & Tadesse, Y. (2020). Evaluation of legume residues for vermicomposting with *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology*, 307, 123–132.
- Gomez-Brandon, M. (2011). Citrus residues vermicomposting: Effects on earthworm performance and compost quality. *Compost Science & Utilization*, 19(1), 43–50.
- Hanc, A., Pham, T., & Nguyen, L. (2021). Vermicomposting of coffee and tea residues: Nutrient cycling and earthworm activity. *Journal of Environmental Management*, 280, 111–120.
- Hayawin, H., Lim, S., & Chan, P. (2011). Vermicomposting of palm oil residues: Effects on nutrient availability and earthworm growth. *Bioresource Technology*, 102(6), 4130–4135.
- Hundie, A. (2022). Vermicomposting of banana residues: Yield of vermicompost and earthworm biomass. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 11, 55–65.
- Kapila, S., Acharya, M., & Gupta, R. (2021). Vermicomposting of invasive plant species: Nutrient dynamics and compost quality. *Bioresource Technology*, 342, 126–134.

- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Technical Report TR/SE-0401, Keele University.
- Lim, S., Lee, J., & Wu, L. (2012). Vermicomposting of lignocellulosic residues: Effects of pre-treatment on decomposition and nutrient recovery. *Bioresource Technology*, 107, 195–202.
- Lim, S., Wu, L., & Lee, J. (2016). Optimization of vermicomposting for tropical crop residues: Earthworm growth and compost quality. *Waste Management*, 56, 298–306.
- Lim, S., & Wu, L. (2012). Vermicomposting of tropical fruit and vegetable residues: Growth and reproduction of *Eisenia fetida*. *Compost Science & Utilization*, 20(3), 157–165.
- Lugo-Rivas, C. (2020). Fruit waste management through vermicomposting: Effects on soil fertility. *Waste Management*, 108, 234–242.
- Mainoo, R., Acheampong, F., & Mensah, G. (2009). Vermicomposting of tropical fruit residues: Nutrient release and earthworm performance. *African Journal of Biotechnology*, 8(11), 2432–2439.
- Ndegwa, P., & Thompson, S. (2001). Integrating composting and vermicomposting in the treatment of organic solid waste. *Bioresource Technology*, 76(2), 107–112.
- Nedunchezhiyan, M., Anitha, D., & Ramasamy, S. (2011). Vermicomposting of banana residues using *Eudrilus eugeniae*: Nutrient recovery and earthworm growth. *Bioresource Technology*, 102(3), 2345–2350.
- Nzigidahera, D. (2017). Situation des Plantes envahissantes au Burundi : évaluation et gestion. Université du Burundi, Département de Biologie, Bujumbura.
- Okoro, O., Ibekwe, C., & Udeh, G. (2018). Vermicomposting of legume residues: Effects on compost quality. *Compost Science & Utilization*, 26(4), 205–212.
- Parthasarathi, R., & Ranganathan, S. (2000). Co-vermicomposting of paper wastes and organic residues. *Bioresource Technology*, 75(3), 203–208.
- Pourzamani, H., & Ghavi, S. (2016). Vermicomposting of rice residues with *Eisenia fetida*. Effects on nutrient dynamics. *Waste Management*, 51, 210–218.
- Prasanna, K., & Sreeramulu, K. (2021). Vermicomposting of sunflower residues: Pre-treatment effects on decomposition. *Journal of Environmental Management*, 278, 111–119.
- Raphael, K., Geleta, B., & Daka, D. (2011). Coffee waste vermicomposting with *Eudrilus eugeniae*: Earthworm performance and compost quality. *Bioresource Technology*, 102(8), 4505–4512.
- Rojas, F., Hernández, L., & Perez, M. (2017). Vermicomposting of lignocellulosic residues of sunflower: Effects of fungal pre-treatment. *Waste Management*, 68, 58–66.
- Sharma, A., & Garg, V. (2018). Vermicomposting of rice and vegetable residues: Optimization of process conditions. *Compost Science & Utilization*, 26(1), 23–30.
- Sharma, A., & Tripathi, R. (2019). Vermicomposting of legume residues: Nutrient enrichment and earthworm performance. *Bioresource Technology*, 278, 95–103.
- Silva, R., González, V., & Pérez, L. (2021). Vermicomposting of maize residues with *Eisenia fetida*: Growth and nutrient dynamics. *Compost Science & Utilization*, 29(4), 220–229.
- Srivastava, P., Nair, S., & Choudhary, R. (2024). Rice residues vermicomposting: Optimization and compost quality. *Bioresource Technology*, 384, 130–138.
- Suthar, S. (2009). Vermicomposting of vegetable wastes using *Eisenia fetida*: Earthworm growth and compost quality. *Ecological Engineering*, 35, 914–920.
- Suthar, S., Raju, K., & Prasad, R. (2024). Vermicomposting of invasive plant species and aquatics: Earthworm performance and nutrient dynamics. *Bioresource Technology*, 389, 125–138.
- Vimala, D. (2018). Vegetable waste vermicomposting using *Eudrilus eugeniae*: Effects on earthworm growth and compost quality. *Compost Science & Utilization*, 26(3), 123–130.
- Yadav, R. (2019). Sugarcane residue vermicomposting: Earthworm performance and nutrient recovery. *Waste Management*, 85, 42–50.
- Zhao, H., Li, Z., & Wang, L. (2012). Vermicomposting of peanut shells with *Eisenia fetida*: Effects on C/N ratio and nutrient enrichment. *Bioresource Technology*, 110, 200–206.



Potentialités de déchets, résidus et plantes envahissantes courants au Burundi pour le lombricompostage : une étude comparative



Eric Gilbert Kazitsa¹, Bonaventure Minani², Gustave Nkurunziza³, Salvator Kaboneka⁴, Cyrille Hicintuka⁵, Jacques Banyaka⁶, Micael Beun⁷, Oscar Nduwimana⁷



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CReSP) ;



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)



Université Polytechnique de Gitega
Faculté des Sciences Environnementales



Université du Burundi, Faculté
d'Agronomie et de Bio-ingénierie



Institut des Sciences Agronomique du
Burundi (ISABU)



Ministère de l'Environnement, de
l'agriculture, de l'Élevage, Direction de la
Fertilisation des Sols



International Fertilizer Development
Center (IFDC), Projet d'Appui à une
Gestion Responsable et Intégrée des Sols
(PAGRIS)



Résumé

Au Burundi, la valorisation des biomasses organiques issues des filières agricoles, agro-industrielles, animales et urbaines reste insuffisante, alors que leur accumulation croissante génère des nuisances environnementales et représente un potentiel inexploité pour l'agriculture. Cette étude vise à évaluer le potentiel de lombricompostage de déchets, résidus et plantes envahissantes courants au Burundi. Les objectifs étaient : (i) estimer les quantités annuelles et le potentiel de mobilisation des biomasses issues des principales filières agricoles et urbaines, (ii) caractériser leur composition physico-chimique (pH, conductivité électrique, rapport C/N, éléments nutritifs), et (iii) analyser les risques liés aux éléments traces métalliques (Pb, Cd, Ni, Co, Cu).

Les données ont été recueillies via des statistiques nationales (INSBU, 2024) et des enquêtes de terrain, puis analysées en laboratoire selon des protocoles

standardisés. Les résultats montrent que le secteur de l'élevage représente le gisement le plus volumineux et le plus constant (plus de 7,2 millions de tonnes/an), avec un potentiel de mobilisation très élevé pour les fumiers de bovins et de caprins. Les résidus de culture, notamment la paille de riz (452 339 t/an), présentent un potentiel de mobilisation moyen en raison de la saisonnalité et des usages concurrents. Les pulpes de café et certains sous-produits de palmeraie et de brasserie ont un potentiel de mobilisation élevé à très élevé. La caractérisation physico-chimique a révélé des substrats favorables au métabolisme des vers de terre, avec des rapports C/N, pH et teneurs en nutriments adaptés au lombricompostage. Les analyses d'éléments traces métalliques indiquent que la plupart des substrats sont conformes aux normes internationales de sécurité pour les amendements organiques.

Cette étude fournit une cartographie quantitative et qualitative des biomasses organiques disponibles pour le lombricompostage au Burundi et identifie les substrats prioritaires pour le développement d'unités de production durables. Les résultats soulignent l'importance d'une planification intégrée tenant compte de la saisonnalité, des usages concurrents et de la sécurité sanitaire. Ils offrent une base scientifique pour la promotion d'une agriculture durable, en valorisant les déchets et résidus tout en contribuant à la fertilité des sols.

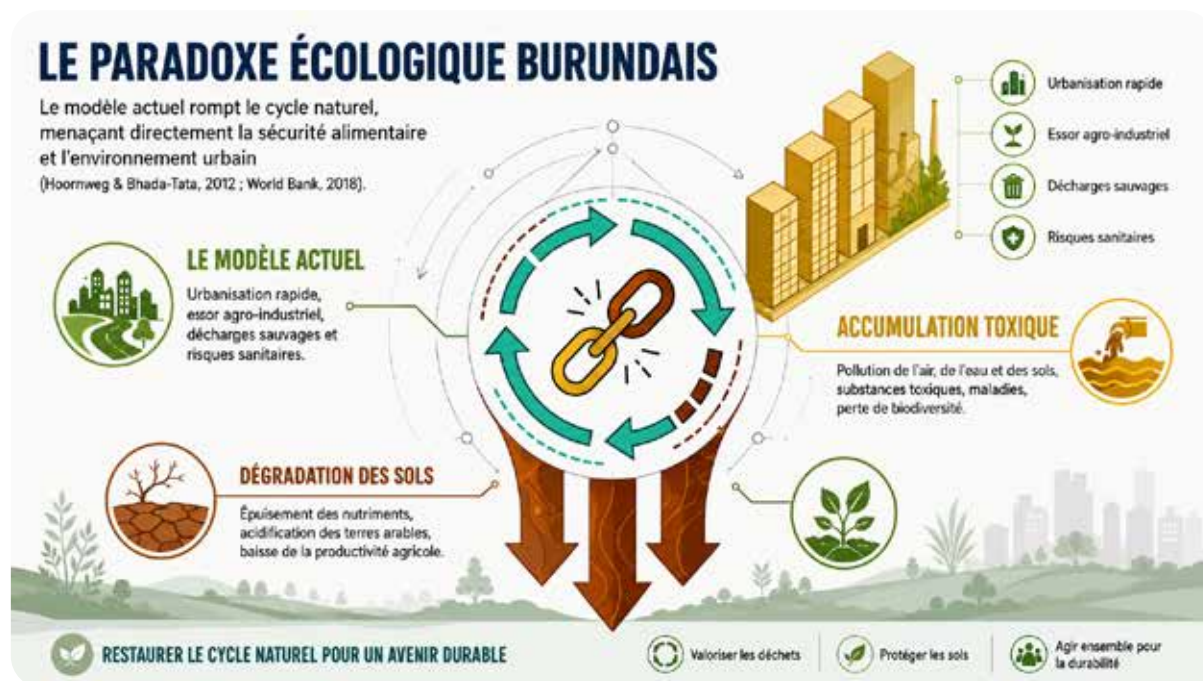
Mots-clés

Déchets organiques, Résidus agricoles, Lombricompostage, Composition physico-chimique, Éléments traces métalliques, Potentiel de mobilisation, Burundi.

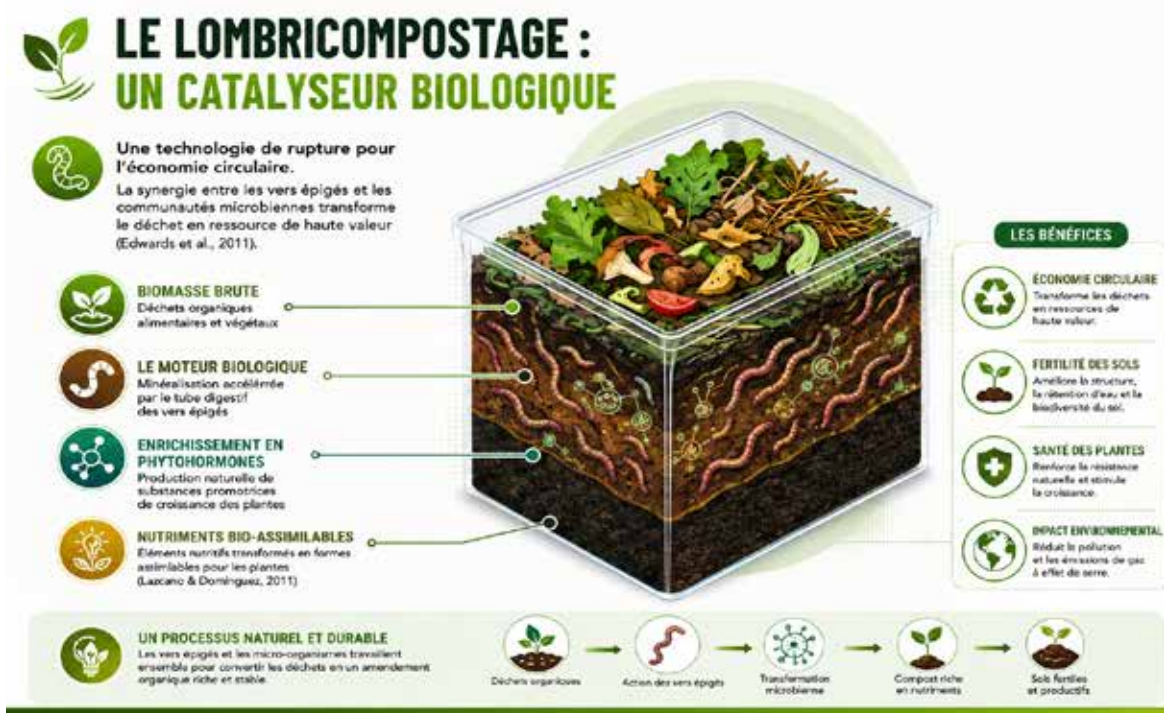


1. Introduction

Au Burundi, l'intensification agricole nécessaire pour subvenir aux besoins alimentaires d'une population en forte croissance démographique se heurte à un paradoxe écologique majeur : une dégradation accélérée de la fertilité des sols combinée à une gestion inefficace des biomasses organiques. L'économie du pays reposant largement sur le secteur primaire, l'épuisement des nutriments et l'acidification des terres arables menacent directement la sécurité alimentaire nationale. Parallèlement, l'urbanisation rapide, l'essor des filières agro-industrielles et le développement de l'élevage produisent des volumes croissants de résidus organiques. En l'absence de systèmes de valorisation adéquats, ces biomasses – résidus de culture, sous-produits industriels ou déjections animales – finissent souvent dans des décharges sauvages, générant nuisances environnementales et risques sanitaires (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012 ; World Bank, 2018).



Le lombricompostage s'impose comme une technologie de rupture pour l'économie circulaire agricole. Ce processus repose sur la synergie entre certaines espèces de vers de terre épigés et les communautés microbiennes (Edwards et al., 2011). Contrairement au compostage thermophile traditionnel, le passage de la matière organique dans le tube digestif des vers de terre accélère la minéralisation et produit un amendement stabilisé riche en phytohormones et nutriments assimilables par les plantes (Lazcano & Domínguez, 2011).



La viabilité d'une filière nationale de lombricompostage dépend du gisement théorique et du potentiel de mobilisation, souvent restreint par les usages concurrents (fourrage, litière, combustible) et la saisonnalité des récoltes (Smil, 1999 ; Lal, 2005 ; Njoroge et al., 2018 ; Osei et al., 2020). Une évaluation précise de la production annuelle et de la disponibilité effective est donc indispensable pour dimensionner des unités de production pérennes (Lim et al., 2016).

Au Burundi, une diversité de biomasses – résidus de récolte (riz, café), sous-produits agro-industriels (sucre, huile de palme, brasserie), fumiers et plantes envahissantes – présente un potentiel de valorisation encore largement inexploité. La réussite du processus dépend également de la qualité intrinsèque des substrats : rapport C/N, pH et conductivité électrique influencent directement le métabolisme des vers de terre (Domínguez & Edwards, 2011). Enfin, l'usage de déchets urbains, industriels ou d'origine animale soulève la question de l'innocuité sanitaire, notamment concernant l'accumulation d'éléments traces métalliques (Alloway, 2013 ; Gong et al., 2018).

Cette étude vise à combler le déficit de données techniques en identifiant les substrats présentant un potentiel optimal pour le lombricompostage au Burundi. Les objectifs spécifiques sont :

- Estimer les quantités annuelles et évaluer le potentiel de mobilisation des biomasses issues des principales filières (riz, café, sucre, huile de palme, élevage, abattoir, brasserie) et des zones urbaines, en croisant les statistiques nationales récentes (INSBU, 2024) avec des investigations de terrain (Osei et al., 2020).
- Caractériser la composition physico-chimique de ces ressources (pH, CE, C, N, P, K, Ca, Mg) selon des protocoles standardisés pour déterminer leur aptitude au lombricompostage.
- Évaluer les risques de contamination par les ETM, en comparant les teneurs mesurées aux normes internationales de sécurité pour les intrants organiques (European Commission, 2019).
- Formuler des recommandations stratégiques pour la gestion de ces déchets, en distinguant les substrats utilisables comme aliments directs de ceux nécessitant un mélange équilibré pour la litière (Lim et al., 2016).

2. Matériel et méthodes

2.1. Estimation de la disponibilité et des quantités annuelles

L'estimation des gisements de déchets et résidus organiques a reposé sur une approche méthodologique combinant l'analyse de données secondaires nationales et des investigations empiriques de terrain.

2.1.1. Collecte des données de base

Pour les filières structurées (riz, café, sucre, huile de palme) et le secteur de l'élevage, les statistiques nationales récentes fournies par l'Institut National de la Statistique du Burundi (INSBU, 2024) ont servi de base de calcul. Afin de lisser les fluctuations interannuelles, les moyennes de production ou d'effectifs du cheptel pour la période 2020-2023 ont été systématiquement calculées. Pour les biomasses non documentées par les statistiques officielles – notamment les résidus de bananes à bière, les plantes envahissantes et les déchets de marchés spécifiques (Gitega, Ngozi, Rutana) – des investigations de terrain ont été menées via des observations directes et des entretiens semi-structurés avec les gestionnaires de sites (société IMENA, OBUHA, responsables de décharges).

2.1.2. Calcul des quantités annuelles

Pour un déchet/résidu donné, la quantité annuelle a été estimée, en appliquant un coefficient de génération spécifique dérivé d'études antérieures de biomasses végétales en systèmes tropicaux (Smil, 1999 ; Lal, 2005) (Tableau 3.1), en utilisant la formule :

Quantité annuelle = $P_c \times R_c$

où :

- P_c = moyenne annuelle (2020-2023) de l'élément de production servant de base de calcul
- R_c = Moyenne du coefficient de génération selon l'élément utilisé comme base de calcul.

2.1.3. Évaluation du potentiel de mobilisation

Le potentiel de mobilisation pour le lombricompostage a été déterminé en croisant la continuité de production et l'importance des usages concurrents. La continuité a été classée selon la durée de génération : totale (12 mois, cas des fumiers et plantes pérennes), élevée (≥ 7 mois), moyenne (5-6 mois) ou faible (< 5 mois) (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012 ; World Bank, 2018). Les usages concurrents (fourrage, combustible, construction) ont été évalués pour identifier la "disponibilité nette" réelle pour la transformation.

Les usages concurrents (fourrage, combustible, construction) ont été évalués pour identifier la "disponibilité nette" réelle pour la transformation.



Tableau 3.1



Données de base et coefficients utilisés pour quantifier les déchets et résidus

CATÉGORIE	DÉCHET / RÉSIDUS	ÉLÉMENT AYANT SERVI DE BASE DE CALCUL ET RÉFÉRENCE	VALEUR UTILISÉE COMME BASE DE CALCUL	INTERVALLE DU COEFFICIENT DE GÉNÉRATION	MOYENNE DU COEFFICIENT DE GÉNÉRATION	RÉFÉRENCE(S) POUR COEFFICIENT
 RÉSIDUS DE RIZ	Son de riz*	Production nationale de riz paddy (INSBU, 2024)	311 958 (t/an)*	0,08–0,12	0,10	AfricaRice, 2013; IRRI, 2021
	Paille de riz*	Idem	Idem	1,30–1,60	1,45	AfricaRice, 2013; Lal, 2005
	Balles de riz*	Idem	Idem	0,18–0,23	0,21	AfricaRice, 2013; IRRI, 2021
 RÉSIDUS DE CAFÉ	Pulpe de café*	Production nationale de café cerise (INSBU, 2024)	17 885 (t/an)*	0,40–0,50	0,45	Murthy & Naidu, 2012
 RÉSIDUS DE SUCRERIE	Bagasse*	Production nationale de sucre (INSBU, 2024)	18 950 (t/an)*	2,70–3,20	3,00	Hugot, 1986
	Écume*	Idem	Idem	0,03–0,06	0,05	Hugot, 1986
	Cannes à sucre déclassées*	Idem	Idem	0,15–0,20	0,18	Présente étude
 DÉCHETS ET RÉSIDUS D'HUILERIE DE PALME	Raffles de palmier à huile*	Production nationale d'huile de palme (INSBU, 2024)	28 136 (t/an)*	1,10–1,35	1,23	Corley & Tinker, 2016
	Fibres de mésocarpe*	Idem	Idem	0,60–0,75	0,68	Corley & Tinker, 2016
	Coques de noyaux*	Idem	Idem	0,05–0,09	0,07	Khoo et al., 2011
	Effluents décantés*	Idem	Idem	0,60–0,70	0,65	Schuchardt et al., 2007
	Frondes*	N/A	N/A	—	—	—
 FUMIER D'ANIMAUX HERBIVORES	Bovins*	Cheptel national (INSBU)	1 088 002 (têtes)*	3,50–4,50	4,00	FAO (2011) ; Lal (2005)
	Caprins*	Idem	3 983 935 (têtes)*	0,50–0,70	0,60	ASAE (2005) ; FAO (2011)
	Ovins*	Idem	689 074 (têtes)*	0,50–0,75	0,63	ASAE (2005)
	Lapins*	Idem	995 515 (têtes)*	0,03–0,05	0,04	Lebas (2007) ; FAO (2011)
 CONTENU GASTRO-INTESTINAL BOVIN	Au niveau national*	Nombre de bovins abattus	80 086 (têtes)*(I)*	15–22 kg/tête	18	FAO, 2011
	À l'abattoir de la ville de Bujumbura**	Idem	19 800 (têtes) **	15–22 kg/tête	18	FAO, 2011
	À l'abattoir de la ville de Ngozi**	Idem	6 296 (têtes) **	15–22 kg/tête	18	FAO, 2011
 DÉCHETS ET RÉSIDUS DE BRASSERIE	Pelures de bananes à bière (IMENA)**	Régimes de bananes brassés (Présente étude)	480 (t/an)**	0,30–0,40	0,35	Wadhwa & Bakshi, 2013

CATÉGORIE	DÉCHET / RÉSIDUS	ÉLÉMENT AYANT SERVI DE BASE DE CALCUL ET RÉFÉRENCE	VALEUR UTILISÉE COMME BASE DE CALCUL	INTERVALLE DU COEFFICIENT DE GÉNÉRATION	MOYENNE DU COEFFICIENT DE GÉNÉRATION	RÉFÉRENCE(S) POUR COEFFICIENT
	Pédoncules de régimes de bananes à bière (IMENA)**	Idem	Idem	0,10–0,15	0,13	Mohapatra et al., 2010 ; Emaga et al., 2007
	Herbes utilisées pour filtration de la bière de bananes (IMENA)**	Idem	Idem	N/A	0,10	Présente étude
	Résidus de levures (Burundi Brewery)**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
	Drêches de céréales (BRAGITA)**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
	Boues de décantation (BRAGITA)**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
 RÉSIDUS DE BOIS	Sciure**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
	Copeaux**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
 BIOMASSE DE PLANTES ENVAHISSANTES	Jacinthe d'eau** (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
	Lantanaire (<i>Lantana camara</i>)**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
	Tournesol du Mexique (<i>Tithonia diversifolia</i>)**	Non déterminé	Non déterminé	—	—	—
 DÉCHETS DE MARCHÉS	Gitega**	Masse (Présente étude)	1 796 (t/an)**	—	0,75	Présente étude
	Ngozi**	Masse (Présente étude)	650 (t/an)**	—	0,79	Présente étude
	Gihofi (pour comparaison)**	Masse (Présente étude)	N/A	—	0,85	Présente étude
 DÉCHETS MUNICIPAUX	Ville de Bujumbura**	Masse (Présente étude)	6 261 (t/an)**	—	0,70	Présente étude
	Ville de Rumonge**	Masse (Présente étude)	N/A	—	0,40	Présente étude

(†) : Pas de moyenne calculée faite de données pour 2022 et 2023. Aussi, en raison d'un nombre anormalement bas pour 2020 (INSBU). Seules les données de l'année 2021 ont été retenues.
 (*) : données à l'échelle nationales (INSBU).
 (**) : données locales empiriquement obtenues sur terrain.

LÉGENDE

 Idem : même source ou référence  N/A : non applicable  — : non disponible ou non déterminé  (t/an) : tonne par an

2.2. Échantillonnage et analyses physico-chimiques

2.2.1. Procédure d'échantillonnage

Afin d'assurer la représentativité des données, un échantillonnage standardisé a été réalisé sur les sites de production et de collecte identifiés (Tableau 3.2). Conformément aux protocoles internationaux pour l'analyse des substrats organiques (TMECC, 2002 ; AOAC, 2005), trois échantillons élémentaires d'environ 3 kg chacun ont été prélevés à différents points de chaque gisement (bac de collecte, station de lavage, décharge publique).

Ces prélèvements ont ensuite été homogénéisés pour constituer un échantillon composite représentatif de 3 kg par substrat. Les échantillons ont été acheminés au Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agroalimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) pour caractérisation.



Tableau 3.2



Déchets et plantes invasives analysés, les sites de provenance et leurs coordonnées géographiques

ÉCHANTILLON	LOCALITÉ, SITE	LATITUDE SUD (°)	LONGITUDE EST (°)
 Paille de riz	Bubanza, Gihanga, espace rizicole	3,188	29,296
 Balles et son de riz	Bubanza, Gihanga, Unité de décorticage de riz,	3,189	29,304
 Pulpes de café	Ngozi, Nkaka, station de lavage, bac de collecte	2,930	29,836
 Ecume, bagasse et Cannes à sucre déclassées	Gihofi, SOSUMO, lieux de collecte respectifs	4,027	30,156
 Raffles, frondes, fibres de mésocarpes, coques de noyaux de palmier à huile ; Effluents décantés d'huilerie de palme	Rumonge, Kanyenkoko Huilerie de palme artisanale	3,986	29,437
 Contenu gastro-intestinal de bovins Abattoir de la ville de Bujumbura	Système de bacs de collecte dans les enceintes de l'abattoir	3,365	29,386
 Contenu gastro-intestinal de bovins Abattoir de la ville de Ngozi	Bac de collecte dans à l'abattoir	3,904	29,826
 Pelures, pédoncules de régimes de bananes à bière ; herbes utilisées pour la filtration de la bière de bananes	Kayanza, société IMENA, site de stockage	2,935	29,604
 Résidus de levures de brasserie de bière	Ngozi, société Burundi Brewery	2,889	29,833
 Drèche de brasserie de bière ; Boue de décantation des eaux usées de brasserie de bière	Gitega, BRAGITA, lieux de recueil	3,394	29,879
 Copeaux et sciure de bois	Bujumbura, Bwiza, Atelier de menuiserie	3,371	29,369
 Jacinthe d'eau (Eichhornia crassipes)	Mutimbuzi, Kajaga, colonie de jacinthe d'eau sur la rive burundaise du Lac Tanganyika	3,359	29,340

ÉCHANTILLON	LOCALITÉ, SITE	LATITUDE SUD (°)	LONGITUDE EST (°)
 Lantanie (Lantana camara)	Kirundo, Réserve naturelle de Murehe	2,372	30,225
 Tournesol du Mexique (Tithonia diversifolia)	Bujumbura, Espace vert de l'Ecole Normale Supérieure du Burundi (ENS)	3,361	29,386
 Déchets du marché de la ville de Gitega	Dépotoir du marché Kukabasazi	3,434	29,926
 Déchets du marché de la ville de Ngozi	Dépotoir du marché	2,907	29,831
 Déchets de marché de Bukemba	Rutana, Gihofi, dépotoir du marché	-	-
 Déchets municipaux de Bujumbura	Buterere, décharge publique de Mubone	3,325	29,356
 Déchets municipaux de Rumonge	Rumonge, Kanyenkoko, décharge publique de la ville	3,987	29,442

2.2.2. Analyses de la composition physico-chimique

Plusieurs paramètres critiques pour le métabolisme des vers de terre et la qualité du lombricompost ont été analysés (Edwards et al., 2011 ; Lazcano & Domínguez, 2011) (tableaux 3.4a et 3.4b) :

- pH et Conductivité Électrique (CE) : Mesurés dans un extrait aqueux (ratio 1:5) selon les normes ISO 10390 et ISO 11265.
- Azote Total (N) : Déterminé par la méthode Kjeldahl (Bremner, 1996).
- Carbone Organique (C) : Évalué par oxydation humide selon la méthode Walkley-Black. Le rapport C/N a été calculé par le ratio carbone organique/azote total.
- Phosphore Assimilable (P) : Déterminé par la méthode d'Olsen.
- Cations Échangeables (K, Ca, Mg) : Le potassium a été mesuré par photométrie de flamme, tandis que le calcium et le magnésium ont été quantifiés par spectrométrie d'absorption atomique (SAA).

2.2.3. Analyse des éléments traces métalliques (ETM)

L'innocuité des substrats a été vérifiée par le dosage des métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Co et Cu). Après une digestion acide selon la norme ISO 11466, les concentrations ont été déterminées par SAA (Alloway, 2013 ; Gong et al., 2018). Les teneurs obtenues ont été systématiquement comparées aux normes internationales applicables aux amendements organiques afin de jauger la compatibilité et la sécurité sanitaire des déchets identifiés (European Commission, 2019).

2.3. Traitement des données et comparaisons

Les données ont fait l'objet d'une analyse comparative croisant les caractéristiques physico-chimiques, l'innocuité (ETM) et la disponibilité réelle (quantité et potentiel de mobilisation). Cette synthèse a permis de formuler des recommandations pratiques pour la valorisation, en distinguant l'usage des substrats comme source alimentaire directe pour les vers de terre de leur usage comme litière ou agent de structuration (Domínguez & Edwards, 2011 ; Lim et al., 2016).

3. Résultats



3.1. Quantités et disponibilité annuelles des biomasses

L'inventaire des biomasses a permis d'identifier une diversité de gisements dont les volumes et le potentiel de mobilisation varient significativement selon les filières (Tableau 3.3).

Le secteur de l'élevage constitue, en termes de volume brut, le gisement le plus massif et le plus constant pour le pays. Les fumiers des herbivores (bovins, caprins, ovins et lapins) représentent un cumul dépassant les 7,2 millions de tonnes par an. Les fumiers bovins (4 352 008 t/an) et caprins (2 390 361 t/an) dominent largement cette catégorie. Contrairement aux résidus de récolte, ces biomasses affichent une continuité de production totale (12 mois) et un potentiel de mobilisation jugé "très élevé", car elles ne font l'objet d'aucun usage concurrent industriel ou énergétique majeur répertorié dans cette étude.

La filière rizicole génère les tonnages annuels les importants parmi les résidus de culture, avec une production annuelle estimée à 452 339 tonnes de paille de riz. Toutefois, sa disponibilité pour le lombricompostage est jugée moyenne en raison de sa forte saisonnalité (production < 5 mois) et d'usages concurrents majeurs comme fourrage et litière pour le bétail. En revanche, les balles de riz (65 511 t/an) présentent un potentiel de mobilisation élevé, malgré leur usage partiel comme combustible.

Dans la filière caféière, les pulpes de café (8 048 t/an) affichent un potentiel de mobilisation très élevé, car elles sont actuellement considérées comme des déchets de décharge sans usage concurrent majeur. Concernant la filière sucrière, la bagasse (56 850 t/an) a un potentiel faible car elle est massivement valorisée pour l'énergie thermique, tandis que l'écume (948 t/an) et les cannes déclassées (3 000 t/an) sont hautement disponibles.

Les résidus de palmier à huile offrent une continuité de production totale (12 mois). Les fibres de mésocarpe (19 132 t/an) et les effluents décantés (18 288 t/an) présentent un potentiel de mobilisation très élevé, n'ayant aucun usage concurrent identifié. Dans le secteur des abattoirs, le contenu gastro-intestinal de bovins apparaît comme une ressource stratégique avec un potentiel très élevé, tant au niveau national qu'au niveau local.

Les déchets municipaux et de marchés constituent des gisements pérennes. La fraction organique des déchets de la ville de Bujumbura (4 383 t/an) présente un potentiel de mobilisation très élevé. Enfin, les plantes envahissantes comme la jacinthe d'eau, le lantaniér et le tournesol du Mexique ont été identifiées comme des ressources à potentiel très élevé en raison de leur caractère pérenne.

Tableau 3.3



Quantités annuelles, mode de production, usage et potentiel de mobilisation pour le lombricompostage des résidus, déchets et plantes étudiées

Catégorie de substrats	Substrat	Quantité estimée (tonnes/an)	Continuité de production	Usages concurrents significatifs	Potentiel de mobilisation
Résidus de riz	Paille de riz	452 339	Faible (< 5 mois)	Fourrage et litière pour bovins, paillage.	Moyen (saisonnier)
	Balles de riz	65 511	Faible (< 5 mois)	Briquettes combustibles, litière dans l'élevage de volaille	Élevé
	Son de riz	31 196	Faible (< 5 mois)	Alimentation bétail/volaille	Faible (forte concurrence)
Résidus de café	Pulpes de café	8 048	Faible (< 5 mois)	Aucun majeur (décharge)	Très élevé
Résidus de sucrerie	Bagasse de canne à sucre	56 850	Moyenne (7-8 mois)	Énergie (chaudières SOSUMO)	Faible
	Écume de canne à sucre	948	Moyenne (7-8 mois)	Amendement direct (fermes)	Élevé
	Fragments et cannes à sucre déclassées	3000	Moyenne (7-8 mois)	Aucun	Très élevé
Déchets et résidus d'huilerie de palme	Rafles de palmier à huile	34 607	Totale (12 mois)	Cuisson pour récupérer l'huile	Moyen
	Fibres de mésocarpes de palmier à huile	19 132	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
	Coques de noyaux de palmier à huile	19 70	Totale (12 mois)	Cuisson	Faible
	Effluents décantés d'huilerie de palme	18 288	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
	Frondes de palmier		Totale (12 mois)	Constructions artisanales (enclos, autres), cuissons	Très faible
Fumier animal	Bovins	4 352 008	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
	Caprins	2 390 361	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
	Ovins	434 117	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
	Lapins	39 821	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
Contenu gastro-intestinal bovin	Contenu gastro-intestinal de bovins au niveau national	Non quantifié	Totale (12 mois)	Aucun (déchet d'abattoir)	Très élevé
	Contenu gastro-intestinal de bovins à l'abattoir de la ville de Bujumbura	356	Totale (12 mois)	Aucun (déchet d'abattoir)	Très élevé
	Contenu gastro-intestinal de bovins à l'abattoir de la ville de Ngozi	113	Totale (12 mois)	Aucun (déchet d'abattoir)	Très élevé
Déchets et résidus de brasserie	Peaux/pelures de bananes à bière (IMENA)	168	Totale (12 mois)	Alimentation porcine locale	Moyen
	Pédoncules de régimes de bananes à bière (IMENA)	62	Totale (12 mois)	Aucun majeur	Très élevé
	Herbes utilisées dans la filtration de la bière de bananes (IMENA)	48	Totale (12 mois)	Aucun majeur	Très élevé
	Résidus de levures (Burundi Brewery)	Non quantifié	Totale (12 mois)	Alimentation animale	Très faible
	Drèche (BRAGITA)	Non quantifié	Totale (12 mois)	Alimentation animale	Nul
	Boue de décantation des eaux usées (BRAGITA)	Non quantifié	Totale (12 mois)	Aucun	Très élevé
Résidus de bois	Copeaux et sciure de bois (ville de Bujumbura, Ngozi, Gitega)	Non quantifié	Totale (12 mois)	Énergie (chaudières SAVONOR)	Faible
Biomasse de plantes envahissantes	Eicchornia crassipess	Non quantifié	Totale (Pérenne)	Vannerie	Très élevé
	Lantana camara	Non quantifié	Totale (Pérenne)	Clôtures vives (rares)	Très élevé
	Tithonia diversifolia	Non quantifié	Totale (Pérenne)	Paillage, haies	Très élevé
Déchets de marchés	Marché de la ville de Gitega (fraction organique)	1347	Totale (12 mois)	Alimentation animale	Élevé

	Marché de la ville de Ngozi (fraction organique)	514	Totale (12 mois)	Alimentation animale, paillage	Élevé
	Marché de Gihofi (fraction organique)	80	Totale (12 mois)	Alimentation animale, paillage	Élevé
Déchets municipaux	Ville de Bujumbura	4 383	Totale (12 mois)	Aucun (encombrement et pollution)	Très élevé
	Ville de Rumonge	Non quantifié	Totale (12 mois)	Aucun (encombrement et pollution)	Très élevé

3.2. Caractéristiques physico-chimiques des substrats

Pour les fumiers animaux, n'ayant pas fait l'objet d'analyses directes, des valeurs de référence issues de la littérature ont été intégrées pour comparaison (Tableau 3.4b). L'analyse de la composition physico-chimique révèle une grande hétérogénéité entre les catégories de substrats, influençant directement leur potentiel d'incorporation dans les litières de vers de terre (Tableaux 3.4a et 3.4b).

3.2.1. Équilibre Carbone/Azote (C/N) et pH

Le rapport C/N, indicateur clé de la biodégradabilité, varie de manière extrême. Les substrats les plus riches en azote sont le tournesol du Mexique (9,23), la drèche de brasserie (10,1) et, selon la littérature, les fumiers de lapin (10-14) et d'ovins (12-15). À l'inverse, la paille de riz (71,98) et surtout la sciure de bois (373,3) affichent des rapports très élevés, nécessitant un mélange avec les sources azotées précitées (fumiers ou plantes activatrices) pour optimiser l'activité des vers de terre.

Le pH des substrats oscille entre des valeurs très acides pour les contenus gastro-intestinaux de Bujumbura (4,73) ou les pulpes de café (5,13) et des valeurs alcalines pour les déchets du marché de Gitega (8,79). La plupart des plantes envahissantes (*Lantana camara*, pH = 6,63 ; *Eichhornia crassipes*, pH = 6,37) ainsi que les fumiers (pH 7,8-8,5 selon la littérature) se situent dans la plage optimale (pH = 6-8) pour la survie des vers de terre épigés.

3.2.2. Richesse minérale et Conductivité Électrique (CE)

Les teneurs en nutriments majeurs (N, P, K) montrent des contrastes frappants :

- Pour l'azote (N), le drèche de brasserie (5,97 %) et le tournesol du Mexique (3,48 %) sont les sources les plus riches en azote (N), suivies par les fumiers de caprins et de lapins (1,5-3 % selon la littérature).
- Pour le phosphore (P.), l'écume de canne à sucre (4 657 mg/kg) et les rafles de palmier (4 332 mg/kg) se distinguent par une richesse exceptionnelle en Phosphore (P), complétée par le fumier de lapin (~2500 mg/kg).
- Les concentrations en potassium (K) les plus élevées se trouvent dans les déchets municipaux de Rumonge (20 140 mg/kg) et de Bujumbura (18 570 mg/kg).

La conductivité électrique atteint des niveaux critiques pour certains substrats comme les pelures de bananes (15 100 µS/cm) et le tournesol du Mexique (12 130 µS/cm). Ces valeurs suggèrent la nécessité d'un prétraitement par lavage ou d'une dilution importante avec des substrats à faible salinité, tels que la bagasse (393 µS/cm) ou les fumiers, pour éviter tout stress osmotique chez les vers de terre.



Composition physicochimique des déchets, résidus et plantes envahissantes analysés

Déchets/résidus et provenance	Matière sèche (%)	Fibres (%)	pH eau	CE (µS/cm)	N total (%)	P total (mg/kg MS)	C org. (%)	Rapport C/N	Ca total (mg/kg)	K total (mg/kg)	Mg total (mg/kg MS)
Paille de riz (Gihanga)	81.65	47.96	6.05	966	0.45	538	32.39	71.98	1391	847.1	1286
Balles de riz (Gihanga)	84.91	43.39	5.9	1313	0.79	446	31.09	39.35	1117	2648	242.8
Son de riz (Gihanga)	89.6	34.00	5.78	1785	0.97	342	32.9	34	1135	3195	1115
Pulpes de café (Station de lavage Nkaka, Ngozi)	86.01	73.82	5.13	835	0.48	46	37.99	79.15	6	111.2	31.42
Bagasse cannes à sucre (SOSUMO)	50.2	43.99	5.07	393	0.32	329	32.18	100.56	814.2	36.04	235.7
Ecume cannes à sucre (SOSUMO)	36.77	17.45	6.75	1378	1.01	4657	32.59	32.27	16720	4958	8650
Raffles de palmier à huile (Huilerie, Rumonge)	53.96	61.93	7.68	1868	2.94	4332	35.98	12.24	631.8	4277	2098
Fibres de mésocarpes de palmier à huile (Huilerie, Rumoge)	72.42	39.91	5.49	674	2.48	220	37.07	14.95	2455	211.8	566.2
Frondes de palier à huile (Palmeraie, Rumoge)	81.9	39.7	6.43	3600	0.86	1425	35.4	41.1	5065	7382	2140
Coques d'amandes vide de palmier à huile (Huilerie, Rumonge)	88.20	21.9	5.7	560	0.47	413	15.4	32.8	888	935	379
Effluents décantés d'huilerie de palme (Huilerie, Rumonge)	41	13.9	6.06	1042	0.56	1533	29.0	51.79	6756	964	1317
Contenu gastro-intestinal de bovins (Abattoir Bujumbura)	26.43	21.24	4.73	4020	0.12	1721	32.53	271.08	2611	1130	282.8
Contenu gastro-intestinal de bovins (Abattoir Ngozi)	16.27	35.36	8.22	4640	2.15	1075	36.01	16.75	6465	6690	517.9
Pelures de bananes à bière (IMENA)	21.82	13.82	4.93	15100	1.26	1504	41.79	33.17	2956		1092
Pédoncles de régimes de bananes à bière (IMENA)	9.23	34.76	5.9	10700	0.68	636	32.51	47.81	1544		1052
Herbes utilisées pour la filtration du vin de bananes (IMENA)	17.90	24.6	4.77	1040	1.52	740	38.7	25.5	1024	4176	369
Résidus de levures (Burundi Brewery)	13.5	0.76	5.72	6020	1.2	1020	6.45	5.4	3188	184	486
Drêche de brasserie de bière (BRAGITA)	34.80	10.4	5.96	1251	5.97	3475	60.4	10.1	6306	7681	539
Boue de décantation des eaux usées de brasserie de bière (BRAGITA)	36.60	2.74	6.51	687	0.8	1636	9.8	12.3	5131	67.7	176
Sciure de bois (Menuiserie de Bwiza)	70.20	67.1	4.75	112	0.12	1143	44.8	373.3	379	65.3	200
Copeaux de bois (Menuiserie de Bwiza)	51.10	71.6	5.01	570	0.12	0.326	39.7	330.8	1184	1186	333
Jacinthe d'eau (Eichornia crassipes) (Bujumbura, Kajaga)	25.57	18.73	6.37	1300	1.79	4298	25.02	13.98	20890		378
Lantanier (Lantana camara) (Kirundo, Murehe)	83.3	19.05	6.63	4.48	1.98	1050	55.13	27.84	8595		1025
Tournesol du Mexique (Tithonia diversifolia) (Bujumbura, ENS)	54.53	19.19	6.41	12130	3.48	2835	32.13	9.23	31580		4296
Déchets de marché (Ville de Gitega)	17.43	10.95	8.79	4010	1.02	429	19.46	19.08		8270	1032
Déchets de Marché (Ville de Ngozi)	45.99	18.92	6.9	3080	0.9	3965	13.55	15.06	6	4229	952.3
Déchets du marché de Gihofi (dépotoir du marché)	51.00	20.3	7.01	1085	0.74	160	12.1	16.3	15459	3177	1536
Déchets municipaux de Bujumbura (Décharge publique Mubone)	48.51	15.57	7.61	5490	0.89	2236	23.66	26.58	28230	18570	2189
Déchets municipaux de Rumonge (décharge publique Kanyenkoko)	60.10	26.6	7.61	6290	1.38	228	23	16.7	24860	20140	1849

Tableau 3.4 b



Caractéristiques

moyennes des fumiers (Synthèse bibliographique)

Substrat		pH	Rapport C/N	N total (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Référence
Fumier bovin		7,8 - 8,0	21 - 25	0,5 - 1,5	~ 700	~ 2700	Lal (2005) ; FAO (2011)
Fumier caprin		8,3 - 8,5	15 - 18	1,5 - 2,5	~ 1700	~ 5000	ASAE (2005) ; Osei et al. (2020)
Fumier ovin		8,2 - 8,5	12 - 15	1,8 - 2,2	~ 800	~ 1500	ASAE (2005)
Fumier lapin		7,0 - 7,6	10 - 14	2,0 - 3,0	~ 2500	~ 3200	Lebas (2007) ; FAO (2011)

3.3. Teneurs en éléments traces métalliques (ETM) et innocuité

L'analyse des éléments traces métalliques (Pb, Cd, Ni, Co, Cu, Zn) est un indicateur déterminant pour la sécurité sanitaire du lombricompost final (Alloway, 2013). Les résultats montrent que la majorité des substrats étudiés, y compris les fumiers documentés dans la littérature, respectent les seuils de toxicité (Tableau 3.5).

Les teneurs en Plomb et en Cadmium restent globalement faibles (Tableau 3.5) et conformes aux normes internationales (European Commission, 2019).

- Le Plomb oscille entre des valeurs indétectables ($\leq 1,6$ mg/kg) pour les résidus de riz et de café, et des concentrations modérées pour les déchets municipaux de Bujumbura (8,33 mg/kg).
- Selon Njoroge et al. (2018), les fumiers de bovins et de caprins en zone rurale présentent des teneurs en Pb et Cd quasi nulles, renforçant leur rôle de "substrats diluants" pour les déchets urbains plus chargés.

Le Nickel (Ni) présente des concentrations contrastées. Si les résidus de café en sont exempts, les sous-produits de l'huilerie de palme affichent des teneurs atypiques (84,09 mg/kg pour les rafles).

Concernant le Cuivre (Cu) et le Zinc (Zn) :

- Le lantier (*Lantana camara*) se distingue par une teneur élevée en Cuivre (130,5 mg/kg).
- Fumiers : La littérature (ASAE, 2005) souligne que les fumiers issus d'élevages intensifs peuvent contenir du Zinc et du Cuivre résiduels provenant des compléments alimentaires. Toutefois, dans le contexte du Burundi où l'élevage est majoritairement extensif, ces teneurs restent généralement bien en dessous des seuils de phytotoxicité, garantissant une innocuité sanitaire élevée.

Les boues de décantation de brasserie et les déchets municipaux présentent des profils multi-élémentaires plus complexes. Leur variabilité suggère que ces substrats devraient préférentiellement être utilisés en mélange avec des biomasses "propres" comme les fumiers animaux ou les plantes envahissantes pour diluer la charge métallique résiduelle (Lim et al., 2016).

Tableau 3.5



Teneurs en métaux lourds

des déchets, résidus et plantes envahissantes analysés

Déchets/résidus et provenance	Pb (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	Ni (mg/kg MS)	Co (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)	Zn (mg/kg MS)
Balles/coques de riz (Gihanga)	≤ 1,6	≤ 0,06	24,77	1,04	0,79	-
Paille de riz (Gihanga)	≤ 1,6	≤ 0,06	45,38	1,06	1,27	214
Son de riz (Gihanga)	≤ 1,6	≤ 0,06	14	1,17	1,26	750
Pulpes de café (Station de lavage Nkaka, Ngozi)	≤ 1,6	≤ 0,06	1,04	0,87	5	79,2
Bagasse cannes à sucre (SOSUMO)	6,72	≤ 0,1	3,48	5,03	830	100,6
Ecume cannes à sucre (SOSUMO)	4,23	≤ 0,06	3,05	6,36	6,17	26,3
Raffles de palmier à huile (Huilerie, Rumoge)	2,4	≤ 0,06	84,09	9,82	19,98	12,2
Fibres de mésocarpes de palmier à huile (Huilerie, Rumoge)	1,6	≤ 0,06	94,08	2,83	8,36	15,0
Frondes de palier à huile (Palmeraie, Rumoge)	2,76	≤ 0,06	36	3,51	83,4	846
Coques d'amandes vide de palmier à huile (Huilerie, Rumonge)	3,83	≤ 0,06	4,61	1,75	8,53	477
Effluents décantés d'huilerie de palme (Huilerie, Rumonge)	-	-	-	-	-	-
Contenu gastro-intestinal de bovins (Abattoir Bujumbura)	2,73	≤ 0,06	1,99	1,87	4,65	315,8
Contenu gastro-intestinal de bovins (Abattoir Ngozi)	1,19	≤ 0,06	1,85	2,89	3,9	-
Pelures de bananes à bière (IMENA)	3,99	≤ 0,06	2,36	3,24	0,28	33,2
Pédoncules de régimes de bananes à bière (IMENA)	2,08	≤ 0,08	≤ 0,6	2,14	1,64	47,8
Herbes utilisées pour la filtration du vin de bananes (IMENA)	2,08	≤ 0,08	≤ 0,6	0,816	6,94	303
Résidus de levures (Burundi Brewery)	≤ 1,6	≤ 0,04	≤ 0,34	≤ 0,5	35,8	565
Drèche de brasserie de bière (BRAGITA)	1,6	≤ 0,06	1,01	1,92	0,79	535
Boue de décantation des eaux usées de brasserie de bière (BRAGITA)	9,52	≤ 0,06	12	1,58	5,47	413
Sciure de bois (Menuiserie de Bwiza)	≤ 1,6	≤ 0,09	2,67	0,93	59,1	625
Copeaux de bois (Menuiserie de Bwiza)	-	≤ 0,06	≤ 8	≤ 5	0,989	0,8
Jacinthe d'eau (Eichhornia crassipes) (Bujumbura, Kajaga)	8,57	≤ 0,04	1,49	4,64	3,84	14,0
Lantier (Lantana camara) (Kirundo, Murehe)	6,57	≤ 0,06	2,59	2,72	130,5	27,8
Tournesol du Mexique (Tithonia diversifolia) (Bujumbura, ENS)	≤ 1,6	≤ 0,07	2,36	3,24	9,55	9,2
Déchets de marché (Ville de Gitega)	8,61	≤ 0,06	8,14	5,09	70,1	19,1
Déchets de Marché (Ville de Ngozi)	9,58	≤ 0,06	3,54	2,6	48,49	15,1
Déchets du marché de Gihofi (dépotoir du marché)	-	≤ 0,6	≤ 8	20	49,4	151
Déchets municipaux de Bujumbura (Décharge publique Mubone)	8,33	≤ 0,06	42,18	4,85	42,62	26,6
Déchets municipaux de Rumonge (décharge publique Kanyenkoko)	-	≤ 0,06	≤ 8	≤ 5	13,1	81,4

4. Discussion



La confrontation des résultats de cette étude avec la littérature scientifique internationale confirme le potentiel stratégique des biomasses burundaises, tout en révélant que les déjections animales constituent le véritable socle de viabilité pour une filière nationale de lombricompostage.

4.1. Aptitude physico-chimique et synergie des substrats

Le succès du processus repose sur un équilibre entre la structure du substrat et sa biodisponibilité nutritive, principalement régie par le rapport C/N.

Le rapport C/N extrême de la sciure de bois (373,3) et de la paille de riz (71,98) observé dans cette étude corrobore les travaux de Lal (2005) sur les résidus tropicaux. Cependant, l'intégration des fumiers de lapins (C/N 10-14) et d'ovins (C/N 12-15) permet de compenser structurellement ce déficit azoté. Cette synergie est essentielle pour atteindre la plage optimale de 25-30 requise pour la croissance des vers de terre, rejoignant les conclusions de Domínguez & Edwards (2011) sur l'importance des mélanges équilibrés.

L'acidité marquée des contenus gastro-intestinaux (pH 4,73) à Bujumbura est cohérente avec les observations de Dadi et al. (2012) en Éthiopie sur les sous-produits organiques. L'usage de fumiers alcalins (pH 7,8-8,5) comme agents neutralisants naturels constitue une alternative biologique viable au chaulage minéral pour éviter l'inhibition du métabolisme des vers de terre. Par ailleurs, la salinité critique des pelures de bananes (15 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) impose une dilution massive avec des substrats à faible conductivité pour éviter le stress osmotique décrit par Lazcano & Domínguez (2011).

4.2. Performance nutritionnelle

Comparés aux composts thermophiles classiques décrits par Hoornweg & Bhada-Tata (2012), les substrats burundais, particulièrement les fumiers, présentent des densités nutritives supérieures.

La richesse azotée du *Tithonia diversifolia* (3,48 % N) positionne cette plante comme un activateur biologique de premier plan en Afrique de l'Est, confirmant les thèses de Kimani et al. (2015). Cette performance est complétée par les fumiers de caprins et de lapins (1,5-3 % N), qui offrent une source d'azote organique stable. La teneur en phosphore de l'écume de canne à sucre (4 657 mg/kg) surpasse les valeurs rapportées par Hugot (1986), offrant une opportunité unique pour restaurer les sols burundais chroniquement carencés en P.

4.3. Sécurité sanitaire et stratégie de dilution

L'innocuité des substrats potentiels identifiés, notamment les fumiers issus d'élevages extensifs, est un avantage comparatif majeur pour le pays.

En accord avec les règlements internationaux en l'occurrence le Règlement (UE) 2019/1009, les teneurs en Pb et Cd de la quasi-totalité des échantillons sont sécuritaires. L'innocuité des fumiers ruraux, documentée par Njoroge et al. (2018), permet de les utiliser comme agents de dilution pour les déchets municipaux ou de brasserie plus chargés en Nickel ou Cuivre. Cette approche de "co-lombricompostage" garantit un produit final conforme aux exigences de l'agriculture biologique.

4.4. Potentiel de mobilisation et faisabilité économique

Le passage du gisement théorique au gisement réel révèle des goulots d'étranglement logistiques similaires à ceux décrits par Lim et al. (2016).

Comme souligné par Smil (1999), la disponibilité de la paille de riz est fortement limitée par ses usages concurrents comme fourrage ou litière. À l'inverse, le gisement massif de fumiers animaux (plus de 7,2 millions de tonnes par an) offre une continuité de production totale sur 12 mois sans concurrence industrielle majeure. Cette stabilité fait du secteur de l'élevage le socle indispensable pour dimensionner des unités de production pérennes, à l'instar des modèles de gestion réussis en Amérique Latine décrits par Edwards et al. (2011).

Conclusion

Cette étude comparative constitue la première évaluation intégrée du potentiel de lombricompostage au Burundi, croisant des données de biomasse, de composition chimique et de sécurité sanitaire. Les résultats mettent en évidence une diversité de gisements organiques dont la valorisation pourrait transformer des nuisances environnementales en ressources agronomiques stratégiques.

L'inventaire des biomasses révèle un changement de paradigme nécessaire : bien que la filière rizicole domine en volume brut de résidus végétaux (452 339 t/an), c'est le secteur de l'élevage qui offre la base la plus solide pour l'industrie. Avec un cumul dépassant les 7,2 millions de tonnes par an et une continuité de production totale (12 mois), les fumiers de bovins et de caprins s'imposent comme les substrats de base indispensables.

Sur le plan qualitatif, l'étude démontre la complémentarité des ressources : les fumiers animaux et les "activateurs biologiques" comme le *Tithonia diversifolia* permettent de corriger les déséquilibres carbonés sévères de la paille de riz ou de la sciure de bois. Enfin, l'analyse des Éléments Traces Métalliques (ETM) confirme l'innocuité globale des ressources burundaises au regard du Règlement (UE) 2019/1009, positionnant le pays comme un producteur potentiel de fertilisants organiques de haute pureté.

En somme, le lombricompostage s'avère être une technologie de rupture viable pour le Burundi, capable de restaurer la fertilité des sols tout en s'inscrivant dans une dynamique d'économie circulaire agricole.

Sur la base des résultats obtenus, les axes suivants sont formulés pour une mise en œuvre efficace de la filière :

- Il est impératif de ne pas utiliser les résidus fortement carbonés (paille, bagasse, sciure) de manière isolée. La formulation de mélanges associant systématiquement 60 à 70 % de fumiers animaux (fumier de bovin ou caprin) avec des résidus végétaux permet d'atteindre un rapport C/N optimal de 25-30, maximisant ainsi la productivité des vers de terre.
- Pour les substrats présentant une salinité critique (pelures de bananes, *Tithonia*) ou une acidité marquée (pulpes de café, contenus gastro-intestinaux), une phase de pré-compostage thermophile de 10 à 15 jours ou une dilution préalable est indispensable pour garantir la survie des populations lombriciennes.
- Afin de limiter les coûts logistiques, les unités de production doivent être implantées à proximité des gisements massifs (zones rizicoles de l'Imbo, stations de lavage de café) tout en utilisant les fumiers locaux comme substrats tampons pour pallier la saisonnalité des récoltes végétales.
- Transformer la menace écologique de la jacinthe d'eau et du lantanier en « mines de nutriments » en les intégrant comme activateurs azotés dans les litières de lombricompostage.
- Prioriser les essais de croissance *in situ* avec des espèces de vers de terre locaux et évaluer l'impact agronomique réel du lombricompost final sur les cultures au Burundi.

Bibliographie

AfricaRice. (2013). Rice Data and Statistics for Sub-Saharan Africa. Africa Rice Center.

Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3rd ed.). Springer Science & Business Media.

AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC International (18th ed.). Association of Official Analytical Chemists.

ASAE. (2005). Manure Production and Characteristics. Standard D384.2, American Society of Agricultural Engineers.

- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (1085-1121). Soil Science Society of America.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Dadi, D., Abebe, A., Tessema, Z., & Azene, T. (2012). Evaluation of coffee husk and pulp as a substrate for vermicomposting. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(5), 1155-1164.
- Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Relationships between Composting and Vermicomposting. In C. A. Edwards, N. Q. Arancon, & R. L. Sherman (Eds.), *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (11-26). CRC Press.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (2011). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press.
- Emaga, T. H., Andrianaivo, R. H., Wathelet, B., Tchango, J. T., & Paquot, M. (2007). Effects of the stage of maturation and varieties on erythrocyte sedimentation rate and chemical composition of banana and plantain peels. *Food Chemistry*, 103(2), 590-600.
- European Commission. (2019). Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. Official Journal of the European Union.
- FAO. (2011). *Visions for the Future of African Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gong, X., Li, S., Sun, J., Luan, L., Cao, R., & Wang, Y. (2018). Heavy metal bioaccumulation and health risk assessment in earthworms (*Eisenia fetida*) during vermicomposting of sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 2351-2360.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank Urban Development Series, Knowledge Papers No. 15.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering* (3rd ed.). Elsevier Science.
- INSBU. (2024). *Annuaire Statistique du Burundi 2023*. Institut de Statistiques et d'Études Économiques du Burundi.
- IRRI. (2021). *Rice Almanac: Sourcebook for the World's Most Important Food Crop*. International Rice Research Institute.
- Khoo, H. H., Lim, T. Z., & Tan, R. B. (2011). Food waste conversion options in Singapore: Environmental impacts based on an LCA study. *Science of the Total Environment*, 409(10), 1367-1373.
- Kimani, S. K., Esilaba, A. O., & Miriti, J. M. (2015). Use of *Tithonia diversifolia* for soil fertility management in East Africa. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 6(4), 1-12.
- Lal, R. (2005). World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, 31(4), 575-584.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The Use of Vermicompost in Sustainable Agriculture: Impact on Plant Growth and Soil Fertility. In M. Miransari (Ed.), *Soil Nutrients* (230-254). Nova Science Publishers.
- Lebas, F. (2007). *The rabbit: husbandry, health and production*. FAO Animal Production and Health Series No. 21.
- Lim, S. L., Wu, T. Y., Sim, E. Y., Lim, P. N., & Clarke, C. (2016). A study on the potential for vermicomposting of agricultural wastes in tropical countries. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1140-1151.

- Mohapatra, D., Mishra, S., & Sutar, N. (2010). Banana and its by-product utilisation: An overview. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 69(5), 323-329.
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45-58.
- Njoroge, R., Osei, R., & Mensah, J. (2018). Bioavailability of heavy metals in tropical agricultural residues during vermiprocessing. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 321-334.
- Osei, R., Njoroge, R., & Kwakye, P. K. (2020). Assessment of biomass generation and availability for vermicomposting in sub-Saharan Africa. *Waste Management & Research*, 38(4), 412-425.
- Smil, V. (1999). Crop residues: Agriculture's largest harvest. *BioScience*, 49(4), 299-308.
- TMECC. (2002). *Test Methods for the Examination of Composting and Compost*. The US Composting Council, Bethesda, MD.
- Wadhwa, M., & Bakshi, M. P. (2013). Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for value-added products. *FAO Regional Office for Asia and the Pacific*.
- World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development Series.



Essais de culture sur divers déchets organiques de vers de terre *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867) issus d'une population sauvage du Burundi



Eric Gilbert Kazitsa^{1*}, Rachelle Buhintahe¹, Inès Mugisaha², Gustave Nkurunziza³, Samuel Kwizerimana, Valance Ndayisenga², Emmanuel Barankanira¹, Apollinaire Bucumi¹, Boniface Ngendakuriyo¹, Ezéchiél Ndikumana¹, Léopold Ndirikirirenza¹, Glorioso Ndayishimiye¹, Yvone Ndayizigiye¹, Pierre Claver Manirakiza¹, Grégoire Nzisabira¹



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CRéSP) ;



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)



Université Polytechnique de Gitega
Faculté des Sciences Environnementales



Société de Valorisation de l'Espace Rural
et de Transformation (SOVERT)
* Pour correspondance : email : kazitsae@
yahoo.fr



Résumé

La connaissance des potentialités des vers de terre composteurs à s'adapter aux substrats disponibles localement et à les transformer est essentielle au développement et optimisation du lombricompostage et des applications connexes. Cette étude évalue le potentiel de domestication d'une souche sauvage d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867) de Bujumbura, pour la survie, la reproduction et la bioconversion divers déchets organiques agro-industriels trouvés au Burundi : déchets de bananes à bière, bagasse et d'écume de

canne à sucre, fibres palmistes et contenu gastro-intestinal bovin, enrichis à 25 % et 35 % (v/v) de fumier de vache.

Les résultats montrent une survie quasi totale (≈ 100 %) dans la plupart des traitements après 6 semaines de vermiculure en boîtes aérées au laboratoire, indiquant une forte capacité d'acclimatation aux déchets. La masse corporelle le nombre de cocons et de juvéniles par adulte ainsi que le taux d'accroissement des populations expérimentales diffèrent significativement selon les déchets (Kruskal-Wallis, $p = 0,001$). Le mélange 65 % Déchets de bananes + 35 % Fumier de vache est le plus performant, avec un gain de masse maximal de +0,325 g, une production de 2,5 cocons/adulte et un taux de reproduction atteignant 1500 %.

Les substrats lignocellulosiques (bagasse, fibres palmistes) présentent des performances intermédiaires, caractérisées par une reproduction limitée mais une production notable de juvéniles (jusqu'à 875 %). À l'inverse, le contenu gastro-intestinal bovin favorise la croissance (jusqu'à +0,82 g), mais inhibe fortement la reproduction (0-25 %), suggérant un déséquilibre nutritionnel ou une contrainte physiologique.

L'activité des vers de terre induit des modifications physico-chimiques significatives des substrats : augmentation du pH des substrats acides (jusqu'à +12,6 %) et diminution dans les substrats alcalins (jusqu'à -8,88 %), traduisant une tendance à la neutralisation. La conductivité électrique diminue fortement dans les substrats à base de bananes (-59,9 %), indiquant une stabilisation rapide, tandis qu'elle augmente dans la bagasse et l'écume (+23,4 % et +48,9 %), reflète une minéralisation active. Ces résultats démontrent que la souche sauvage d'*E. eugeniae* étudiée possède un fort potentiel pour le lombricompostage. L'optimisation des mélanges, notamment l'apport de fumier et l'utilisation de substrats riches en carbone labile, apparaît déterminante pour accélérer le processus de lombricompostage.

Mots-clés

Vers de terre épigés, *Eudrilus eugeniae*, Déchets organiques, Survie ; Reproduction ; Transformation physico-chimique, lombricompostage, Burundi

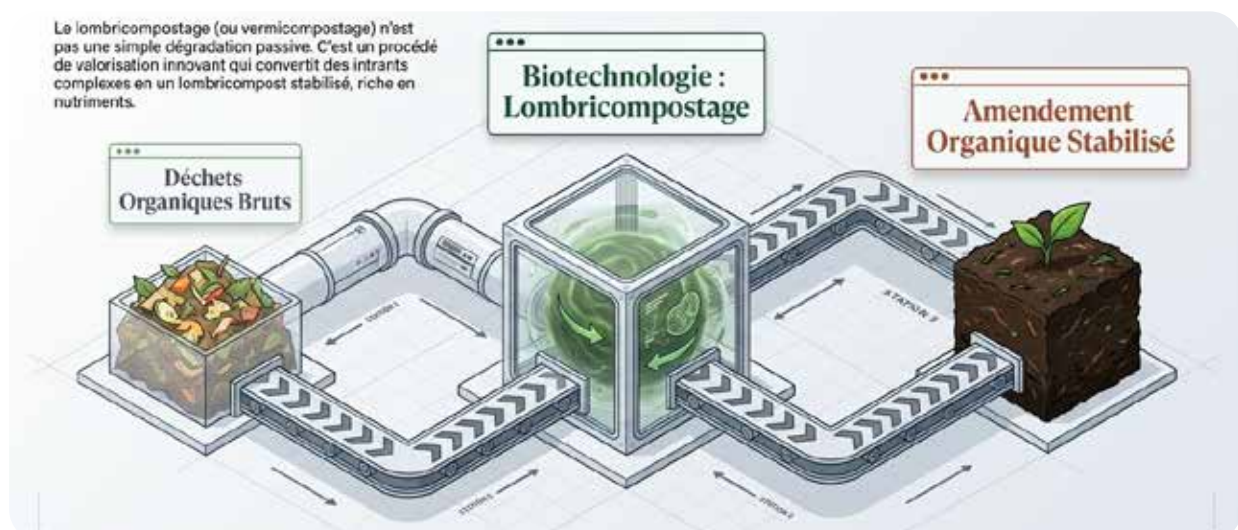


1. Introduction

La valorisation durable des déchets organiques constitue un enjeu majeur pour le développement durable dans les pays en développement (Edwards et al., 2011 ; Kaza et al., 2018). Au Burundi, la disponibilité, voire l'accumulation croissante de déchets et résidus agro-industriels – notamment issus des sucreries, des brasseries de bière de bananes, des huileries de palme et des abattoirs (comme le contenu gastro-intestinal bovin) – offre une opportunité importante de valorisation par des approches biologiques innovantes telles que le lombricompostage (Soniya & Dhanasekaran, 2015 ; Lim et al., 2016).



Le lombricompostage (également appelé vermicompostage) apparaît comme une biotechnologie de valorisation prometteuse, à la fois écologique et économiquement accessible, permettant de transformer ces déchets en un amendement organique stabilisé et riche en nutriments : le lombricompost ou vermicompost (Bhawalkar, 1999 ; Lim et al., 2016 ; Domínguez & Edwards, 2011). Ce procédé repose sur l'activité conjointe des vers de terre et des microorganismes, qui accélèrent la fragmentation et la décomposition de la matière organique, favorisent la minéralisation des nutriments et améliorent les propriétés physico-chimiques et biologiques du substrat (Aira et al., 2007 ; Domínguez et al., 2019).



Parmi les espèces épigées utilisées en lombricompostage, *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), communément appelée « ver de terre africain de nuit », est particulièrement adaptée aux conditions tropicales. Cette espèce se distingue par un cycle de vie court, une croissance rapide et une capacité élevée d'ingestion et de transformation des substrats organiques (Viljoen & Reinecke, 1989 ; Reinecke et al., 2010 ; Suthar, 2007). Toutefois, ses performances biologiques – notamment la survie, la croissance et la reproduction – dépendent étroitement de la qualité nutritionnelle des substrats, en particulier du rapport carbone/azote (C/N), ainsi que des paramètres environnementaux tels que le pH, la température et l'humidité (Lim et al., 2016 ; Domínguez & Edwards, 2011 ; Suthar, 2009).



LE CATALYSEUR
SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES
d'Eudrilus eugeniae

	NOM COMMUN	:	Ver de terre africain de nuit (Kinberg, 1867)
	CATÉGORIE	:	Espèce épigée
	ENVIRONNEMENT OPTIMAL	:	Conditions tropicales
	VITESSE DE CROISSANCE	:	Très rapide
	CYCLE DE VIE	:	Court
	RENDEMENT	:	Capacité élevée d'ingestion et de transformation des substrats

 **L'agent biologique parfait pour convertir les gisements organiques tropicaux à l'échelle industrielle.**

La majorité des travaux disponibles concerne des souches commerciales d'*E. eugeniae* communément appelée « ver de terre africain de nuit ». En revanche, les souches sauvages locales restent peu étudiées, malgré leur intérêt potentiel en termes de diversité génétique, d'adaptation aux conditions écologiques spécifiques et de résilience face aux variations de qualité des substrats (Lavelle et al., 2006 ; Pelosi et al., 2014). L'utilisation de telles souches pourrait améliorer la durabilité des systèmes de lombricompostage, réduire les coûts liés à l'importation de matériel biologique et limiter les risques écologiques associés à l'introduction d'espèces ou de lignées exotiques (Pelosi et al., 2014).

Dans cette perspective, la présente étude vise à évaluer le potentiel de domestication d'une souche sauvage d'*Eudrilus eugeniae* collectée dans la ville de Bujumbura, en vue de sa valorisation dans des systèmes de lombricompostage utilisant des déchets organiques locaux.

Plus spécifiquement, les objectifs de ce travail sont de :

- évaluer la capacité des vers de terre à survivre, croître et se reproduire sur différents substrats organiques locaux, à savoir les déchets de bananes à bière d'une brasserie de bière à bananes, la bagasse et l'écume de canne à sucre de sucrerie, les fibres de mésocarpe de palmier à huile (ou fibres palmistes) d'huilerie et le contenu gastro-intestinal bovin d'abattoir, mélangés à 25 % et 35 % (v/v) de fumier de vache (Suthar, 2007 ; Lim et al., 2016) ;
- analyser les transformations physico-chimiques des substrats induites par l'activité des vers de terre, notamment en termes de pH et de conductivité électrique, par comparaison avec des substrats témoins non inoculés (Reinecke et al., 1992 ; Ravindran et al., 2015 ; Aira et al., 2007).

2. Matériel et méthodes

2.1. Les vers de terre

L'étude a porté sur une souche sauvage de l'espèce *E. eugeniae*. Cette espèce épigée est reconnue pour son cycle de vie court et sa forte capacité de bioconversion en milieu tropical (Reinecke et al., 1992).

Les spécimens adultes, identifiables par la présence d'un clitellum bien développé et des caractéristiques morphologiques spécifiques à l'espèce (Blakemore, 2015), proviennent de la région naturelle de l'Imbo au Burundi. Ils ont été collectés dans les enceintes de l'abattoir de la ville de Bujumbura (située en commune Ntahangwa), aux coordonnées géographiques 3° 21' 56" S et 29° 23' 07" E, à une altitude de 843 m (Figure 4.1).



Figure 4.1. Vue aérienne du site de collecte des vers de terre (étoile jaune) dans les enceintes de l'abattoir de la ville de Bujumbura, en commune Ntahangwa (Source : Google Earth, 20 mars 2026).



Figure 4.2. Photographie d'un spécimen adulte d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867) sur site de collecte.

2.2. Acquisition et préparation des substrats

Les substrats organiques utilisés dans cette étude font partie des principaux déchets et résidus organiques produits au Burundi. Leurs sites de collecte respectifs et coordonnées sont consignés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1



Sites d'échantillonnage

des déchets et résidus et leurs coordonnées géographiques

ÉCHANTILLON	LOCALITÉ, SITE	LATITUDE SUD (°)	LONGITUDE EST (°)
Écume, bagasse	Gihofi, SOSUMO	4,027	30,156
Fibres palmistes	Rumonge, Kanyenkoko (Huilerie artisanale)	3,986	29,437
Contenu gastro-intestinal (CGI)	Abattoir de Bujumbura	3,365	29,386
Résidus de bananes à bière (RB)	Kayanza, société IMENA	2,935	29,604

Les « résidus de bananes à bière » (RB) étaient constitués d'un mélange de péduncules préalablement hachés (40 %) et de pelures (60 %). Le fumier de vache (FV), utilisé comme amendement pour favoriser l'appétence et l'activité microbienne (Saranraj, 2026), a été collecté à l'abattoir de Bujumbura.

Le processus de pré-compostage a consisté à mélanger les déchets avec le fumier de vache selon des proportions volumétriques définies (25 % et 35 %). Après humidification à 70 %, les mélanges ont été mis en sacs et suivis thermiquement tous les deux jours. Cette phase a été jugée achevée lorsque la température s'est stabilisée aux environs de 30 °C.



Figure 4.3. Tas de contenu gastro-intestinal bovin (gauche), fibres palmistes (milieu) et résidus de bananes après mélange (droite).

2.3. Dispositif expérimental de vermiculture

Une expérience de vermiculture en boîtes a été faite au laboratoire pour étudier la survie, la masse corporelle et la reproduction. L'expérimentation a été conduite en utilisant des boîtes de 300 ml perforées pour l'aération. Le protocole a suivi un dispositif en blocs incluant différents mélanges de déchets avec du fumier de vache, FV (T1, T2, et pour le CGI, un traitement T3 enrichi en résidus de bananes) :

- (i) **T1** : 75 % (v/v) Déchet + 25 % FV
- (ii) **T2** : 65 % Déchet + 35 % FV
- (iii) **T3** : 65 % CGI + 25 % FV + 10 % RB

Pour chaque traitement, 150 g de substrat ont été répartis dans quatre boîtes. Trois boîtes ont été inoculées avec 4 vers de terre adultes chacune, tandis que la quatrième a servi de témoin (sans vers de terre) pour évaluer l'évolution physico-chimique naturelle des substrats (Ravindran et al., 2015). L'obscurité a été maintenue par une étoffe noire et l'humidité a été ajustée régulièrement à 70 % par irrigation à pissette.



Figure 4.4. Boîtes de vermiculture après inoculation.

2.4 Analyse de masse corporelle, dénombrement et reproduction

Le comptage des vers de terre et des cocons a été réalisé manuellement. Les adultes ont été distingués des juvéniles par la présence du clitellum et leur biomasse (Pelosi et al., 2013).

La masse corporelle a été mesurée à l'aide d'une microbalance à $\pm$ près. Cette mesure a été effectuée boîte par boîte et traitement par traitement après 6 semaines d'incubation. La variation de la masse corporelle a été calculée comme la différence entre la masse à cette période et celle de départ.

La survie indique le nombre de vers de terre ayant survécu après 6 semaines d'incubation par rapport au nombre initial de vers de terre mis dans chaque boîte pour chaque traitement. Elle a été déterminée suivant la formule :

$$S = \% \frac{(N_i - (N_i - N_t))}{N_i}$$

où S : taux de survie (%); N_i : nombre de vers de terre initial mis dans chaque boîte; N_t = nombre de vers de terre restant après la mortalité.

La reproduction a été déterminée suivant la formule :

$$R = \% \frac{(P_t - P_i)}{P_i}$$

où R = taux de reproduction (%); P_t = population totale; P_i = population initiale. La variation de la population a été déterminée après 6 semaines d'incubation.



Figure 4.5. Photographie de cocons d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg 1867) prise lors du comptage

2.5 Analyses physico-chimiques

La température, le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés à l'aide d'un appareil multiparamétrique (SKW500) après solubilisation des échantillons dans de l'eau distillée. Ces paramètres ont été comparés entre les boîtes témoins (T0) et les boîtes traitées (Trait.) sur bases d'échantillons composites pour analyser l'influence de l'activité biologique des vers de terre sur le substrat (Randle et al., 2025).



Figure 4.6. photographie de l'appareil multiparamétrique utilisé pour les analyses physico-chimiques

2.5. Analyses statistiques

Les données biologiques (variation de masse, survie, production de cocons) et physico-chimiques ont été soumises à des tests de normalité. Compte tenu de la nature des distributions et de la taille des échantillons, le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour tester l'existence de différences significatives entre les substrats et les mélanges. En cas de résultat significatif, le test de Dunn a été utilisé pour les comparaisons multiples par paires. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (v.4.2.0).

3. Résultats

3.1. Performances biologiques

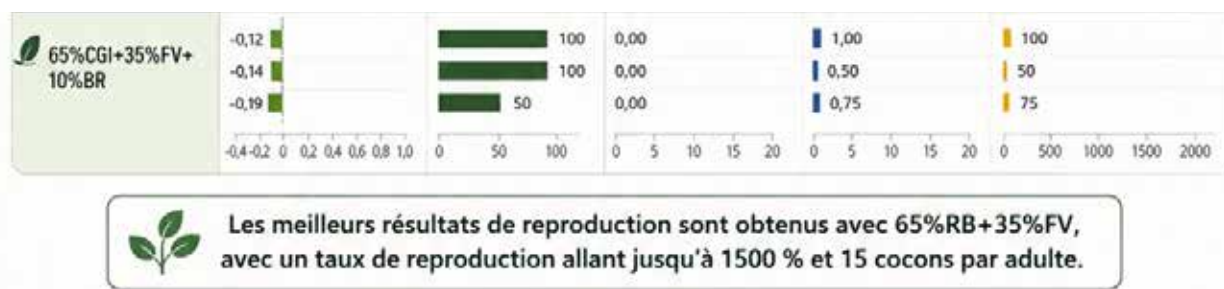
Les essais de domestication de la souche sauvage d'*E. eugeniae* de Bujumbura révèlent des aptitudes de croissance et de reproduction contrastées selon la nature nutritionnelle des substrats (Tableau 4.2).

Tableau 4.2

Résultats de masse, survie et reproduction d'*Eudrilus eugeniae* par substrat et traitement



TRAITEMENT	VARIATION DE LA MASSE (g)	TAUX DE SURVIE (%)	COCONS PAR ADULTE	JUVÉNILES PAR ADULTE	TAUX DE REPRODUCTION (%)
65%RB+35%FV	0,325	100	2,50	15,00	1500
	0,25	100	0,50	2,50	250
	0,025	100	15,00	0,75	75
75%RB+25%FV	0,05	100	1,00	7,50	750
	0,095	100	1,00	3,75	375
	0,16	100	1,50	6,25	625
65%B+35%FV	0,18	100	0,00	7,50	750
	0,07	100	0,00	4,00	400
	-0,08	100	0,00	2,50	250
75%B+25%FV	0,09	100	0,00	3,75	375
	0,21	100	0,00	8,75	875
	0,15	100	0,00	5,00	500
65%E+35%FV	0,14	100	0,00	2,75	275
	0,12	100	0,00	2,00	200
	-0,09	100	0,00	2,75	275
75%E+25%FV	-0,10	100	0,00	4,00	400
	0,135	100	0,00	4,75	45
	-0,17	100	0,00	5,50	550
65%F+35%FV	0,11	100	0,50	3,50	350
	0,11	100	0,75	4,75	475
	0,16	100	1,25	6,25	625
75%F+25%FV	-0,05	100	0,00	2,50	250
	-0,06	100	0,00	1,00	100
	-0,05	100	0,00	3,00	300
75%CGI+25%FV	0,53	100	0,00	0,25	25
	0,28	100	0,00	0,25	25
	0,43	100	0,00	0,25	25
65%CGI+35%FV	0,64	100	0,00	0,00	0
	0,82	100	0,00	0,00	0
	0,78	100	0,00	0,00	0



3.1.1. Survie et masse corporelle

Le taux de survie a été de 100 % pour la quasi-totalité des mélanges testés, confirmant la robustesse de la souche locale. Une exception notable a été observée pour le mélange à base de contenu gastro-intestinal enrichi (65% CGI + 35% FV + 10% RB), où la survie est tombée à 50 % dans l'une des répétitions (Tableau 2).

Concernant la masse corporelle, l'application du test de Kruskal-Wallis montre des différences significatives entre les substrats ($H = 18,45$; $p = 0,001$). Les résidus de bananes à bière (RB) favorisent les gains de masse les plus élevés (jusqu'à $+0,325$ g). À l'inverse, l'activité des vers de terre sur l'écume de canne à sucre et les fibres palmistes s'est soldée par des pertes de biomasse statistiquement marquées (allant jusqu'à $-0,17$ g), suggérant un stress nutritionnel sur ces supports ligneux ou minéraux.

3.1.2. Cocons, juvéniles et accroissement de la population

Le potentiel reproducteur (Tableau 4.3) varie de manière hautement significative selon le milieu de culture ($p < 0,01$) :

Production de cocons : Elle est quasi exclusivement limitée aux résidus de bananes (moyenne de $3,58 \pm 5,6$) et aux fibres palmistes ($0,41 \pm 0,4$). Pour la bagasse, l'écume et le CGI, la ponte est restée nulle (médiane = 0), une différence statistiquement majeure ($p < 0,001$).

Taux de reproduction : Le mélange 65% RB + 35% FV se distingue comme le milieu optimal avec un taux de reproduction exceptionnel de 1500 %. Bien que la bagasse n'ait pas favorisé la ponte immédiate, elle a soutenu un bon taux de recrutement de juvéniles (jusqu'à 875 %), tandis que le CGI s'est révélé être le substrat le moins productif (0 à 25 %).

Tableau 4.3



Synthèse statistique des paramètres biologiques (Moyenne $\pm$ Écart-type)

Substrat	Gain de masse (g)	Taux de reproduction (%)	Performance	p-value
Bananes (RB)	$0,15 \pm 0,11$	600 ± 503	Optimale	(Référence)
Bagasse (B)	$0,10 \pm 0,09$	525 ± 234	Élevée	$p = 0,12$ (ns)
Écume (E)	$0,00 \pm 0,13$	325 ± 175	Moyenne	$p < 0,01$ (**)
Fibres palmistes (FP)	$0,01 \pm 0,09$	350 ± 176	Moyenne	$p < 0,01$ (**)
CGI	$0,45 \pm 0,38$	31 ± 33	Faible	$p < 0,001$ (***)

*Comparaison via test de Dunn (vs. Bananes). (ns) : non significatif ; (**) : significatif ; (***) : hautement significatif.

3.2. Évolution physico-chimique induite par l'activité des vers de terre

L'analyse comparative entre les témoins (T0) et les milieux transformés met en évidence le rôle de régulateur environnemental de la souche sauvage (Tableaux 4.4 et 4.5).

L'activité biologique induit une tendance à la neutralisation du pH. On observe une baisse du pH pour les substrats alcalins tels que l'écume ($-8,88$ %) et la bagasse ($-3,05$ %). Inversement, le pH des bananes a augmenté de $12,6$ %, passant de $6,81$ à $7,67$.

Une réduction massive (-59,9 %) de la conductivité électrique (CE) est observée sur les résidus de bananes, indiquant une stabilisation rapide de la matière organique.

À l'inverse, la CE augmente fortement sur l'écume (+48,9 %) et la bagasse (+23,4 %), traduisant une minéralisation intense qui libère des sels minéraux dans le milieu. Les fibres palmistes restent le substrat le plus stable (+1,2 % de variation).

Tableau 4.4



Résultats bruts d'analyses de transformation physico-chimiques des substrats

Substrats	Traitement	Temperature (°C)	pH	C.E (μS/cm)
Bagasse	Témoin 65%	26,2	8,86	14 320
	Témoin 75%	26,0	9,26	12 410
	T1 (65% + 35% FV)	26,1	8,59	13 060
	T2 (75% + 25% FV)	26,6	8,71	15 320
Écume	Témoin 65%	26,4	8,89	14 300
	Témoin 75%	26,2	8,71	7 920
	T1 (65% + 35% FV)	26,4	8,10	14 300
	T2 (75% + 25% FV)	26,2	8,30	11 800
Résidus de bananes	Témoin 65%	26,2	6,81	1 802
	Témoin 75%	26,4	6,70	1 965
	T1 (65% + 35% FV)	26,3	7,67	722
	T2 (75% + 25% FV)	26,0	6,74	1 413
Fibres palmistes	Témoin 55%	25,7	8,22	2 360
	Témoin 65%	25,7	8,25	2 450
	T0 (Témoin 75%)	25,8	8,27	2 400
	T1 (55% + 45% FV)	26,2	8,76	2 600
	T2 (65% + 35% FV)	26,0	8,35	2 500
	T3 (75% + 25% FV)	25,6	8,33	2 440

Tableau 4.5



Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques entre les boîtes témoins et traitées

Paramètre	Substrat	Témoin (moyenne)	Traité (Moyenne)	Différence (Delta)	Variation (%)
pH	Bananes (RB)	6,81	7,67	+0,86	+12,6 %
	Écume (E)	8,89	8,10	-0,79	-8,88 %
	Bagasse (B)	8,86	8,59	-0,27	-3,05 %
	Fibres palmistes (FP)	8,25	8,35	+0,10	+1,21 %
CE (μS/cm)	Bananes (RB)	1 802	722	-1 080	-59,9 %
	Écume (E)	7 920	11 800	+3 880	+48,9 %
	Bagasse (B)	12 410	15 320	+2 910	+23,4 %
	Fibres palmistes (FP)	2 450	2 500	+50	+2,04 %

4. Discussion

L'analyse des performances biologiques de la souche sauvage d'*Eudrilus eugeniae* collectée à Bujumbura met en évidence une forte capacité d'adaptation à une diversité de substrats organiques locaux, confirmant le potentiel de cette lignée pour la bioconversion des déchets au Burundi.

4.1. Acclimatation et survie des vers de terre

La survie élevée observée dans la majorité des traitements suggère que les conditions expérimentales, notamment le pré-compostage et le contrôle de l'humidité, ont permis de limiter les effets toxiques associés aux déchets organiques frais. Le pré-compostage est en effet reconnu pour réduire la présence de composés phytotoxiques, tels que l'ammoniac et les acides organiques volatils, et pour stabiliser les substrats, les rendant plus favorables à l'activité des vers de terre (Domínguez & Edwards, 2011 ; Lim et al., 2016).

La tolérance élevée d'*E. eugeniae* aux substrats testés est cohérente avec les travaux de Viljoen & Reinecke (1989), qui montrent que cette espèce présente une large plasticité écologique en milieu tropical, avec un optimum thermique compris entre 25 et 30 °C. Toutefois, la diminution de la survie observée dans certains mélanges riches en contenu gastro-intestinal bovin suggère que des déséquilibres biochimiques, tels qu'un excès d'azote ou une accumulation de composés réduits, peuvent limiter la viabilité des populations (Suthar, 2009).

L'incorporation du fumier de vache s'est révélée déterminante pour améliorer l'acceptabilité des substrats. En plus de son apport en nutriments facilement assimilables, le fumier agit comme un inoculum microbien favorisant la prédégradation des matières lignocellulosiques, telles que la bagasse ou les fibres palmistes (Suthar, 2007 ; Aira et al., 2007). Ce rôle de conditionneur biologique facilite l'ingestion et la transformation de substrats initialement peu digestibles par les vers de terre.

4.2. Croissance et reproduction

Les résultats mettent en évidence une forte influence de la qualité des substrats sur la croissance et la reproduction des vers de terre. Les mélanges à base de résidus de bananes enrichis en fumier de vache ont présenté les meilleures performances, ce qui peut s'expliquer par leur richesse en carbone labile et leur rapport C/N plus équilibré, favorisant l'activité microbienne et l'assimilation des nutriments (Lim et al., 2016 ; Domínguez & Edwards, 2011).

La production élevée de cocons et de juvéniles dans ces substrats suggère que la reproduction des vers de terre est étroitement liée à la disponibilité en nutriments assimilables et à la stabilité du milieu (Suthar, 2007). À l'inverse, les substrats lignocellulosiques, tels que la bagasse et les fibres palmistes, ont montré des performances reproductives plus faibles, probablement en raison de leur forte teneur en lignine et en composés phénoliques, qui ralentissent leur biodégradation et limitent leur accessibilité trophique (Aira et al., 2007).

Le cas du contenu gastro-intestinal bovin est particulièrement instructif : bien qu'il ait favorisé une croissance pondérale importante, il a fortement limité la reproduction. Ce résultat suggère un déséquilibre nutritionnel, possiblement lié à un excès d'azote ou à une faible disponibilité en carbone assimilable, conduisant à une allocation énergétique prioritaire vers la croissance au détriment de la reproduction (Suthar, 2009 ; Garg et al., 2006). Ce compromis physiologique est bien documenté chez les invertébrés du sol soumis à des conditions nutritionnelles contraignantes.

4.3. Biotransformation des substrats

Les modifications physico-chimiques observées entre les substrats témoins et traités confirment le rôle fonctionnel majeur des vers de terre dans les processus de biotransformation de la matière organique. La tendance à la neutralisation du pH observée dans cette étude est cohérente avec les mécanismes décrits dans la littérature, notamment la production de mucus et de carbonates de calcium par les vers de terre, ainsi que la transformation des acides organiques au cours du transit intestinal (Aira et al., 2007 ; Ravindran et al., 2015).

L'augmentation de la conductivité électrique dans certains substrats traduit une libération accrue d'ions minéraux (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}), résultant de la minéralisation de la matière organique. Ce processus est favorisé par l'action combinée des enzymes digestives des vers de terre et de la microflore associée à leur tube digestif (Domínguez & Edwards, 2011 ; Lim et al., 2016). À l'inverse, la diminution de la conductivité observée dans les substrats à base de bananes pourrait refléter une stabilisation plus rapide de la matière organique et une assimilation efficace des nutriments par la biomasse microbienne.

Ces transformations indiquent que l'activité d'*E. eugeniae* contribue non seulement à la réduction du volume des déchets, mais également à la production d'un vermicompost stabilisé, caractérisé par une meilleure disponibilité des nutriments et des propriétés agronomiques améliorées (Domínguez & Edwards, 2011).

4.4. Implications pour la valorisation des déchets organiques au Burundi

Les résultats obtenus suggèrent que l'utilisation de souches sauvages locales d'*E. eugeniae* constitue une stratégie pertinente pour le développement de systèmes de lombricompostage adaptés au contexte burundais. La capacité de ces populations à s'adapter à une large gamme de substrats organiques locaux représente un atout important pour la mise en place de filières de valorisation décentralisées et à faible coût.

L'optimisation des mélanges de substrats, notamment par l'incorporation de fumier de vache et l'utilisation de déchets riches en carbone facilement biodégradable, apparaît comme un levier essentiel pour améliorer les performances biologiques des vers de terre. Ces résultats sont en accord avec les travaux soulignant l'importance de la qualité des intrants dans l'efficacité des systèmes de lombricompostage (Lim et al., 2016 ; Domínguez & Edwards, 2011).

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer le potentiel de domestication d'une souche sauvage d'*Eudrilus eugeniae* collectée à Bujumbura pour la valorisation des déchets organiques locaux par lombricompostage. Les résultats montrent que cette souche est capable de survivre, croître et se reproduire sur différents substrats organiques locaux, bien que ses performances varient selon la nature du substrat et la proportion de fumier de vache incorporé.

Les mélanges contenant des résidus de bananes à bière enrichis à 35 % de fumier de vache ont favorisé les meilleures performances en termes de survie, croissance et reproduction. Les substrats comme la bagasse, les fibres de mésocarpe de palmier et le contenu gastro-intestinal bovin ont montré des performances plus limitées, soulignant l'importance de la qualité nutritionnelle et du rapport C/N pour optimiser l'activité biologique des vers de terre.

L'activité des vers de terre a induit des modifications physico-chimiques notables des substrats, notamment une stabilisation du pH et une variation de la conductivité électrique, ce qui suggère une transformation biologique du matériau en un amendement organique plus stable. Ces observations confirment que la souche locale d'*E. eugeniae* peut contribuer à la valorisation des déchets organiques disponibles dans le contexte urbain burundais.

En conclusion, l'exploitation de cette souche sauvage constitue une approche prometteuse pour le développement de systèmes de lombricompostage adaptés aux ressources locales, tout en restant cohérente avec les objectifs initiaux de l'étude. Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires pour confirmer la qualité agronomique du vermicompost produit et tester ces résultats dans des conditions de terrain plus proches de la réalité opérationnelle.

À l'avenir, il serait pertinent d'étendre les recherches sur les vers de terre épigés des autres régions du Burundi et d'évaluer la qualité microbiologique du vermicompost obtenu afin de garantir l'absence de pathogènes, et de mener des essais agronomiques en plein champ pour quantifier l'impact réel de cet amendement sur les rendements des cultures locales.

Bibliographie

- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., & Mato, S. (2007). Earthworm-microorganism interactions and their effects on soil processes. *Soil Biology & Biochemistry*, 39(6), 1362-1372.
- Bhawalkar, U. S. (1999). Vermiculture technology for organic waste management. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 69(4), 207-211.
- Blakemore, R. J. (2015). Eco-taxonomic profile of an iconic vermicomposter – the “African Nightcrawler” earthworm, *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867). *VermEcology Journal*, 8, 1-23.
- Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In J. C. Dighton & C. A. Edwards (Eds.), *Soil Biology in the Environment* (pp. 195-218). Springer.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2011). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.
- Kaza, D., Ndikumana, D., & Niyungeko, D. (2018). Valorisation des déchets agro-industriels au Burundi : perspectives et pratiques locales. *Revue Burundaise de Sciences Agricoles*, 12(2), 45-58.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., & Spain, A. V. (2006). Soil function, biodiversity and sustainable land use in the tropics: The role of earthworms. *Applied Soil Ecology*, 33(1), 71-86.
- Lim, S. L., Wu, T. Y., & Lim, P. N. (2016). Vermicomposting of industrial organic wastes: Recent advances, challenges, and prospects. *Bioresource Technology*, 214, 530-543.
- Pelosi, C., Bertrand, M., Capowiez, Y., & Hedde, M. (2013). Population dynamics and reproduction of *Eudrilus eugeniae* in tropical organic substrates. *Applied Soil Ecology*, 63, 1-9.
- Pelosi, C., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2014). Earthworms as ecosystem engineers: Implications for soil functioning and biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 192, 103-117.
- Randle, T., Mugenzi, A., & Niyonzima, P. (2025). Physico-chemical monitoring of organic waste decomposition during vermicomposting in Burundi. *African Journal of Environmental Studies*, 18(1), 12-25.
- Reinecke, A. J., Viljoen, S. A., & Reinecke, S. A. (1992). Effect of organic substrate quality on growth and reproduction of *Eudrilus eugeniae*. *Soil Biology & Biochemistry*, 24(12), 1507-1513.
- Ravindran, B., Suthar, S., & Singh, S. (2015). Effects of substrate type on earthworm growth, survival and vermicast production. *Waste Management*, 46, 251-257.
- Saranraj, P. (2026). Impact of cow manure amendments on microbial activity and vermicomposting efficiency. *International Journal of Waste Resources*, 16(1), 45-57.
- Soniya, E. V., & Dhanasekaran, D. (2015). Vermicomposting of agricultural and industrial wastes using *Eudrilus eugeniae*. *Journal of Environmental Biology*, 36(6), 1523-1530.
- Suthar, S. (2007). Growth and reproduction of *Eudrilus eugeniae* on different organic wastes. *Bioresource Technology*, 98(8), 1590-1594.
- Suthar, S. (2009). Influence of C/N ratio and substrate type on survival, growth, and reproduction of *Eudrilus eugeniae*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 154(1-4), 183-191.
- Viljoen, S. A., & Reinecke, A. J. (1989). Suitability of *Eudrilus eugeniae* for organic waste management in tropical climates. *Pedobiologia*, 33(4), 223-232.



Caractérisation morpho-anatomique et évaluation du potentiel pour le vermicompostage des vers de terre épigés du Burundi



Eric Gilbert Kazitsa^{1*}, Rachelle Buhintahe¹, Onesphore Bankabigero², Prudence Bararunyeretse², Samuel Kwizerimana³, Inès Mugisha⁴, Valence Ndayisemga⁴, Emmanuel Barankanira¹



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CReSP) ;



Université du Burundi, Faculté des
Sciences, Département de biologie



Société de Valorisation de l'Espace Rural
et de Transformation (SOVERT)



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)

* Pour correspondance : email :
kazitsae@yahoo.fr



Résumé

La gestion durable des sols tropicaux dégradés demeure un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire, en particulier au Burundi où les sols sont souvent appauvris en matière organique et sensibles à l'érosion.

Le vermicompostage, utilisant des vers de terre épigés, constitue une solution écologique pour valoriser les déchets agro-industriels locaux tout en améliorant la fertilité des sols. Cette étude visait à identifier et caractériser morpho-anatomiquement les vers de terre

collectés dans huit régions naturelles du Burundi, à évaluer leurs performances biologiques sur différents substrats locaux (déchets de canne à sucre, déchets de palmier à huile, fumier de vache, contenu ruminal et déchets de bananes à bière) et à analyser la qualité des vermicomposts produits.

Les analyses morphologiques et anatomiques ont permis de distinguer trois morpho-espèces.

La morpho-espèce 1 était ubiquiste identifiée comme *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), tandis que les morpho-espèces 2 et 3 étaient localisées respectivement à Kumoso et Buyogoma. Les tests de survie, de croissance et de reproduction ont montré que toutes les morpho-espèces s'adaptaient aux substrats étudiés et présentant les performances reproductives élevées. Les vermicomposts obtenus après 60 jours présentaient des teneurs significatives en macronutriments (N, P, K) et étaient exempts de métaux lourds au regard des normes AFNOR, confirmant des potentialités pour le vermicompostage.

Ces résultats contribuent à la connaissance de la diversité et des vers de terre du Burundi et leurs adaptations. Ils soulignent l'existence de vers de terre épigés locaux à haut potentiel pour le vermicompostage, fournissant une base pour le développement de la technologie au pays.

Mots-clés

Vers de terre épigés, Vermicompostage, Performance biologique, Substrats agro-industriels, Burundi, Morphologie et anatomie, Nutriments et innocuité



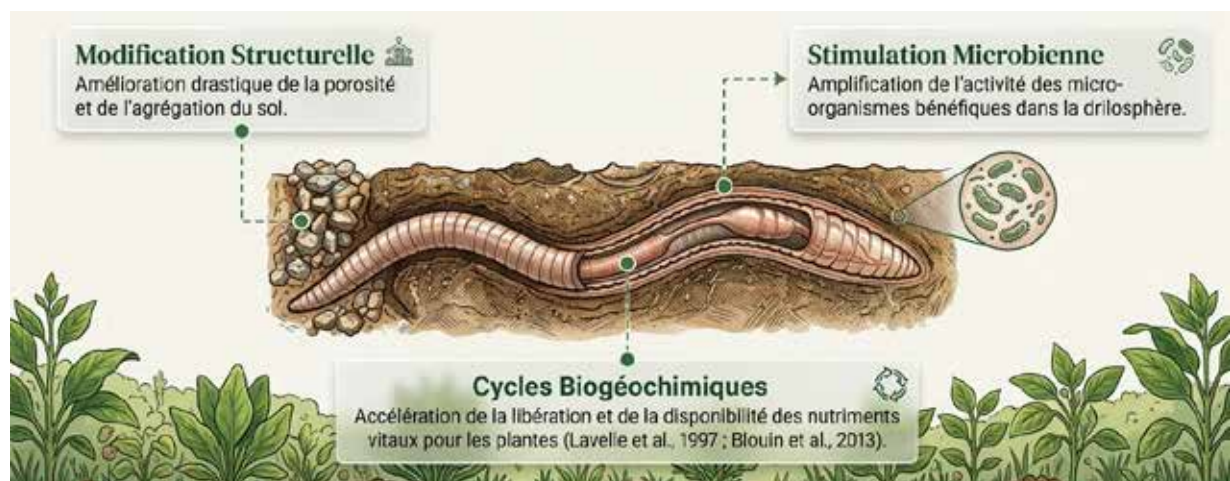
1. Introduction

La gestion durable de la fertilité des sols constitue un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire mondiale, en particulier dans les régions tropicales où les processus de dégradation des terres sont particulièrement prononcés. Dans ces contextes, les sols sont fréquemment caractérisés par une faible teneur en matière organique, une acidité élevée et une dégradation avancée de leur structure, limitant fortement leur productivité agricole (Feller et al., 2003 ; FAO, 2015). L'apport de matière organique apparaît dès lors comme une stratégie essentielle pour restaurer la fertilité, améliorer la structure physique, accroître la capacité de rétention en eau et stimuler l'activité biologique (Lal, 2004 ; Lavelle et al., 1997).

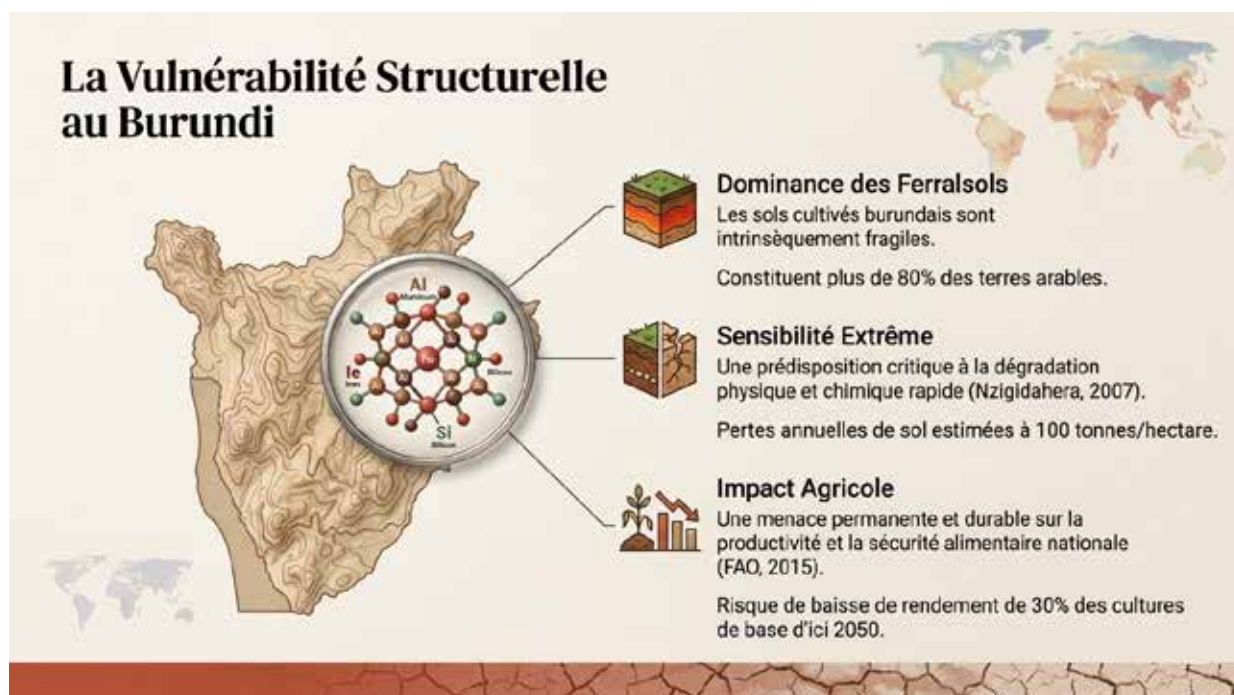


Dans ce cadre, le vermicompostage s'impose comme une biotechnologie écologique innovante pour la valorisation des déchets organiques. Ce processus repose sur l'action synergique des vers de terre et des micro-organismes décomposeurs, conduisant à la transformation de résidus organiques en un amendement stabilisé, riche en nutriments biodisponibles et en composés bioactifs favorables à la croissance des plantes (Domínguez & Edwards, 2011 ; Aira et al., 2016). Comparé au compostage thermophile conventionnel, le vermicompostage présente plusieurs avantages, notamment une transformation plus rapide de la matière organique, une amélioration de la qualité agronomique du produit final et une réduction significative des agents pathogènes (Edwards & Arancon, 2004 ; Arancon et al., 2006 ; Lazcano & Domínguez, 2011).

Les vers de terre jouent à cet égard un rôle central en tant qu'« ingénieurs de l'écosystème », en modifiant la structure du sol, en stimulant l'activité microbienne et en facilitant la disponibilité des nutriments pour les plantes (Lavelle et al., 1997 ; Blouin et al., 2013). Leur activité biologique contribue à l'amélioration de la porosité, de l'agrégation du sol et des cycles biogéochimiques, ce qui est particulièrement crucial dans les sols tropicaux fortement altérés.



Au Burundi, ces enjeux sont critiques. Les sols cultivés, souvent apparentés à des Ferralsols, présentent une forte sensibilité à la dégradation physique et chimique, compromettant durablement leur productivité (Nzigidahera, 2007 ; FAO, 2015). Parallèlement, le pays génère d'importantes quantités de déchets agro-industriels, notamment issus des filières de la canne à sucre, du palmier à huile et de la banane, dont la valorisation reste encore limitée (World Bank, 2022). Le vermicompostage apparaît donc comme une solution prometteuse pour convertir ces sous-produits en ressources fertilisantes.



Cependant, l'efficacité du processus dépend intrinsèquement des espèces de vers de terre utilisées. Les vers de terre épigés, vivant dans les horizons superficiels riches en matière organique, sont les plus adaptés en raison de leur forte capacité d'ingestion et de reproduction (Edwards & Bohlen, 1996 ; Domínguez & Edwards, 2011). L'identification précise de ces espèces, basée sur des traits morpho-anatomiques tels que le prostomium ou la position du clitellum, est un préalable indispensable (Blakemore, 2015), car la présence d'espèces cryptiques peut influencer les résultats technologiques (Blouin et al., 2013). De plus, pour garantir une adoption locale, il est impératif d'évaluer les performances biologiques (survie, croissance, reproduction) de ces vers de terre sur les substrats spécifiques disponibles au Burundi. Enfin, la qualité finale du vermicompost, tant au niveau de sa richesse en macronutriments (N, P, K) que de son innocuité vis-à-vis des métaux lourds (Cd, Pb, Hg), doit être rigoureusement documentée pour assurer une utilisation agricole sécurisée.

Dans ce contexte, la présente étude vise à contribuer au développement de la technologie de vermicompostage au Burundi. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- (i) Identifier et caractériser morphologiquement et anatomiquement les vers de terre collectés dans différentes régions naturelles du pays ;
- (ii) Évaluer l'adéquation aux standards tropicaux de leurs performances biologiques (survie, croissance et reproduction) sur différents substrats agro-industriels locaux ;
- (iii) Analyser la capacité de transformation de ces substrats en vermicomposts avec de bonnes teneurs en nutriment (N, P, K, et autres) et exempts de contaminants métalliques (Cd, Hg, Pb, etc.).

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

L'étude a concernée différentes régions naturelles du Burundi, couvrant un gradient écologique représentatif d'environ 72,72 % du territoire national. Les zones prospectées comprennent le Bugesera, le Bututsi, le Buyenzi, le Buyogoma, le Kirimiro, l'Imbo, le Kumoso et le Mirwa (Figure 5.1). Ces régions présentent des variations importantes de facteurs environnementaux tels que l'altitude, la température et la pluviométrie, susceptibles d'influencer la distribution et l'activité des vers de terre (Lavelle et al., 1997 ; Nzigidahera, 2007).

L'échantillonnage des vers de terre a été réalisé en septembre 2023 sur quinze sites. Dans chaque site, des quadrats de 50 × 50 cm ont été positionnés aléatoirement dans des micro-habitats riches en matière organique. Le sol a été excavé jusqu'à une profondeur de 10 cm, et les vers de terre adultes (présentant un clitellum développé) ont été collectés manuellement conformément aux protocoles standards d'échantillonnage des macroinvertébrés du sol (Butt & Grigoropoulou, 2010).

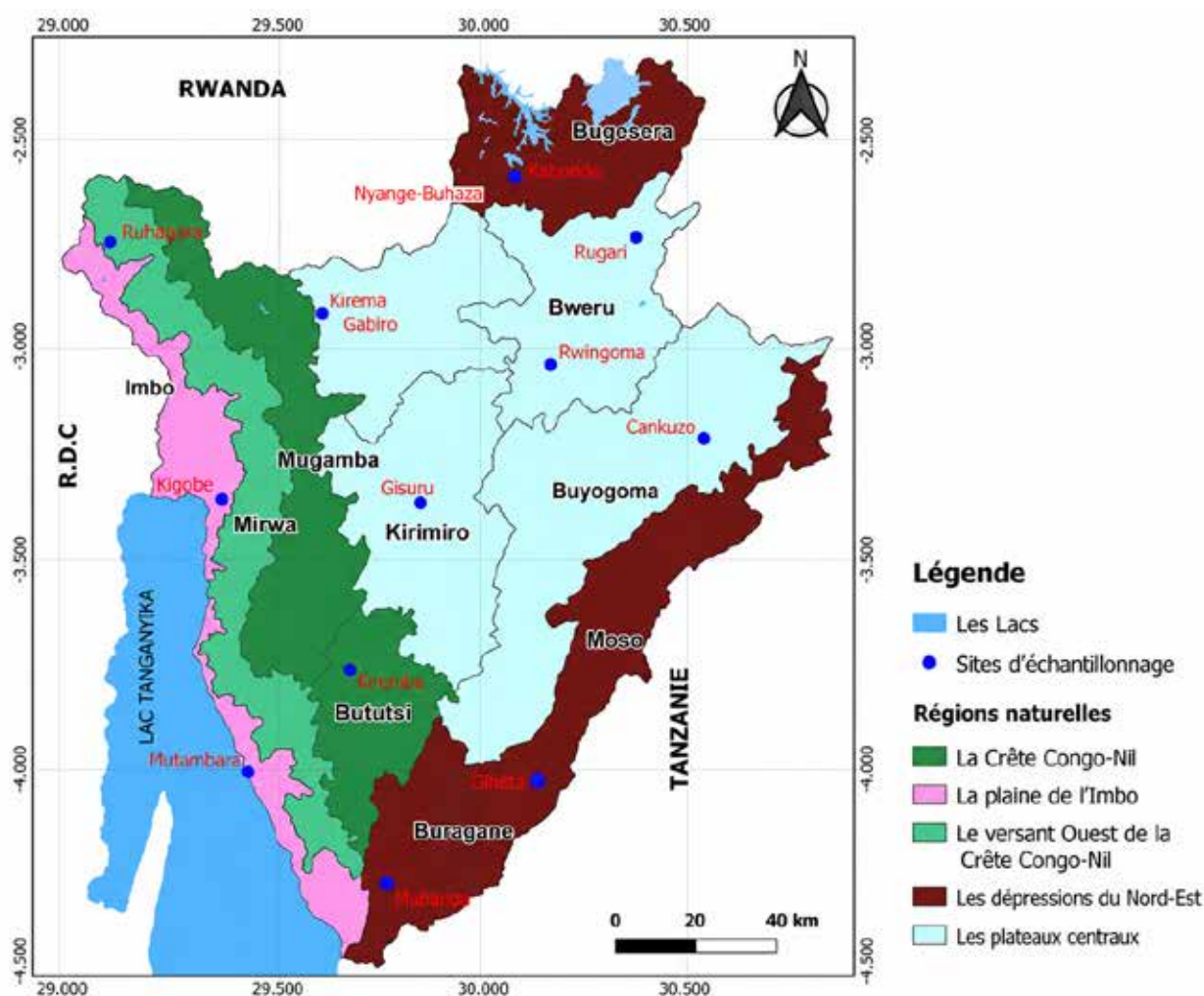


Figure 5.1. Carte de localisation des régions naturelles échantillonnées au Burundi pour la collecte des vers de terre épigés.

2.2. Caractérisation et préparation des substrats expérimentaux

Au total, cinq différents substrats agro-industriels abondants au Burundi ont été sélectionnés pour l'étude (Tableau 5.1). Il s'agit de déchets de canne à sucre (DCS); déchets de palmier à huile (DPH), du fumier de vache (FV) et du Contenu ruminal (CR) et Déchets de bananes à bière (DB).

Tableau 5.1



Sites d'échantillonnage

des substrats et leurs coordonnées géographiques

ÉCHANTILLON	LOCALITÉ, SITE	LATITUDE SUD (°)	LONGITUDE EST (°)
Déchets de canne à sucre (DCS)	Gihofi, SOSUMO	4,027	30,156
Déchets de palmier à huile (DPH)	Rumonge, Kanyenkoko (Huilerie artisanale)	3,986	29,437
Fumier de vache (FV) & Contenu ruminal (CR)	Abattoir de Bujumbura	3,365	29,386
Déchets de bananes à bière (DB)	Kayanza, société IMENA	2,935	29,604

DCS étaient faits d'un mélange (v/v) de 75% de bagasse et 25% d'écume. DPH étaient un mélange (v/v) de 75% de fibres de mésocarpe et 25% de grappes vides. DB étaient un mélange (v/v) de 75% de pelure et 25% de pédoncules de régimes.

Afin de réduire la phytotoxicité initiale et stabiliser les substrats, un pré-compostage de deux semaines a été réalisé. Les déchets ont été mélangés du fumier bovin, puis laissés se reposer pour amorcer le compostage. La température a été suivie (Figure 5.2) hebdomadairement et le substrat a été considéré comme stabilisé lorsque la température s'est maintenue entre 27 °C et 35 °C, indiquant une phase de maturation compatible avec l'introduction des vers de terre (Edwards & Bohlen, 1996 ; Lazcano & Domínguez, 2011 ; Domínguez et al., 2019).



Figure 5.2. Suivi de la température dans les déchets de palmier à huile en fin de phase de pré-compostage.

2.3. Dispositif expérimental de vermiculture

Les expérimentations ont été réalisées au laboratoire à l'École Normale Supérieure du Burundi, à une température ambiante de 27 ± 2 °C, correspondant aux conditions optimales pour les vers de terre épigés tropicaux (Edwards & Arancon, 2004 ; Domínguez & Edwards, 2011).

Le dispositif expérimental comprenait 48 unités (boîtes en plastique de 350 mL), perforées pour assurer l'aération et le drainage. Chaque unité contenait un substrat pré-composté et deux vers de terre adultes. Les boîtes ont été recouvertes d'un tissu opaque afin de limiter l'exposition à la lumière, conformément au comportement photophobe des vers de terre (Edwards & Bohlen, 1996).

L'humidité des substrats a été maintenue entre 70 et 80 %, plage optimale pour l'activité biologique et la reproduction des vers de terre (Domínguez & Edwards, 2011 ; Edwards & Arancon, 2004). Les traitements expérimentaux ont été organisés selon le type de substrat (DCS et DPH), avec des répétitions indépendantes pour chaque morpho-espèce.



Figure 5.3. Boîtes utilisées pour la vermiculture au laboratoire, après introduction des déchets expérimentaux et des vers de terre et après étiquetage.

2.4. Identification taxonomique et analyses morpho-anatomiques

Pour chaque site, trois spécimens adultes ont été sélectionnés pour l'analyse taxonomique. Les individus ont été euthanasiés dans de l'éthanol à 30 %, puis fixés dans une solution de formaldéhyde à 5 %.

L'identification a été réalisée sur la base de caractères morphologiques et anatomiques standards (Blakemore, 2015), incluant :

- **Morphologie externe** : longueur, largeur, pigmentation, forme du prostomium, position du clitellum et disposition des soies ;
- **Anatomie interne** : organisation des organes reproducteurs (pores génitaux, glandes prostatiques).

Les observations ont été effectuées à l'aide d'un stéréomicroscope (EUROMEX DZ.5040). Des coupes histologiques sagittales ont été réalisées à l'aide d'un microtome (LEICA RM2125 RTS) (Figure 5.4), colorées à l'hématoxyline-éosine selon les protocoles standards en histologie (Bancroft & Gamble, 2008), puis observées après séchage à 50 °C.

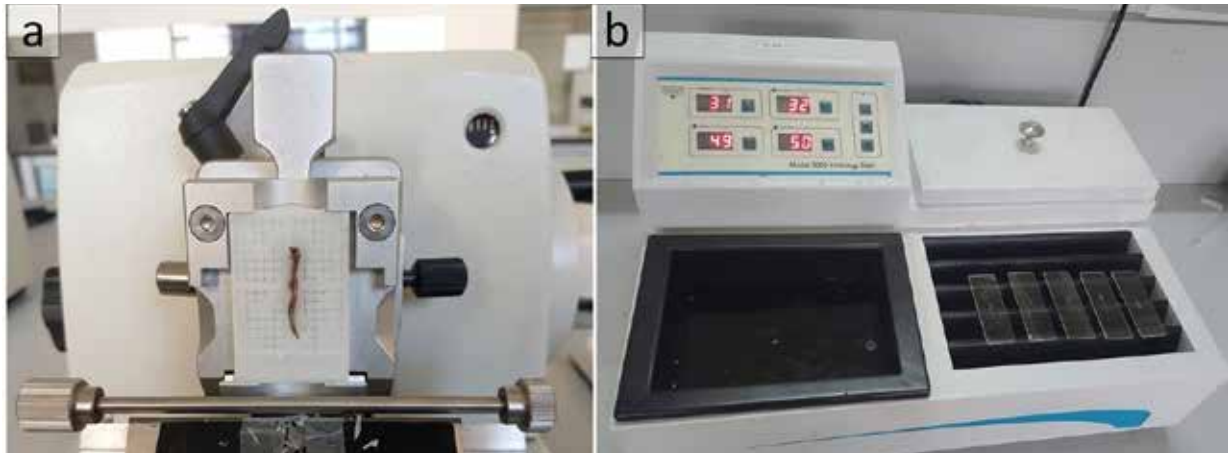


Figure 5.4. Morceau antérieur d'un spécimen de ver de terre inclus dans la paraffine et monté sur le microtome et en train d'être coupé et coupes histologiques en train d'être séchées à l'étuve à 50 °C

2.5. Évaluation des performances biologiques

Les performances des vers de terre ont été appréciées sur bases de la survie, masse corporelle, nombre de cocons et de juvéniles par adulte et accroissement. Pour chaque boîte, les données pour chacune de ces variables ont été collectées à 2, 4 et 6 semaines, en pesant et en comptant soigneusement les vers de terre et en les remettant dans la boîte après examen.

La masse corporelle a été mesurée à l'aide d'une microbalance, avec une précision de 1/100 de g pour chaque boîte, après 2 et 4 semaines d'élevage. Les vers de terre adultes étaient nettoyés, pesés et la masse moyenne (g) par boîte qui correspond à la masse d'un individu calculée.

Le taux de survie (%) ou TS 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 4-6 semaines d'incubation par rapport au nombre initial de vers de terre mis dans chaque boîte, soit 2 pour chaque analyse. Le taux de survie (TS) (%) a été calculé selon :

$$TS = \%(N_f - N_i) / N_i$$

Où,

N_i = Nombre initial de vers de terre mis dans chaque boîte

N_f = Nombre de vers de terre restant après la mortalité

Le nombre de cocons et de juvéniles produits par adulte a été déterminé toutes les deux semaines en rapportant le nombre total de cocons au nombre de vers de terre adultes introduits, soit 2.

L'accroissement de la population R (%) a été calculé à 4 et 6 semaines selon :

$$R = \% \frac{(Ni - No)}{No}$$

Où,

Ni = population finale après 4 semaines d'élevage

No = population initiale

Les données de performances des vers de terre étudiés sur déchets de canne à sucre ont été appréciées en comparant les valeurs moyennes ($\pm$ IC = 95%) obtenues aux valeurs standards rapportées dans la littérature (Edwards & Bohlen, 1996 ; Domínguez & Edwards, 2004 ; Sinha et al., 2010 ; Lazcano & Domínguez, 2011). Par précaution, en raison de la disparité et du nombre limité d'observations entre espèces et déchets (n = 18-36 pour morpho-espèce 1, n = 3-6 pour morpho-espèces 2 et 3), les espèces de même que les déchets (n'ont pas fait l'objet de comparaisons statistiques. Les calculs nécessaires ont été effectués avec le logiciel R, version 4.2.0 (R Core Team, 2022).

2.6 Analyse de la teneur en nutriments et métaux lourds des vermicompost

Des échantillons composites ont été obtenus après 60 jours de vermicompostage en bacs à flux continu (Figure 5.5) avec la morpho-espèce la plus performantes puis analysés pour apprécier la qualité et l'innocuité.



Figure 5.5. Photo montrant les bacs de vermicompostage avec le vermicompost à base de fumier de vache en avant-plan

La qualité des vermicomposts a été appréciée à l'aide de comparaisons de leurs teneurs en macro- et oligoéléments, en autres minéraux avec les données de la littérature. Leur innocuité en rapport avec les métaux lourds ou éléments traces métalliques a été appréciée en comparant leurs teneurs en Cadmium (Cd), Plomb (Pb), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Zinc (Zn) aux limites fixées dans la norme AFNOR NF U44-051 en rapport avec les amendements organiques.

Les analyses des nutriments et des éléments traces métalliques ont été réalisées à l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), selon des méthodes standards d'analyse des sols et amendements organiques (APHA, 2017 ; Gupta & Garg, 2009)

3. Résultats

3.1. Morphologie, anatomie et occurrence dans les régions naturelles

Au total, 24 spécimens de vers de terre provenant des 8 régions naturelles échantillonnées ont été examinés. Les analyses morphologiques et anatomiques ont révélé que les vers de terre étudiés présentent des similitudes, mais aussi quelques différences morphologiques et anatomiques (figures 5.6-5.11, tableau 5.2). Ces différences permettent de les répartir en trois morpho-espèces : dont une première espèce ubiquiste (espèce 1) représentée par les vers de terre en provenance de Bugesera, Bututsi, Buyenzi, Imbo, Kirimiro 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 5.6-5.11). 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 :

Tableau 5.2  **Caractéristiques morphologiques détaillées des spécimens de vers de terre examinés par région naturelle.**

Traits morphologiques	Région							
	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	164,50
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 femelles	2	2	2	2	2	2	2	2
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

Leur caractérisation se résume comme suit :

- Morpho-espèce 1 : Couleur sur la face dorsale brune avec éclat vert irisé ; prostomium épilobique fermé, Clitellum en position xiii-xviii, prostate en position xvi-xx ;
- Morpho-espèce 2 : Couleur sur la face dorsale brune sans éclat vert irisé ; prostomium épilobique fermé, Clitellum en position xiii-xviii, prostate en position xvii-xxv ;
- Morpho-espèce 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 5.6-5.11, tableau 5.2).



Figure 5.6. 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).

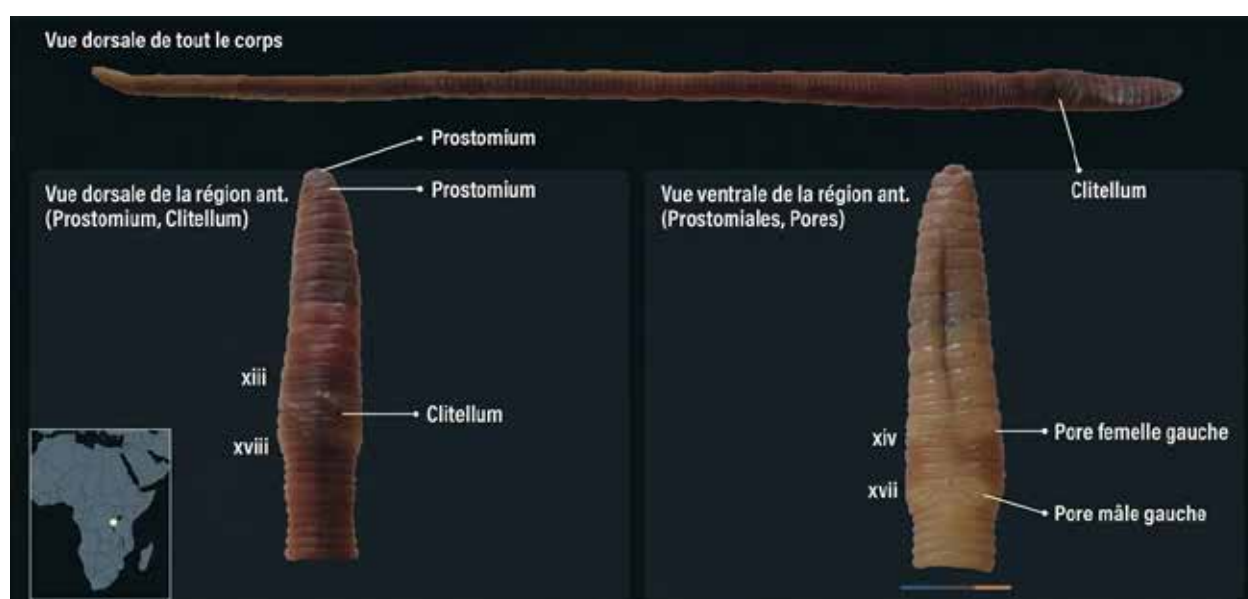


Figure 5.7. Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce de ver de terre identifiée dans la région de Kumoso. En haut : vue dorsale de tout le corps. En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure.

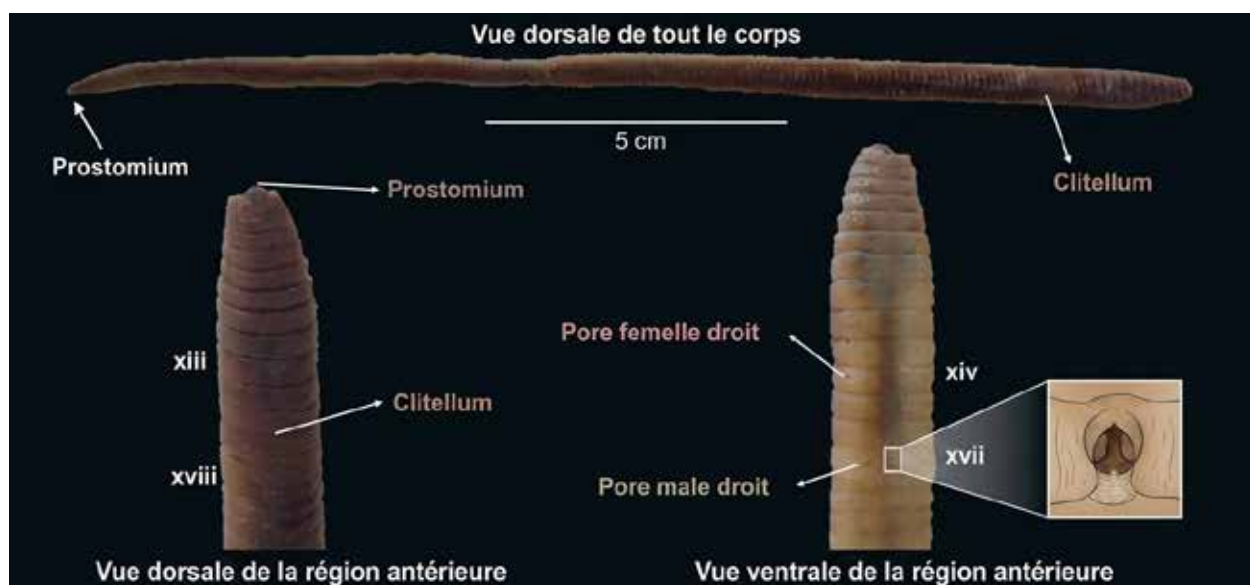


Figure 5.8. Caractéristiques morphologiques externes de l'espèce de ver de terre identifiée dans la région de Buyogoma. En haut : vue dorsale de tout le corps. En bas à gauche : vue dorsale de la région antérieure. En bas à droite : vue ventrale de la région antérieure.

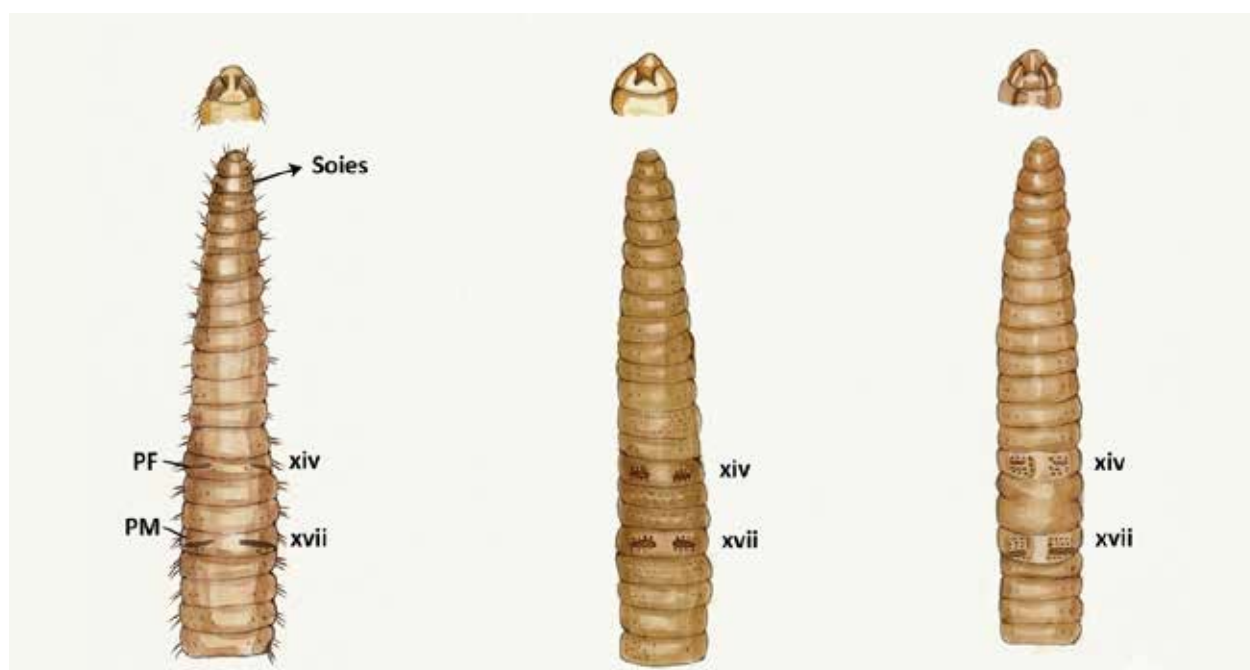


Figure 5.9. Dessin de la partie antérieure du corps montrant les caractéristiques morphologiques des espèces de ver de terre identifiées. En haut : Vues dorsales du prostomium. En bas : vues ventrales de la région antérieure du corps. Gauche : groupe 3; milieu : groupe 1; droite : groupe 2. PF : pore femelle ; PM : pore mâle.

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 examinés avaient une section de corps cylindrique et aplatie à la face ventrale. Elles ont aussi révélé que chez la morpho espèce 1, la prostate (figures 5.11 & 5.12) 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.

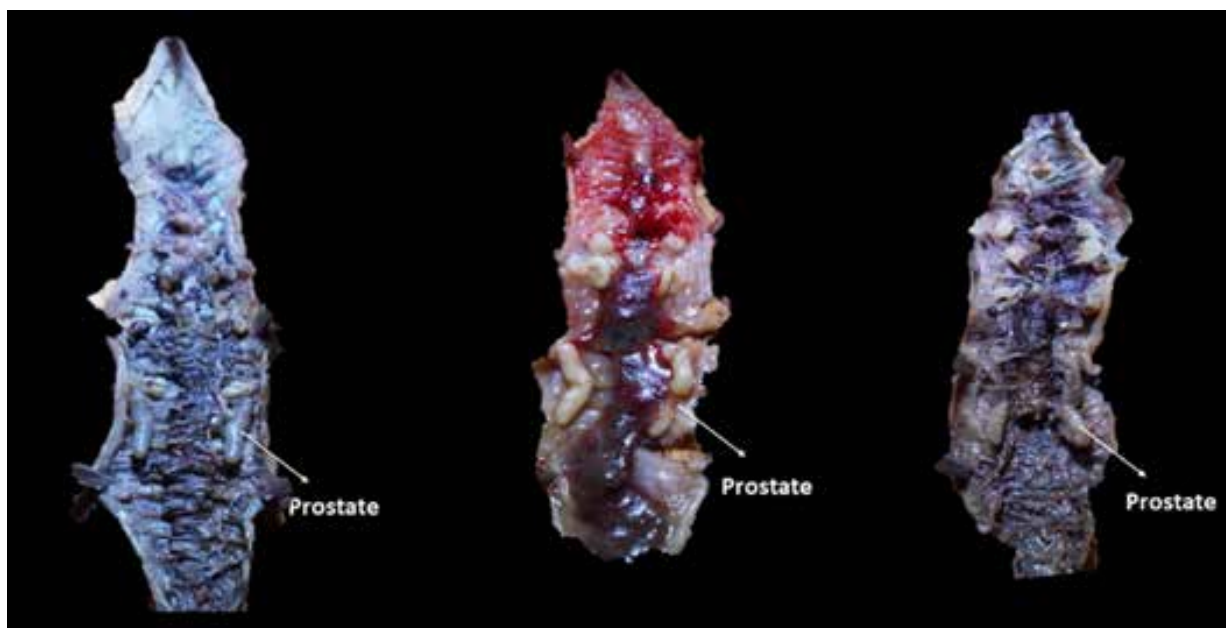


Figure 5.10. Position de la prostate chez les espèces de ver de terre identifiées : A gauche : morpho espèce 3 ; au milieu : morpho espèce 1 et à droite ; morpho espèce 2.



Figure 5.11. Coupe sagittale montrant la position de la prostate chez la morpho espèce 3. Survie, masse corporelle et reproduction des vers de terre en culture

Le taux de survie de la morpho-espèce 1 était 100% et 83,3 %, respectivement sur DCS et PPH. Il est resté égal à 100% sur ces deux déchets étudiés pour la morpho-espèce 2 et pour la morpho-espèce 3. Les résultats pour les autres paramètres de performance sont synthétisés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3

Moyennes ($\pm$ IC 95%) de la masse corporelle des juvéniles et du taux de reproduction par morpho-espèce

Variable de performance	Morpho-espèce 1 (n=36)	Morpho-espèce 2 (n=6)	Morpho-espèce 3 (n=6)
Masse initiale d'un adulte (g)	1,33 $\pm$ 0,09	1,03 $\pm$ 0,13	1,17 $\pm$ 0,43
Masse d'un adulte à 4 semaines (g)	1,27 $\pm$ 0,11	1,09 $\pm$ 0,11	1,18 $\pm$ 0,57
No. Cocons par adulte à 2 semaines	2,71 $\pm$ 0,69	3,17 $\pm$ 3,07	2,42 $\pm$ 1,17
No. Cocons par adulte à 4 semaines	3,19 $\pm$ 0,79	4,33 $\pm$ 4,69	1,67 $\pm$ 1,93
No. Juvéniles par adulte à 4 semaines	2,04 $\pm$ 0,39	3,42 $\pm$ 1,26	0,67 $\pm$ 0,27
No. Juvéniles par adulte à 6 semaines	6,18 $\pm$ 1,69	10,25 $\pm$ 10,48	4,17 $\pm$ 3,71
Accroissement pop. à 4 semaines (%)	204 $\pm$ 39	342 $\pm$ 126	67 $\pm$ 27
Accroissement pop. à 6 semaines (%)	542 $\pm$ 153	1025 $\pm$ 1048	417 $\pm$ 371

3.3 Composition physico-chimiques des vermicomposts produits

Les analyses physico-chimiques réalisées sur les vermicomposts issus de différents substrats (déchets de canne à sucre – VDCS, déchets de palmier à huile – VDPH, fumier de vache – VFV, contenu ruménal – VCR et déchets de bananes à bière – VDB) obtenus avec la morpho-espèce 1 montrent des variations significatives en termes de macronutriments, oligo-éléments et métaux lourds, reflétant à la fois la nature des substrats et l'activité biologique des vers de terre (figure 5.13).

3.3.1 Macronutriments

La teneur en macronutriments diffère entre vermicompost, selon les déchets d'origine. La teneur en azote total (%N) varie de 0,633 % (VCR) à 1,16 %. Le VDPH présente une valeur élevée en azote (0,963 %), ce qui en fait un amendement particulièrement intéressant pour enrichir les sols pauvres en N. Le VDB se distingue par l'apport le plus important en azote (1,16 %), suivi du VDCS (1,04 %), ce qui suggère un fort potentiel fertilisant.

Le phosphore total (%P₂O₅) est le plus élevé dans VDCS (2,49 %), suivi du VDB (1,88 %), tandis que le VDPH présente une teneur plus faible (0,991 %). Concernant le potassium (%K₂O), le VFV et le VDB présentent des teneurs supérieures (0,971 % et 0,871 %, respectivement), tandis que le VDPH (0,802 %) et le VCR (0,759 %) restent modérés. Ces résultats indiquent que chaque type de vermicompost pourrait être sélectionné selon les besoins spécifiques du sol en N, P et K.

Le rapport C/N, indicateur de maturation et de stabilité du compost, varie de 6,77 (VDPH) à 11,9 (VCR). Les vermicomposts à base de déchets végétaux (VDCS, VDPH et VDB) présentent des rapports C/N compris entre 6,77 et 7,62, indiquant une décomposition avancée et une disponibilité élevée des nutriments.

3.3.2 Autres éléments minéraux

Les teneurs en calcium (%CaO) et magnésium (%MgO) varient selon le type de vermicompost. Le VDCS montre les valeurs les plus élevées en Ca (4,71 %) et Mg (1,24 %), tandis que le VDB présente les valeurs les plus faibles pour ces éléments (Ca 1,52 %, Mg 0,596 %). Le sodium (%Na₂O) est plus élevé dans le VDB (0,238 %), ce qui pourrait contribuer à la fertilité et à la structure du sol.

3.3.3 Oligo-éléments et métaux lourds

Le fer (%Fe) est maximal dans le VDCS (1,8 %), tandis que le VDB présente une teneur intermédiaire (0,469 %). Les teneurs en manganèse (%Mn) restent faibles dans tous les échantillons, avec une valeur minimale dans le VDB (0,099 %).

Pour les métaux lourds, les concentrations restent globalement dans les limites de sécurité établies par les normes (en l'occurrence AFNOR NF U44-051). Le cuivre (Cu) est particulièrement élevé dans le VDB (70,5 mg/kg), suivi du VDCS (52,7 mg/kg), alors que le plomb (Pb) reste faible (<0,374 mg/kg pour tous les échantillons, non indiqué dans le tableau mais mentionné dans l'analyse initiale). Le zinc (Zn) varie de 192 mg/kg (VDCS) à 57,6 mg/kg (VDB). Le cobalt (Co) reste inférieur à 5 mg/kg dans tous les vermicomposts, et le nickel (Ni) est faible dans le VDB (<2,5 mg/kg) comparé à VDCS (16,6 mg/kg).

En résumé, le VDB se distingue par son apport élevé en azote et cuivre, ainsi que par des niveaux modérés de phosphore et potassium, faisant de lui un amendement complémentaire aux autres types de vermicomposts. Le VDCS reste la source la plus riche en phosphore et potassium, tandis que le VDPH est privilégié pour l'azote. Tous les vermicomposts étudiés présentent des niveaux sécuritaires de métaux lourds, confirmant leur potentiel pour une utilisation agricole durable (Figure 5.12, Tableau 5.4). Le diagramme de la figure 5.12 donne plus de détails sur les teneurs et permet une comparaison visuelle.

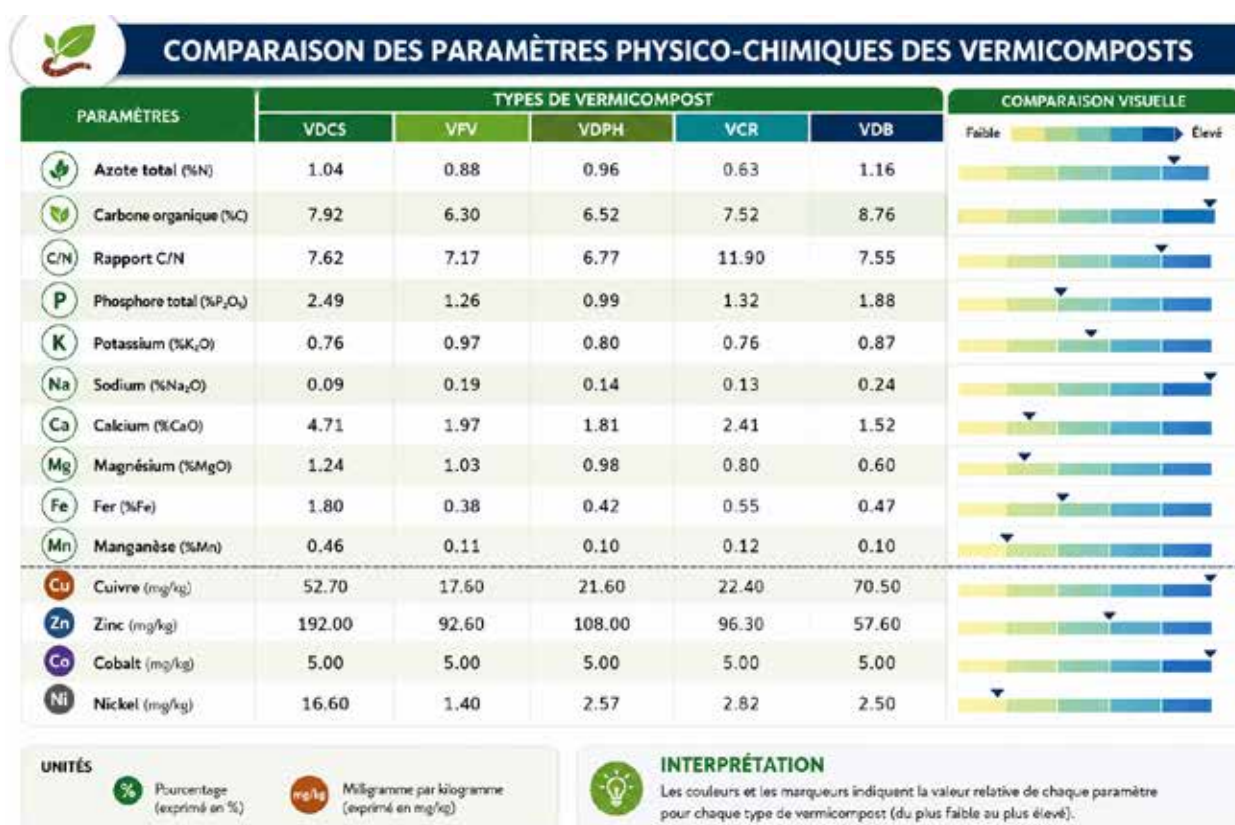


Figure 5.12. Vue d'ensemble et comparaison visuelle entre substrats des valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés

Tableau 5.4



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

Analyses	Vermicompost				
	VDCS	VFV	VDPH	VCR	VDB
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(%P ₂ O ₅)	2,49	1,26	0,991	1,32	1,88
Potassium (%K ₂ O)	0,762	0,971	0,802	0,759	0,871
Sodium (%Na ₂ O)	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

4. Discussion



4.1. Espèces, leurs caractéristiques morpho-anatomique et occurrence géographique

L'analyse morpho-anatomique approfondie des spécimens collectés dans les huit régions naturelles du Burundi a mis en évidence une diversité notable au sein de la famille des Eudrilidae. La morpho-espèce 1, identifiée comme l'entité dominante dans les écosystèmes de l'Imbo, du Bututsi et du Mirwa (Tableau 5.2), correspond rigoureusement à la description d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867). Sa classification systématique complète est la suivante :

- Règne : Animalia
- Embranchement : Annelida (Lamarck, 1809)
- Classe : Clitellata (Michaelsen, 1919)
- Ordre : Crassiclitellata (Jamieson, 1988)
- Famille : Eudrilidae (Claus, 1880)
- Genre : *Eudrilus* (Perrier, 1871)
- Espèce : *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867)

L'identification formelle de cette espèce repose sur une convergence de traits diagnostiques : la présence d'une pigmentation dorsale brune avec un éclat vert irisé caractéristique (Figure 5.7), un prostomium de type épilobique fermé et la position du clitellum sur les segments xiii-xviii (Tableau 5.2). Sur le plan biométrique, la masse moyenne des adultes (1,32 g à 2,24 g) s'insère parfaitement dans la gamme de 1,5 g à 2,5 g rapportée par Parthasarathi (2007) pour des individus matures. De plus, les dimensions corporelles (130-165 mm) et le nombre de segments (155-183) surpassent les standards de Viljoen et Reinecke (1989), suggérant que les conditions environnementales du Burundi sont particulièrement favorables au développement de ce « ver de terre de nuit africain ».

4.2. Plasticité phénotypique et hypothèse de variants régionaux

Les morpho-espèces 2 (Kumoso) et 3 (Buyogoma) présentent des divergences morphologiques, notamment l'absence d'iridescence cuticulaire et des variations dans l'organisation des organes reproducteurs, avec un glissement de la prostate vers les segments xvii-xxv (Figure 5.11).

Il est hautement probable que ces groupes constituent des variants phénotypiques d'*E. eugeniae* adaptés à des niches écologiques spécifiques. Comme le soulignent Domínguez et al. (2005), les vers de terre tropicaux manifestent une plasticité morphologique importante en réponse aux gradients de ressources. Toutefois, la présence d'un prostomium épilobique ouvert chez la morpho-espèce 3 (Figure 5.10) pourrait suggérer l'existence d'espèces cryptiques au sein du complexe *E. eugeniae*, une hypothèse discutée par Blouin et al. (2013). En l'absence d'analyses moléculaires par code-barres ADN, ces variations soulignent la complexité de la biodiversité du sol au Burundi.

4.3. Performances biologiques et efficacité du vermicompostage

Le taux de survie de 100 % observé sur les déchets de canne à sucre (DCS) confirme l'efficacité du protocole de pré-compostage de deux semaines (Figure 5.2). Ce résultat est supérieur à celui de Sangeeta et al. (2012), qui signalaient une mortalité initiale sur des déchets non stabilisés. La dynamique de reproduction de la morpho-espèce 2, atteignant un accroissement de population de 1025 ± 1048 % à 6 semaines (Tableau 5.3), surpasse largement les performances rapportées par Arancon et al. (2006) pour *Eisenia fetida*. Cet accroissement de population exceptionnelle, couplée à une masse individuelle stable (1,27 g), démontre une allocation énergétique optimale entre croissance et ponte (Blouin et al., 2013).

4.4. Qualité agronomique et minéralisation des nutriments

La caractérisation physico-chimique des vermicomposts (Figure 5.13) révèle un potentiel fertilisant remarquable. Le vermicompost de bananes à bière (VDB) se distingue par sa teneur en azote total (1,16 %), comparable aux standards de Sinha et al. (2010). Le pic de phosphore (2,49 % P_2O_5) enregistré dans le vermicompost de canne à sucre (VDCS) est nettement supérieur au taux de 1,2 % rapporté par Bhat et al. (2015) sur des résidus de bagasse. Cette performance suggère une synergie accrue entre *E. eugeniae* et la microflore intestinale, facilitant une minéralisation rapide. Les rapports C/N obtenus (6,77 à 11,9) indiquent une maturité avancée du produit final, garantissant une biodisponibilité immédiate des nutriments.

4.5. Innocuité chimique et conformité aux standards internationaux

L'innocuité des vermicomposts produits est confirmée par une conformité rigoureuse aux référentiels internationaux. En comparant les teneurs en métaux lourds (Tableau 5.4) à la norme AFNOR NF U44-051, on observe que le plomb (< 20 mg/kg) et le cadmium ($< 0,8$ mg/kg) restent bien en deçà des seuils de sécurité (respectivement 180 mg/kg et 3 mg/kg).

De plus, ces résultats respectent les limites strictes du Règlement (UE) 2019/1009 (Pb < 120 mg/kg) et de la règle EPA Part 503 des États-Unis. Cette faible charge métallique, associée à la richesse en nutriments, confirme que le vermicompostage est une technologie écologique mature pour transformer des polluants agro-industriels en amendements de haute qualité pour les Ferralsols dégradés du Burundi (FAO, 2015).

Conclusion



La présente étude démontre le potentiel exceptionnel des vers de terre épigés du Burundi, particulièrement de l'espèce ubiquiste *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), pour la valorisation des déchets agro-industriels locaux. Les résultats prouvent que le vermicompostage permet non seulement de réduire la charge polluante des sous-produits de la canne à sucre, du palmier à huile et de la banane, mais aussi de les transformer en vermicompost de haute qualité. La conformité rigoureuse aux normes internationales (AFNOR, UE 2019/1009) garantit l'innocuité de ces vermicompost et une utilisation sans risque toxicologique.

Pour transformer ces preuves de concept en solutions d'économie circulaire à grande échelle, trois axes prioritaires se dégagent :

1. Validation Moléculaire : Le recours au séquençage du gène COI est indispensable pour lever les doutes sur l'existence d'espèces cryptiques au sein des morpho-espèces 2 et 3 identifiées dans le Kumoso et le Buyogoma).
2. Dynamique Microbiologique : Une caractérisation de l'activité enzymatique (phosphatases, cellulases) permettrait d'expliquer les mécanismes de minéralisation supérieurs observés, notamment pour le phosphore dans les déchets de canne à sucre.
3. Validation Agronomique in situ : Il est désormais crucial de tester l'efficacité de ces vermicomposts sur les rendements des cultures dans différentes zones agro-écologiques afin de définir des recommandations de dosage précises pour les agriculteurs.

Bibliographie



Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., & Mato, S. (2016). Earthworm-microorganism interactions and their implications for organic matter transformation. *Applied Soil Ecology*, 99, 97-105.

APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., & Lee, S. (2006). Effects of vermicomposts on plant growth. *Journal of Sustainable Agriculture*, 28(1), 85-111.

Blakemore, R. J. (2015). *A global key to earthworm species (Annelida: Oligochaeta)*. VermEcology Publications.

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

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

Butt, K. R., & Grigoropoulou, N. (2010). Standard methods for sampling and extraction of earthworms. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm ecology* (2nd ed., pp. 19-35). CRC Press.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used in vermicomposting. In C. A. Edwards (Ed.), *Vermiculture technology* (pp. 25-40). CRC Press.

Domínguez, J., Edwards, C. A., & Subler, S. (2019). Earthworm activity and organic matter transformation in composting systems. *Compost Science & Utilization*, 27(4), 214-225.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.

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

FAO. (2015). *Status of the world's soil resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Feller, C., Bernoux, M., & Veldkamp, E. (2003). Soil degradation in the tropics: Methods and perspectives. *Geoderma*, 111(1-2), 55-65.

Gupta, S. K., & Garg, V. K. (2009). Physico-chemical analysis of organic waste for composting. *Bioresource Technology*, 100(21), 5123-5127.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.

Lavelle, P., Spain, A. V., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., & Rossi, J. P. (1997). Soil function in tropical ecosystems: Biological and physical interactions. *Biology and Fertility of Soils*, 25(2), 131-140.

Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Effects on plant growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(4), 563-594.

Nzigidahera, B. (2007). *Caractérisation et gestion durable des sols au Burundi*. Université du Burundi, Bujumbura.

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing* (v4.2.0). R Foundation for Statistical Computing.

Sinha, R. K., Agarwal, S., Singh, R., & Kumar, S. (2010). Vermicomposting of organic wastes. In J. Domínguez & C. A. Edwards (Eds.), *Vermiculture technology* (pp. 45-68). CRC Press.

World Bank. (2022). *Burundi: Agricultural waste management and opportunities*. World Bank Reports.



Relations entre préférences alimentaires, masse corporelle et reproduction chez *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867): quelles leçons pour le vermicompostage?



Eric Gilbert Kazitsa^{1*}, Rachelle Buhintahe¹, Adeline Ndayikeza², Prudence Bararunyeretse², Gustave Nkurunziza³, Samuel Kwizerimana⁴, Inès Mugisha⁵, Emmanuel Barankanira¹, Valence Ndayisemga⁵



École Normale Supérieure du Burundi,
Département des Sciences Naturelles,
Centre de Recherche en Sciences et de
Perfectionnement Professionnel (CReSP) ;



Université du Burundi, Faculté des
Sciences, Département de biologie



Université Polytechnique de Gitega
Faculté des Sciences Environnementales



Société de Valorisation de l'Espace Rural
et de Transformation (SOVERT)



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie,
Centre de Recherche en Agriculture et en
Développement Rural (CERADER)
* Pour correspondance : email : kazitsae@
yahoo.fr



Résumé

Le vermicompostage représente une solution durable pour la valorisation des biodéchets, dont l'efficacité dépend des interactions entre les vers de terre et les substrats. Cette étude analyse de manière intégrée les relations entre préférences alimentaires, croissance et reproduction chez le vers de terre épigé *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), afin d'en tirer des implications pour l'optimisation du vermicompostage.

Les préférences ont été mesurées par des tests d'évitement, colonisation, de consommation de même que les performances biologiques (masse corporelle et

reproduction) sur six substrats agro-industriels (contenu ruménal bovin (CR), déchets de bananes à bière (DB), déchets de canne à sucre (DCS), déchets de palmier à huile (DPH), paille et balles de riz (PR/BR).

Les résultats révèlent une sélectivité marquée, avec une forte attractivité pour DCS ($0,32 \pm 0,15$) et DPH ($0,23 \pm 0,18$), tandis que les résidus de riz sont évités. Bien que la consommation ne varie pas significativement entre substrats ($p = 0,055$), la croissance diffère fortement, DCS induisant le gain de biomasse le plus élevé ($1,17 \pm 0,26$), alors que CR entraîne une perte de masse. Des corrélations positives significatives sont observées entre taux colonisation de substrat et masse corporelle ($r = 0,38$; $p < 0,01$), ainsi qu'entre croissance et nombre de juvéniles par adulte ($r = 0,43$; $p < 0,01$).

Ces résultats permettent de proposer un modèle fonctionnel intégré du vermicompostage : Préférence alimentaire → Colonisation → Croissance → Reproduction, dans lequel la préférence comportementale constitue un prédicteur fiable des performances biologiques. L'absence d'effet de la consommation souligne le rôle déterminant de l'efficacité d'assimilation.

Sur le plan appliqué, les déchets de canne à sucre apparaissent comme un substrat optimal, tandis que les résidus récalcitrants nécessitent des stratégies de co-vermicompostage ou de prétraitement. Cette étude fournit ainsi un cadre conceptuel et opérationnel pour optimiser les systèmes de vermicompostage.

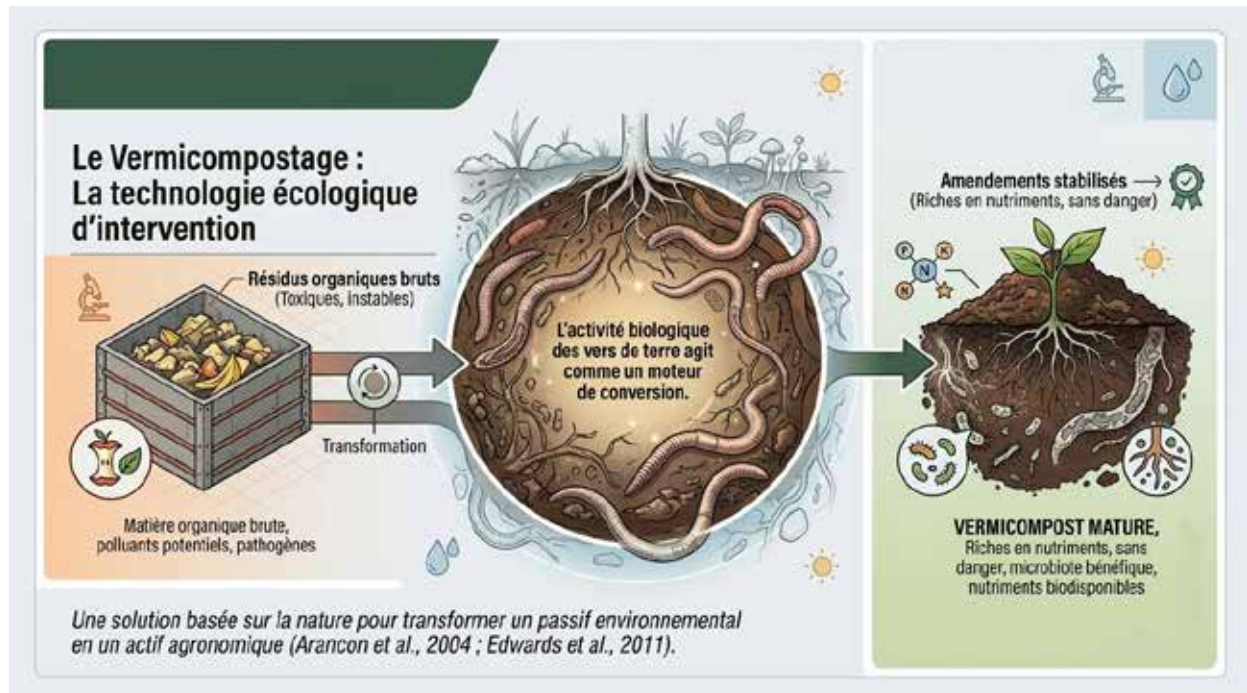
Mots-clés

Eudrilus eugeniae, préférences alimentaires, vermicompostage, croissance, reproduction, déchets agro-industriels, modèle fonctionnel.

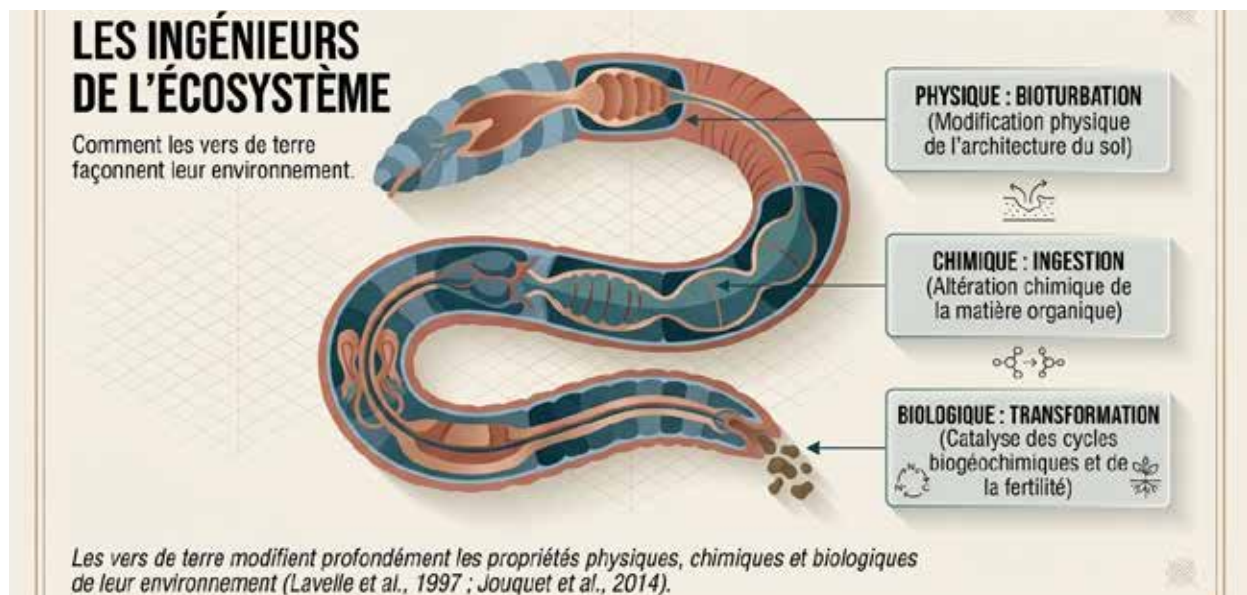


1. Introduction

La gestion durable des déchets organiques constitue un défi environnemental et agronomique majeur, particulièrement dans les régions tropicales où leur accumulation rapide entraîne des risques sanitaires, des émissions de gaz à effet de serre et une dégradation des écosystèmes (Kaza et al., 2018 ; Sinha et al., 2010). Dans ce contexte, le vermicompostage, reposant sur l'activité biologique des vers de terre, s'impose comme une technologie écologique efficace permettant de transformer les résidus organiques en amendement stabilisé riche en nutriments assimilables par les plantes : le vermicompost (Arancon et al., 2004 ; Edwards et al., 2011 ; Domínguez & Edwards, 2011). Cet amendement améliore la structure du sol, augmente la capacité de rétention en eau et favorise la disponibilité des éléments nutritifs, contribuant ainsi à une agriculture hautement productive et durable (Blouin et al., 2013 ; Lazcano & Domínguez, 2011).



Les vers de terre sont reconnus comme des ingénieurs de l'écosystème capables de modifier profondément les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Lavelle et al., 1997 ; Edwards & Bohlen, 1996 ; Bottinelli et al., 2015). Par leurs activités de bioturbation, d'ingestion et de transformation de la matière organique, ils jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques et la fertilité des sols (Blouin et al., 2013 ; Jouquet et al., 2014). Cependant, l'efficacité des systèmes de vermicompostage dépend fortement des caractéristiques des substrats utilisés, notamment leur rapport carbone/azote (C/N), leur teneur en lignine, leur pH et leur biodégradabilité (Suthar, 2009 ; Domínguez & Edwards, 2011).



L'étude des préférences alimentaires constitue un axe fondamental en écologie, car elle permet de comprendre les mécanismes de sélection des ressources et leur impact sur les performances biologiques des organismes (Provenza, 1995 ; Forbes, 2007). Dans les systèmes d'élevage, ces préférences sont déterminantes pour optimiser la nutrition, améliorer la croissance et maximiser la reproduction (Mignon-Grasteau et al., 2005). Dans le vermicompostage, elles conditionnent directement l'efficacité des processus de décomposition, la productivité des systèmes et la qualité du vermicompost (Domínguez et al., 2019).

Les préférences alimentaires des vers de terre présentent une grande diversité et résultent d'interactions complexes entre facteurs physiologiques, environnementaux et évolutifs (Sih et al., 1985 ; Provenza, 1995). Elles sont notamment influencées par la qualité des substrats, leur degré de décomposition et l'activité microbienne associée, ces organismes se nourrissant en grande partie de biomasse microbienne (Aira et al., 2007 ; Brown et al., 2000 ; Domínguez et al., 2019).

Plusieurs hypothèses sont possibles pour expliquer cette la diversité des préférences. La première repose sur la qualité nutritionnelle, notamment la teneur en azote et le rapport C/N, les substrats riches en azote favorisant la croissance et étant généralement préférés (Suthar, 2009 ; Edwards et al., 2011). La seconde met en avant la digestibilité des substrats, les matériaux riches en lignine étant moins assimilables (Kaviraj & Sharma, 2003). Une troisième souligne le rôle clé de l'activité microbienne, qui augmente la palatabilité des substrats (Aira et al., 2007 ; Domínguez et al., 2019). Enfin, la présence de composés toxiques peut induire des comportements d'évitement (Loh et al., 2005).

Dans les systèmes de vermicompostage, les performances des vers de terre reposent sur une succession de processus biologiques interdépendants. Les préférences alimentaires conditionnent d'abord la colonisation des substrats, évaluée par des tests d'évitement standardisés (AFNOR, 2008). Cette colonisation détermine ensuite la consommation, indicateur de la qualité nutritive des substrats (Maboeta & Van Rensburg, 2003). La consommation influence la croissance, en lien avec l'assimilation des nutriments (Suthar, 2009), laquelle conditionne à son tour la reproduction, paramètre clé pour la dynamique des populations (Domínguez & Edwards, 2011).

Malgré ces avancées, plusieurs lacunes subsistent. Les études intégrant simultanément préférences alimentaires, croissance et reproduction restent rares (Domínguez et al., 2019). Les données comparatives sur les déchets tropicaux sont limitées, et les mécanismes reliant ces variables sont encore insuffisamment compris. De plus, les données sur *Eudrilus eugeniae* en Afrique subsaharienne, notamment au Burundi, sont quasi inexistantes.

Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser de manière intégrée les relations entre préférences alimentaires et performances biologiques du ver de terre *Eudrilus eugeniae*. Plus spécifiquement, il s'agit de : (i) comparer les taux de colonisation, (ii) analyser les préférences de consommation, (iii) évaluer la croissance, et (iv) les associations entre ces variables.

2. Matériel et méthodes

2.1. Conditions expérimentales

Les expérimentations ont été conduites en conditions contrôlées de laboratoire, sous un régime thermique compris entre 25 et 28 °C, compatible avec les exigences écophysiologiques de *E. eugeniae* (Domínguez & Edwards, 2011). L'humidité des substrats a été maintenue proche de la capacité au champ tout au long des essais afin de garantir des conditions optimales d'activité biologique des vers de terre.

2.2. Les vers de terre

L'espèce utilisée est *E. eugeniae* (Kinberg, 1867), un ver de terre épigé largement utilisé en vermicompostage pour sa forte capacité de croissance et de reproduction (Edwards et al., 2011). Des individus adultes avec un clitellum bien développé et présentant une homogénéité de taille et de masse ont été obtenus d'un système de vermicompostage de l'École Normale supérieure du Burundi. Avant les essais, les vers de terre ont été acclimatés sur du fumier de vache pendant trois semaines, substrat ici considéré comme neutre.

2.3. Déchets organiques

Six types de déchets organiques agro-industriels ont été sélectionnés en raison de leur grande disponibilité en milieu tropicale et au Burundi : contenu ruménal de vaches (CR), déchets de bananes à bière (DB, mélange (v/v) de 75% de pelures et 25% de pédoncules de régimes), déchets de canne à sucre de sucrerie (DCS, mélange (v/v) de 75% de bagasse et 25% d'écume), déchets de palmier à huile (DPH, faits de fibres de mésocarpe), paille de riz et balles de riz. Les substrats ont été collectés, triés, homogénéisés, puis humidifiés, couverts et pré-compotés en hangar jusqu'à la chute brutale vers les températures deviennent mésophiliques, trois semaines (Figure 1) avant utilisation. Leur provenance et principales caractéristiques physico-chimiques sont présentées dans le tableau 6.1.

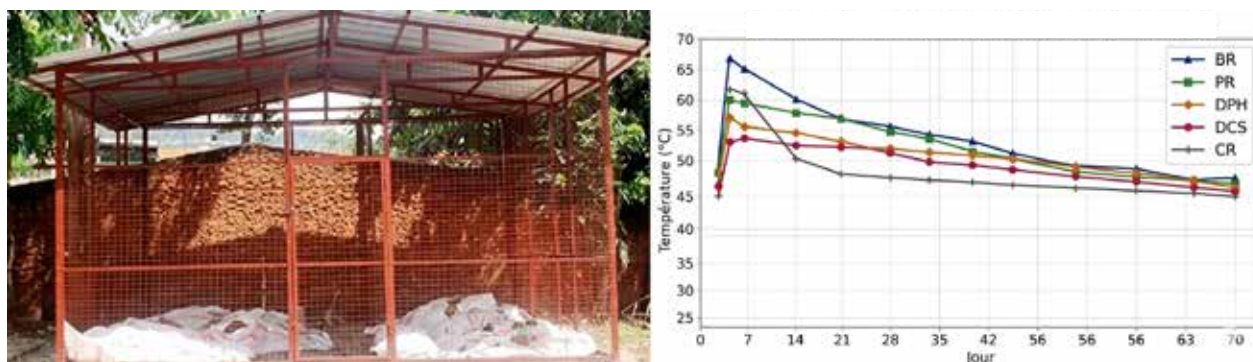


Figure 6.1. Tas de déchets pendant le pré-compostage en hangar (gauche) et évolution de leur profil thermique (droite).

Tableau 6.1

Caractéristiques

physico-chimiques des déchets primaires étudiés

Déchets/résidus et provenance	Matière sèche (%)	Fibres (%)	pH eau	CE (μS/cm)	N total (%)	P total (mg/kg)	C org. (%)	Rapport C/N	Ca total (mg/kg)	K total (mg/kg)	Mg total (mg/kg)
Paille de riz (Gihanga)	81.65	47.96	6.05	966	0.45	538	32.39	71.98	1391	847.1	1286
Balles de riz (Gihanga)	84.91	43.39	5.9	1313	0.79	446	31.09	39.35	1117	2648	242.8
Bagasse de cannes à sucre (SOSUMO)	50.2	43.99	5.07	393	0.32	329	32.18	100.56	814.2	36.04	235.7
Ecume de cannes à sucre (SOSUMO)	36.77	17.45	6.75	1378	1.01	4657	32.59	32.27	16720	4958	8650
Raffles de palmier à huile (Huilerie, Rumoge)	53.96	61.93	7.68	1868	2.94	4332	35.98	12.24	631.8	4277	2098
Fibres de mésocarpes de palmier à huile (Huilerie, Rumoge)	72.42	39.91	5.49	674	2.48	220	37.07	14.95	2455	211.8	566.2
Contenu gastro-intestinal de bovins (Abattoir Bujumbura)	26.43	21.24	4.73	4020	0.12	1721	32.53	271.08	2611	1130	282.8
Pédoncules de régimes de bananes à bière (IMENA)	9.23	34.76	5.9	10700	0.68	636	32.51	47.81	1544		1052

2.4. Dispositif expérimental

L'étude repose sur une approche expérimentale comparative visant à évaluer les préférences alimentaires et les performances biologiques des vers de terre en fonction des substrats. Les variables étudiées incluent la colonisation, la consommation, la croissance et la reproduction. Chaque traitement a été réalisé avec des répétitions indépendantes afin d'assurer la robustesse des résultats.

2.5. Test de colonisation préférentielle des substrats

Une série de tests de colonisation ont été réalisés au laboratoire, selon une méthode inspirée des protocoles standardisés de test d'évitement chez les vers de terre (AFNOR, 2008). Les dispositifs expérimentaux étaient chacun constitués de six compartiments contenant chaque fois deux différents substrats, placés de manière alternée (3 répliques ou $n = 3$ par déchet par test, au total $n = 6$ car le test a été répété pour chaque déchet). Les vers de terre (12 individus) étaient introduits au centre du dispositif, leur permettant de se répartir librement (figure 6.2).

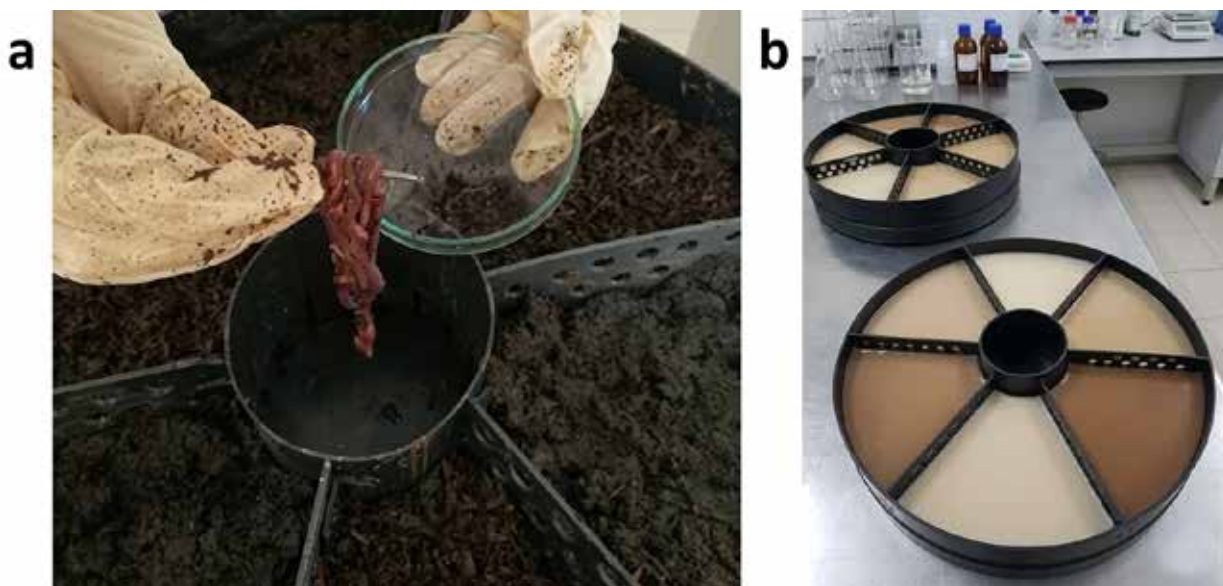


Figure 6.2. Dispositifs utilisés dans les tests d'évitement (a) lors de l'introduction des vers de terre et (b): après l'introduction et couverture de carton.

Après 48 heures, le nombre d'individus présents dans chaque substrat a été comptabilisé et le taux de colonisation a été calculé pour chaque substrat comme le rapport entre ce nombre et le nombre total de vers de terre introduits dans le dispositif, soit 12.

2.6. Mesure de la consommation des déchets

Des tests de consommation ont été faits au laboratoire sous température ambiante (18,2 - 30,7 °C), dans des récipients en plastique aérés latéralement montés chacun de six micro-tubes dans lesquels les déchets étaient présentés aux vers de terre deux à deux en disposition alternée comme dans les tests précédents, après pesée (masse initiale). A chaque test ($n = 3$ pour chaque déchet, au total $n = 6$ car répété), un ver de terre a été introduit dans le récipient central préalablement rempli de sol très acide (pH = 4,74) et dégradé, type ferralsol (Figure 6.3) après quoi le récipient était couvert à l'aide d'une valve de boîte de Pétri. Toxique et peu nutritif, ce type de sol était supposé inciter les vers de terre à se nourrir des déchets plutôt que du sol.



Figure 6.3. Dispositif en plastique utilisé pour mesurer la consommation des déchets par les vers de terre

Après 48 heures et 72 heures, les micro-tubes étaient inspectés et la masse restante (masse finale) pesée. Pour chaque déchet, la quantité de déchet consommée a été estimée comme la différence entre la masse initiale et la masse finale.

2.7. Mesure de la masse corporelle et la reproduction

En fin, une expérience de vermiculture sur les déchets sous étude (excepté BR et PR car très peu consommés) a été réalisée au laboratoire, en boîtes en plastique aérées (de 300 mL chacune, 6 boîtes par déchet ou $n = 6$) (figure 6.4) à la température ambiante, avec une paire de vers de terre adultes par boîte. Avant leur introduction, un à un, les vers de terre étaient nettoyés à l'eau puis essuyés à l'aide d'un papier filtre, puis pesés au centième de gramme près à l'aide d'une microbalance.



Figure 6.4. Boîtes de vermiculture, après introduction des substrats et des vers de terre

Pour chaque boîte, la masse initiale d'un ver de terre (MVTI) a été estimée comme la masse moyenne de la paire y introduite. Après six semaines d'incubation, les boîtes ont été inspectées et les vers de terre étaient nettoyés puis pesés. La masse finale d'un ver de terre (MVTF) a été déterminée aussi comme la moyenne de la paire à cet instant et le rapport MVTF/MVTI calculé. Les cocons et les juvéniles présents dans chaque boîte étaient également comptés et leur nombre enregistré.

2.8. Statistiques et détermination des préférences et d'associations entre variables

Des analyses statistiques ont été réalisées pour comparer l'effet des différents substrats sur la colonisation, la consommation, la croissance et la reproduction de *E. eugeniae*.

L'homogénéité des variances a été systématiquement vérifiée par le test de Bartlett. En raison de l'hétérogénéité des variances observée pour la colonisation et la consommation, des méthodes non paramétriques ont été privilégiées. Les différences entre les traitements ont été testées via l'ANOVA de Kruskal-Wallis. En cas de résultat significatif, des comparaisons multiples avec correction de Bonferroni ont été appliquées pour identifier les paires de substrats présentant des écarts significatifs.

Les relations entre les variables biologiques (colonisation, consommation, croissance et reproduction) ont été évaluées à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson. Le degré de préférence alimentaire a été défini par la supériorité statistique d'un déchet en termes de taux de colonisation et de biomasse ingérée.

Les analyses ont été effectuées sous le logiciel R (v.4.2.0) (R Core Team, 2022), avec un seuil de significativité fixé à $\alpha = 0,05$.

3. Résultats

3.1. Taux de colonisation des déchets

L'évaluation des préférences par les tests d'évitement (figure 6.5) indique une attraction contrastée des vers de terre pour les différents déchets. Le taux moyen de colonisation le plus élevé a été observé pour les déchets de canne à sucre (DCS : $0,32 \pm 0,15$), suivi par les fibres de palmier à huile (DPH : $0,23 \pm 0,18$). À l'inverse, la paille de riz (PR), les balles de riz (BR) et les déchets de bananes (DB) présentent des taux de colonisation très faibles, tandis que le contenu ruménal (CR) se situe à un niveau intermédiaire.

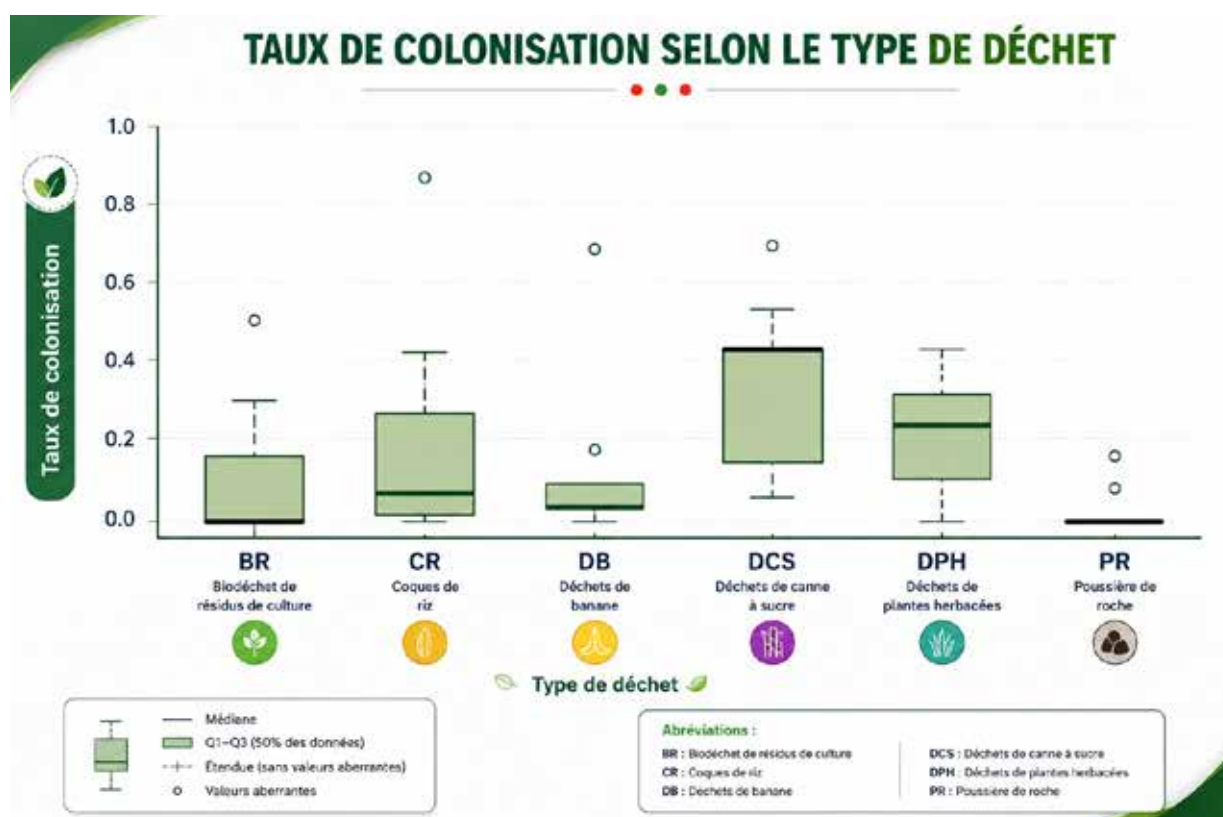


Figure 6.5. Boîtes à moustaches du taux de colonisation des déchets.

Le test de Bartlett a révélé une hétérogénéité des variances ($\chi^2 = 25,87$; ddl = 5 ; $p < 0,001$), justifiant le recours à des tests non paramétriques. L'ANOVA de Kruskal-Wallis confirme un effet significatif du type de déchet sur la colonisation ($\chi^2 = 33,69$; ddl = 5 ; $p < 0,001$). Les comparaisons multiples (correction de Bonferroni) précisent que ces différences sont portées par les écarts significatifs entre le DCS et les substrats PR, BR et DB (Tableau 6.2).

Tableau 6.2



Comparaisons multiples

des rangs des taux de colonisation entre déchets pris deux à deux.

Comparaisons	Statistique	P-value	P-value ajustée
BR versus CR	1,33	0,184	0,858
BR versus DB	0,548	0,584	0,943
BR versus DCS	3,7	<0,001*	0,003*
BR versus DPH	2,33	0,020	0,177
BR versus PR	-1,55	0,122	0,731
CR versus DB	-0,779	0,436	0,943
CR versus DCS	2,37	0,018*	0,176
CR versus DPH	1,01	0,314	0,943
CR versus PR	-2,87	0,004*	0,044*
DB versus DCS	3,15	0,002	0,019
DB versus DPH	1,79	0,074	0,520
DB versus PR	-2,1	0,036*	0,289
DCS versus DPH	-1,37	0,172	0,858
DCS versus PR	-5,25	<0,001*	<0,001*
DPH versus PR	-3,88	<0,001*	0,001*

(*): significatif

3.2. Masse de déchets consommée

Les mesures de consommation montrent que le CR, le DPH et le DCS ont été les substrats les plus ingérés, avec des moyennes respectives de $1,53 \pm 0,36$ g, $1,53 \pm 0,44$ g et $1,52 \pm 0,72$ g (Figure 6.6). Bien que le test de Bartlett indique une hétérogénéité des variances ($\chi^2 = 23,18$; $p < 0,001$), le test de Kruskal-Wallis ne révèle pas d'effet statistiquement significatif du type de déchet sur la masse totale consommée ($\chi^2 = 10,83$; ddl = 5 ; $p = 0,055$).

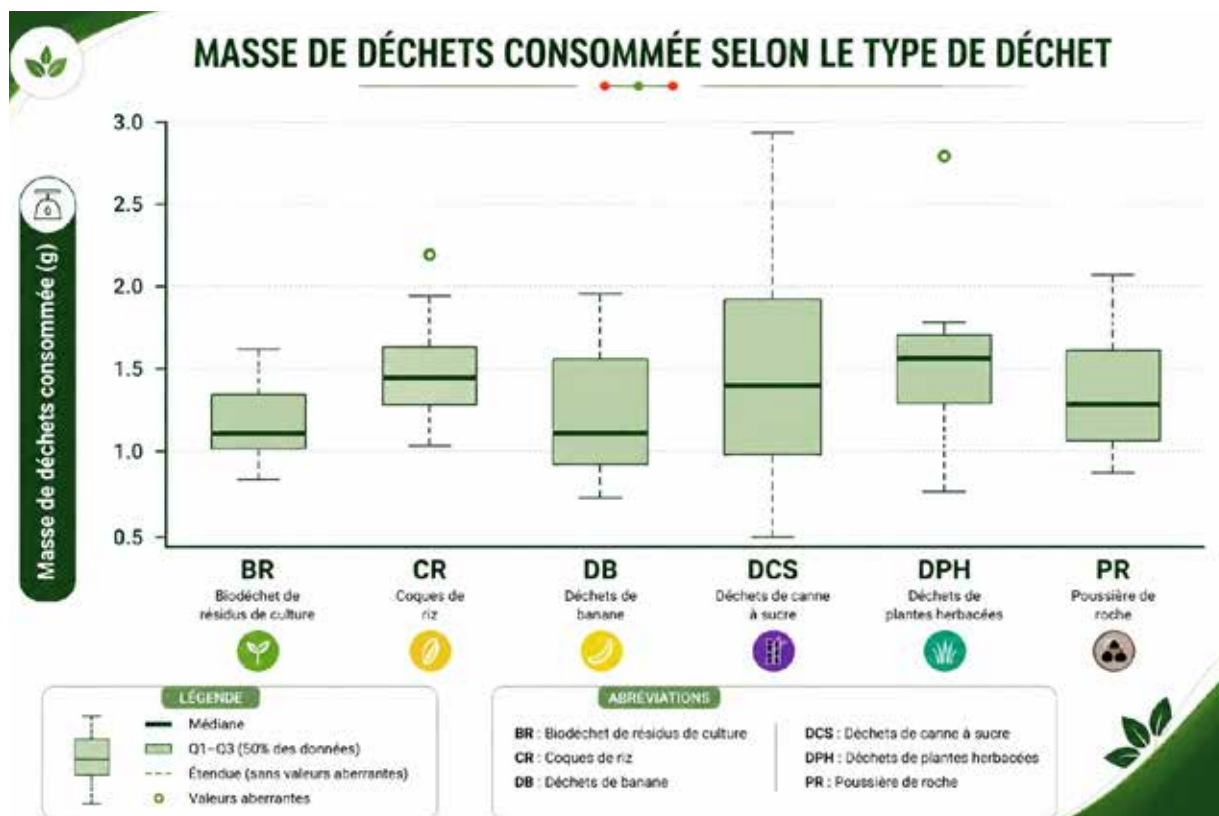


Figure 6.6. Boîte à moustaches comparant la masse consommée selon le type de déchet. Les barres d'erreur représentent l'écart-type

3.3. Croissance et performances pondérales

Après six semaines de vermiculture, le rapport entre la masse finale et la masse initiale (MVTF/MVTI) varie significativement selon le substrat (figure 6.7, tableau 6.3). Les meilleures performances de croissance ont été enregistrées sur le DCS ($1,17 \pm 0,26$), tandis que le CR induisait une perte de masse relative (Figure 6.7).

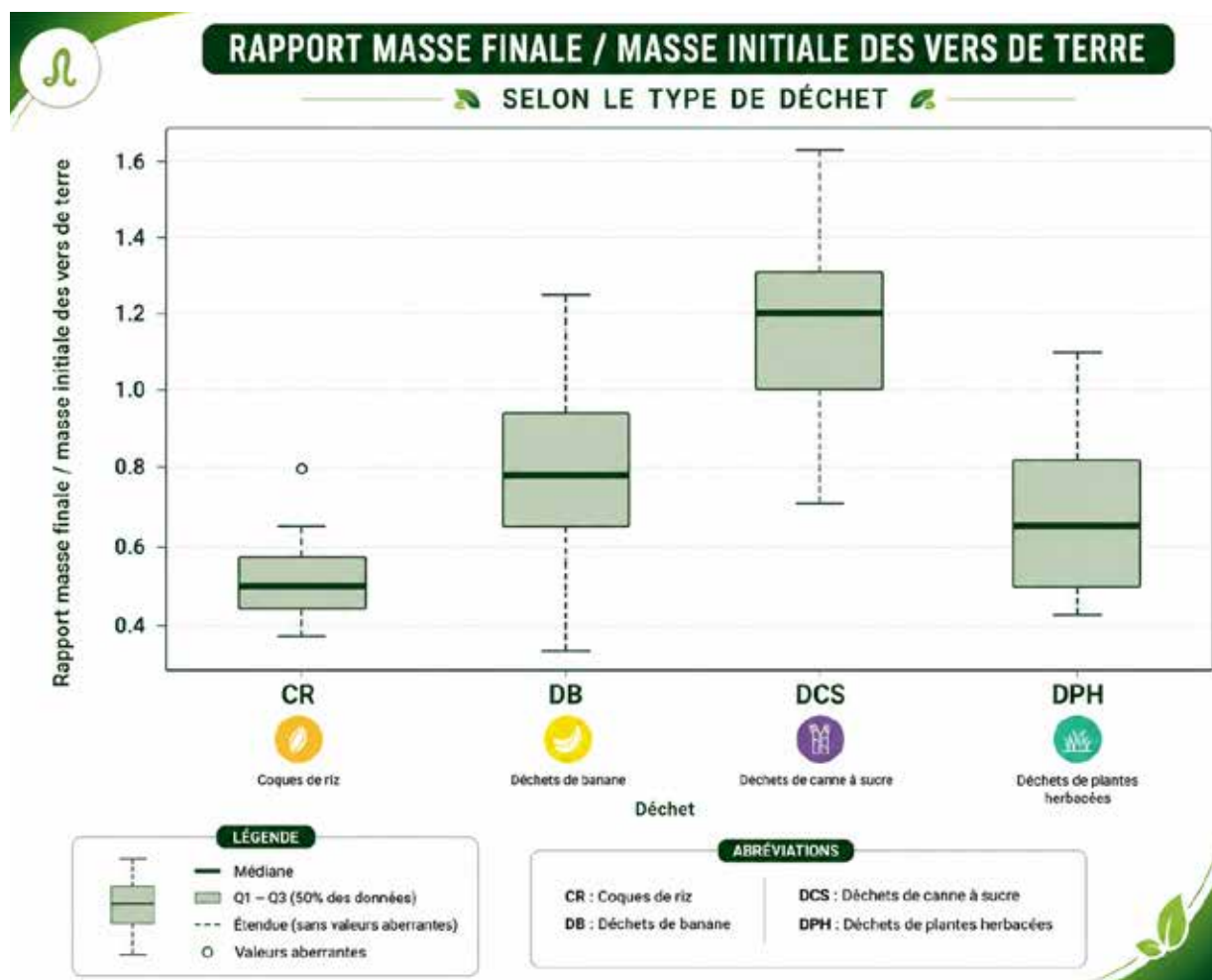


Figure 6.7. Boîte à moustaches du rapport entre la masse finale et la masse initiale des vers de terre selon le type de déchet.

L'analyse de Kruskal-Wallis confirme un effet hautement significatif du substrat sur la croissance ($\chi^2 = 31,46$; ddl = 3 ; $p < 0,001$). Les tests post-hoc soulignent la supériorité marquée du DCS par rapport au CR ($p < 0,001$) et au DPH ($p = 0,001$) (Tableau 6.3).

Tableau 6.3

Comparaisons multiples

du rapport entre la masse finale et la masse initiale des vers de terre

Paire de déchets	Statistique	P-value	P-value ajustée
CR - DB	2,54	0,011	0,033
CR - DCS	5,5	<0,001	<0,001
CR - DPH	1,81	0,070	0,141
DB - DCS	2,96	0,003	0,012
DB - DPH	-0,732	0,464	0,464
DCS - DPH	-3,69	<0,001	0,001

3.4. Corrélations entre variables biologiques

La matrice de corrélation de Pearson (Tableau 4) met en évidence des relations positives entre plusieurs variables clés :

- (i) Colonisation et masse corporelle ($r = 0,38$; $p = 0,002$) : les substrats les plus colonisés initialement favorisent une meilleure croissance à long terme.
- (ii) Masse corporelle et reproduction ($r = 0,43$; $p = 0,001$) : il existe un lien fort entre le gain de poids des adultes et le nombre de juvéniles produits.
- (iii) Colonisation et reproduction ($r = 0,25$; $p = 0,024$) : la préférence initiale est un indicateur significatif du succès reproducteur.

Tableau 6.4. Matrice de corrélation montrant les coefficients de Pearson entre paires de variables biologiques. Les p-values sont entre parenthèses.

	Colonisation	Consommation	Masse corporelle	Juvéniles par adulte
Colonisation	1,00			
Consommation	0,22 (0,087)	1,00		
Masse corporelle	0,38 (0,002)	-0,09 (0,507)	1,00	
Juvéniles/adulte	0,25 (0,024)	0,09 (0,482)	0,43 (0,001)	1,00

4. Discussion

Les résultats de cette étude démontrent que le ver de terre épigé *E. eugeniae* manifeste une sélectivité alimentaire marquée, laquelle influence directement sa croissance et son potentiel reproducteur. Cette interdépendance souligne l'importance de la qualité nutritionnelle du substrat dans l'optimisation des systèmes de vermicompostage tropicaux.

4.1. Hiérarchie des préférences et mécanismes de colonisation

La forte attraction pour le déchet de canne à sucre (DCS) et les fibres de palmier à huile (DPH) corrobore les observations de Suthar (2009), qui souligne que les vers de terre privilégient les substrats ayant subi une phase de pré-compostage adéquate, augmentant ainsi leur palatabilité. Dans le cas du DCS, la présence de sucres résiduels et d'une biomasse microbienne riche agit comme un puissant stimulant chimio-sensoriel. À l'inverse, l'évitement de la paille de riz (PR) et des balles de riz (BR) s'explique par leur nature récalcitrante. Comme le notent Kaviraj & Sharma (2003), les matériaux à haute teneur en lignine et en silice sont physiquement difficiles à ingérer et chimiquement pauvres en nutriments extractibles, induisant un comportement de fuite.

Le contenu ruménal (CR), bien que riche en matière organique, a présenté une colonisation intermédiaire. Cette réserve pourrait être liée à son pH initial acide (4,73), une valeur proche du seuil critique pour *E. eugeniae*. Edwards et al. (2011) ont en effet démontré que cette espèce préfère des milieux dont le pH oscille entre 5 et 8, et que toute acidité excessive peut inhiber la colonisation initiale.

4.2. Efficacité de conversion et performances pondérales

Un point crucial de nos résultats est que la masse consommée ne varie pas significativement entre les substrats ($p = 0,055$), alors que la croissance, elle, est contrastée. Cela suggère que la consommation chez *E. eugeniae* est régie par un besoin de remplissage du tube digestif, mais que l'assimilation dépend strictement de la qualité du déchet.

La supériorité du DCS pour la croissance ($1,17 \pm 0,26$) s'aligne sur les travaux de Parthasarathi et al. (2014), qui ont montré que les sous-produits de canne à sucre, notamment l'écume de sucrerie sont des substrats

d'excellence pour *E. eugeniae*, favorisant un gain de biomasse rapide grâce à un rapport C/N équilibré. À l'opposé, la perte de masse sur le CR malgré une consommation élevée indique une faible efficacité de conversion, probablement due à une dépense métabolique accrue pour compenser le stress lié à l'acidité ou à la faible densité nutritive du substrat (Aira et al., 2007).

4.3. Corrélation entre traits de vie : de la préférence à la reproduction

La corrélation positive observée entre la colonisation et la masse corporelle ($r = 0,38$) confirme que le test d'évitement est un outil prédictif fiable des performances biologiques à long terme (AFNOR, 2008). Plus significatif encore, le lien entre la masse des adultes et la production de juvéniles ($r = 0,43$) valide l'hypothèse de Dominguez & Edwards (2011): chez les vers de terre épigés, la fécondité est une fonction directe de l'état énergétique de l'individu. Un substrat de haute qualité comme le DCS permet non seulement une croissance optimale mais garantit également la pérennité de la population par une reproduction accrue.

Pour le contexte burundais, ensemble ces résultats suggèrent que la valorisation des déchets de canne à sucre par vermicompostage est hautement prometteuse. Cependant, pour les résidus de riz (PR, BR), une stratégie de co-vermicompostage est indispensable. L'incorporation de substrats attractifs comme le DCS ou l'amendement avec de la chaux pour neutraliser l'acidité du contenu ruménal pourrait lever les barrières d'évitement et transformer ces déchets "rejetés" en amendements organiques de qualité.

Conclusion et leçons pratiques

La présente étude a permis de caractériser les interactions entre les préférences alimentaires et les performances biologiques d'*Eudrilus eugeniae* sur une gamme de déchets agro-industriels tropicaux trouvés au Burundi. Les résultats mettent en évidence un continuum fonctionnel structurant chez *Eudrilus eugeniae*, reliant de manière causale les préférences alimentaires aux performances biologiques. Les résultats permettent de proposer le modèle intégratif du fonctionnement trophique en vermicompostage suivant :

Préférence alimentaire → Colonisation selon les préférences → Meilleure croissance → Meilleure reproduction

Dans ce modèle, la préférence alimentaire agit comme un filtre écologique initial, orientant la colonisation des substrats. Cette colonisation conditionne l'accès aux ressources et influence la croissance, laquelle détermine à son tour le succès reproducteur via le statut énergétique des individus. Ainsi, la préférence comportementale apparaît comme un prédicteur robuste de la performance globale.

L'absence de variation significative de la consommation confirme que l'efficacité d'assimilation, et non l'ingestion, gouverne la croissance et la reproduction. Dans ce cadre, le déchet de canne à sucre (DCS) se distingue comme un substrat optimal, tandis que les résidus de riz restent limitants sans transformation préalable.

Ces résultats ont des implications directes pour le développement du vermicompostage et des vermi-technologies associées :

- Optimisation des substrats : privilégier des déchets à forte attractivité et haute efficacité de conversion (ex. DCS).
- Outils de diagnostic rapide : utiliser les tests de préférence (évitement) pour prédire les performances biologiques avant mise en production.
- Co-vermicompostage stratégique : associer substrats récalcitrants (PR, BR) à des substrats attractifs pour améliorer colonisation et valorisation.
- Prétraitements adaptés : renforcer le pré-compostage et ajuster les paramètres chimiques (pH, C/N) pour lever les contraintes biologiques.
- Conception de systèmes intégrés : intégrer ces principes dans des dispositifs de gestion des déchets, de production d'amendements organiques et de restauration des sols, notamment en contexte tropical.

Les recherches futures devront approfondir les mécanismes microbiens et biochimiques à l'origine des préférences alimentaires, et développer des modèles prédictifs intégrés permettant d'optimiser à grande échelle les systèmes de vermicompostage et leur couplage avec d'autres technologies biologiques.

Bibliographie

AFNOR. (2008). Qualité du sol – Effets des polluants sur les vers de terre – Partie 3 : Guide pour la détermination des effets sur la reproduction de l'espèce *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei* (NF EN ISO 11268-3).

Aira, M., Monroy, F., & Domínguez, J. (2007). *Eisenia fetida* (Oligochaeta, Lumbricidae) modifies the structure and physiological capabilities of microbial communities improving carbon mineralization during vermicomposting of pig slurry. *Microbial Ecology*, 54(3), 462-471.

Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Atiyeh, R., & Metzger, J. D. (2004). Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresource Technology*, 93(2), 139-144.

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

Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Jolivet, C., & Rumpel, C. (2015). Why is the influence of earthworms on soil structure highly variable? A review. *Functional Ecology*, 29(3), 327-337.

Brown, G. G., Barois, I., & Lavelle, P. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic biota. *Biology and Fertility of Soils*, 32(4), 316-324.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In *Vermiculture Technology* (pp. 27-40). CRC Press.

Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandón, M. (2019). Vermicomposting: Earthworms enhance the process of organic waste recycling by modifying microbial communities. In *Microorganisms in Sustainable Agriculture and Biotechnology* (pp. 93-113). Springer.

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

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (2011). *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press.

Forbes, J. M. (2007). *Voluntary Food Intake and Diet Selection in Farm Animals*. CABI Publishing.

Jouquet, P., Blanchart, E., & Capowiez, Y. (2014). Utilization of earthworms in soil restoration. *Applied Soil Ecology*, 84, 1-13.

Kaviraj, & Sharma, S. (2003). Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms. *Bioresource Technology*, 90(2), 169-173.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development Series. World Bank.

Kinberg, J. G. H. (1867). *Annulata nova. Öfversigt af Kongl. Vetenskaps-Akademiens Förhandlingar*, 23(9), 337-357.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., ... & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4), 159-193.

Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: impact on plant growth and soil fertility. *Soil Nutrients*, 211-234.

- Loh, N. W., Miller, M. S., Abbott, L. K., & Murphy, D. V. (2005). Earthworm populations and their activity in relation to agricultural practices and soil properties. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 1-10.
- Maboeta, M. S., & Van Rensburg, L. (2003). Vermicomposting of industrially produced woodchips and sewage sludge utilizing *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(2), 265-270.
- Mignon-Grasteau, S., Boissy, A., Bouix, J., Faure, J. M., Guémené, D., Lamy, H., ... & Beaumont, C. (2005). Genetics of adaptation and domestication in livestock. *Livestock Production Science*, 93(1), 3-14.
- Parthasarathi, K., Balamurugan, M., & Ranganathan, L. S. (2014). Influence of sugar industrial wastes on the reproduction and nutrient enrichment role of the earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Journal of Environmental Biology*, 35, 1-7.
- Provenza, F. D. (1995). Postingestive feedback as an elementary determinant of food selection and intake in ruminants. *Journal of Range Management*, 2-17.
- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Sih, A., Crowley, P., McPeck, M., Petranka, J., & Strohmeier, K. (1985). Predation, competition, and prey communities: A review of field experiments. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16, 269-311.
- Sinha, R. K., Hahn, G., Singh, R. K., Suhane, R. K., & Anthony, S. (2010). Vermiculture technology: reviving the dreams of Sir Charles Darwin for scientific agricultural production. *Agricultural Sciences*, 1(3), 155-173.
- Suthar, S. (2009). Vermicomposting of vegetable-market solid waste using *Eisenia fetida*: Impact of methods on plant growth promoting liquids and vermicompost quality. *The Environmentalist*, 29(3), 309-320.



Effets du vermicompost sur la croissance, la productivité et la composition nutritionnelle du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sol très acides et dégradé



Emery Cadeau Nitegeka¹, Longin Baranyizigiye¹, Inès Mugisha¹, Valence Ndayisemga¹, Samuel Kwizerimana², Eric Gilbert Kazitsa³, Rachelle Buhintahe³, Emmanuel Barankanira³, Oscar Nduwimana⁴



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie, Centre de Recherche en Agriculture et en Développement Rural (CERADER)



2École Normale Supérieure du Burundi, Département des Sciences Naturelles, Centre de Recherche en Sciences et de Perfectionnement Professionnel (CReSP)



Société de Valorisation de l'Espace Rural et de Transformation (SOVERT)



International Fertilizer Development Center (IFDC), Projet d'Appui à une Gestion Responsable et Intégrée des Sols (PAGRIS)

* Pour correspondance : email : kazitsae@yahoo.fr



Résumé

La dégradation de la fertilité et l'acidification des sols ferrallitiques constituent une contrainte majeure à la production du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) au Burundi. Dans ce contexte, le vermicompost apparaît comme une alternative prometteuse aux engrais minéraux, mais son efficacité reste dépendante des conditions locales et des doses appliquées.

Cette étude a évalué, en conditions de champ à Ngozi, l'effet de deux doses de vermicompost (140 et 210 g par poquet) sur la croissance, la productivité et la qualité biochimique des graines de la variété MAC44.

Un dispositif en blocs complets randomisés avec quatre répétitions a été utilisé, incluant un témoin non fertilisé et un traitement à fertilisation minérale (DAP-K-Cl-urée).

Les résultats montrent que les traitements influencent significativement l'ensemble des paramètres agronomiques mesurés (ANOVA, $p < 0,05$). La dose la plus élevée de vermicompost (210 g/poquet) a conduit aux meilleures performances en termes de croissance végétative et de rendement, avec une augmentation marquée du nombre de gousses et de la masse de graines par plant. Cependant, si ces résultats suggèrent une amélioration de la disponibilité des nutriments et des conditions de croissance, les mécanismes sous-jacents (effets nutritionnels vs biostimulation) ne peuvent être formellement distingués dans le cadre de cette étude.

Les analyses de corrélation et de régression indiquent que la hauteur des plants, le nombre de feuilles et le nombre de fleurs sont fortement associés au rendement, traduisant une étroite relation entre développement végétatif et production. Sur le plan qualitatif, le vermicompost n'a pas modifié significativement la teneur en protéines, mais a entraîné une augmentation des sucres totaux, suggérant une modification du métabolisme carboné sans que ses implications nutritionnelles puissent être entièrement établies.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment le potentiel du vermicompost pour améliorer la productivité du haricot en sols acides, tout en soulignant la nécessité d'études complémentaires pour préciser ses effets à long terme et ses mécanismes d'action.

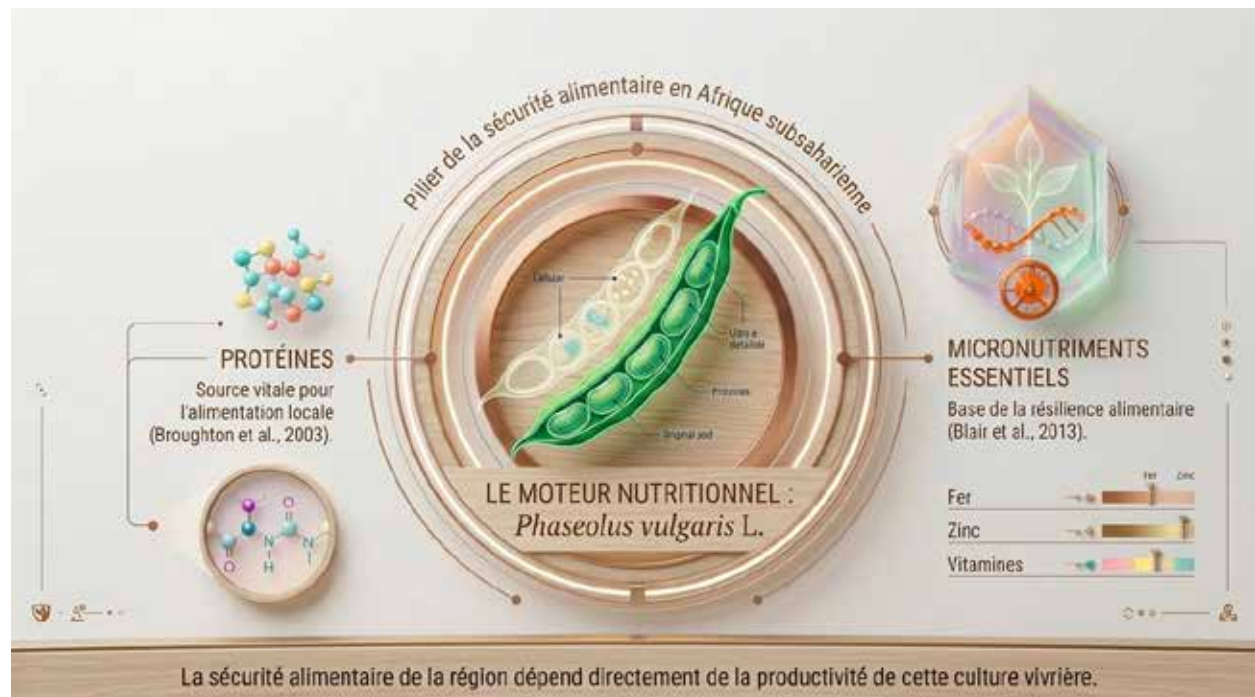
Mots-clés

Phaseolus vulgaris, vermicompost, sols acides, croissance, productivité, qualité des graines, Burundi.

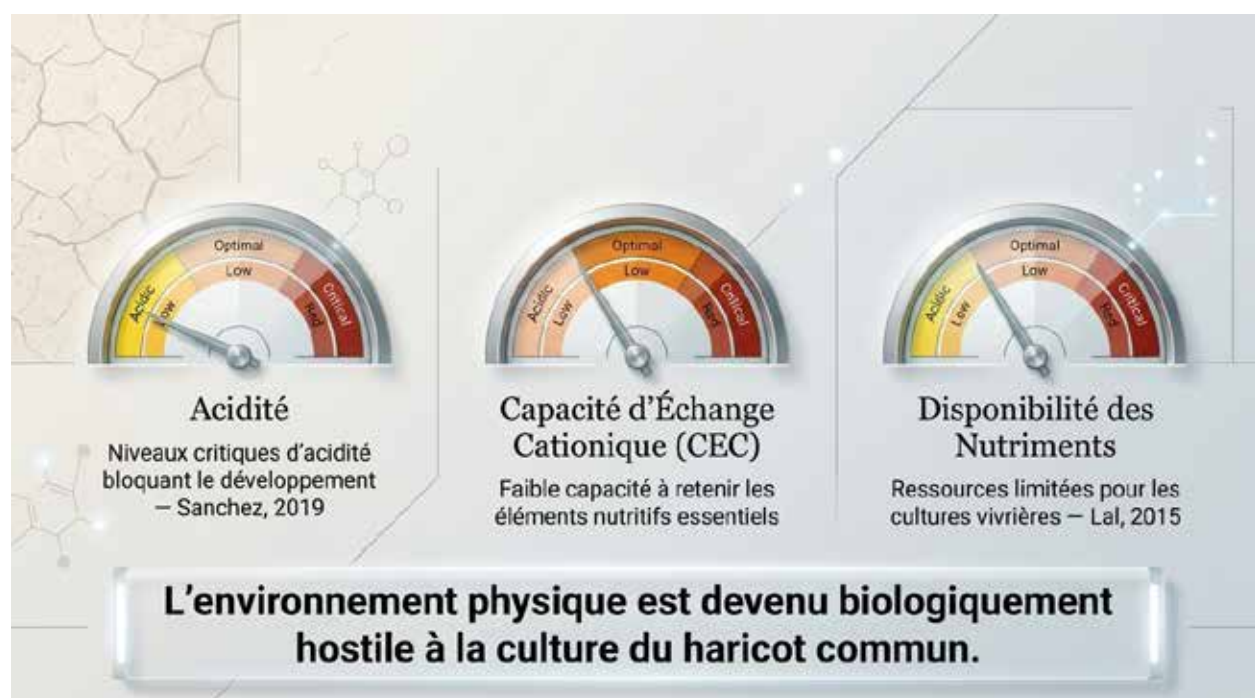


1. Introduction

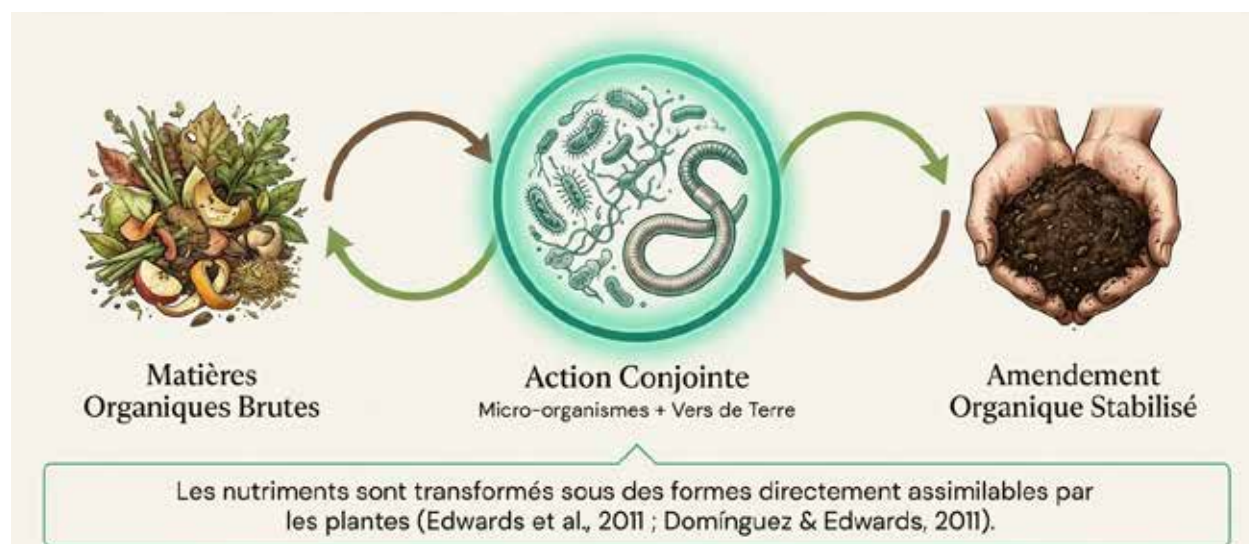
La sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne repose en grande partie sur la productivité des cultures vivrières, parmi lesquelles le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) occupe une place centrale en raison de sa richesse en protéines et en micronutriments essentiels (Broughton et al., 2003 ; Blair et al., 2013). Au Burundi, cette culture est toutefois fortement contrainte par la dégradation progressive des sols, en particulier des sols ferralitiques caractérisés par une acidité élevée, une faible capacité d'échange cationique et une disponibilité limitée en nutriments (Sanchez, 2019 ; Lal, 2015).



Pour pallier ces contraintes, l'usage d'engrais minéraux s'est généralisé. Bien que ces intrants permettent d'augmenter les rendements à court terme, leur utilisation continue peut contribuer à l'acidification des sols et à la perturbation des équilibres biogéochimiques, notamment par la lixiviation des nutriments et la réduction de l'activité biologique (Guo et al., 2010 ; Sharma & Garg, 2018). À long terme, ces dynamiques peuvent compromettre la durabilité des systèmes de production (Tilman et al., 2002), ce qui justifie l'exploration d'alternatives adaptées aux contextes tropicaux.



Parmi celles-ci, le vermicompost suscite un intérêt croissant. Issu de la transformation des matières organiques par l'action conjointe des micro-organismes et des vers de terre, il constitue un amendement organique stabilisé contenant des nutriments sous des formes généralement assimilables par les plantes (Edwards et al., 2011 ; Domínguez & Edwards, 2011). Plusieurs travaux ont montré qu'il peut améliorer certaines propriétés du sol, telles que la structure, la capacité de rétention en eau ou encore l'activité microbienne (Arancon et al., 2004 ; Lazcano & Domínguez, 2011). D'autres études suggèrent également des effets sur la croissance des plantes, potentiellement liés à la présence de composés organiques bioactifs, bien que l'importance relative de ces effets par rapport à la simple fourniture de nutriments reste discutée (Blouin et al., 2019 ; Canellas et al., 2015).



Les effets du vermicompost sur les cultures légumineuses ont été rapportés dans divers contextes agroécologiques, avec des augmentations de la croissance et du rendement (Yadav et al., 2019 ; Mahmoud & Gad, 2020 ; Singh et al., 2008). Toutefois, ces réponses apparaissent variables selon les conditions pédoclimatiques, les doses appliquées et les variétés cultivées (Lazcano et al., 2010). En particulier, les données restent limitées pour les sols ferrallitiques acides d'Afrique de l'Est, où les contraintes chimiques et biologiques sont spécifiques.

Dans ce contexte, la variété MAC44, développée pour les conditions locales burundaises, constitue un matériel d'étude pertinent. Cependant, les informations disponibles concernant l'optimisation de la fertilisation organique pour cette variété, notamment à base de vermicompost, demeurent insuffisantes, en particulier en ce qui concerne les relations entre croissance végétative, rendement et qualité des graines.

La présente étude vise ainsi à évaluer, en conditions de champ, l'effet de deux doses de vermicompost sur les performances agronomiques du haricot commun dans un sol ferrallitique acide de la région de Ngozi. Elle s'intéresse plus spécifiquement (i) aux paramètres de croissance végétative, (ii) aux composantes du rendement et (iii) à certains indicateurs de qualité biochimique des graines. Par ailleurs, une analyse des relations entre ces variables est réalisée afin d'identifier les principaux déterminants du rendement dans ces conditions.

En adoptant cette approche, ce travail cherche à mieux situer le potentiel du vermicompost dans les stratégies d'intensification écologique, tout en apportant des éléments de discussion sur ses limites et les conditions de son efficacité dans les agroécosystèmes tropicaux (Lal, 2015 ; FAO, 2021).

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'expérimentation et conditions environnementales

L'étude a été conduite au champ d'expérimentation du Centre de Recherche en Agriculture et en Développement Rural (CERADER) de l'Université de Ngozi, Burundi (2°39'19" S, 29°37'57" E). La région de Ngozi est caractérisée par des sols ferralitiques acides, représentatifs des plateaux centraux du Burundi (MINAGRIE, 2022). Un échantillon composite du sol (0-20 cm) a été analysé à l'ISABU, révélant un pH-H₂O de 5,36 ($\pm 0,05$) et une faible teneur en azote total (0,066 %), confirmant l'acidité élevée et la pauvreté nutritionnelle du site expérimental (tableau 7.1).

2.2. Matériel biologique et amendements

Le matériel végétal utilisé est la variété de haricot volubile MAC44 (nom local : Magorori), sélectionnée pour sa robustesse (figure 1), richesse en micronutriments et sa large diffusion par l'ISABU depuis 2013.



Figure 7.1. Photographie d'échantillons de haricots de la variété MAC44 utilisés

Le vermicompost a été obtenu produit par bio-oxydation d'un mélange de résidus de bananes à bière ((25% v/v pédoncules + 75% pelures de bananes) avec du fumier de vache (25%) via l'action du ver de terre épigé *Eudrilus* sp. En système de vermicompostage en bacs à flux continu (figure 7.2). Avant utilisation, le vermicompost avait préalablement tamisé (2mm) et sa composition physico-chimique analysée (tableau 7.1). Il présentait un pH de 8, un rapport C/N de 7,17 et une richesse notable en phosphore (1,26 % P₂O₅) et potassium (0,971 % K₂O) (Tableau 7.1).



Figure 7.2. Vermicompost mature dans un bac de vermicompostage à flux continu à l'Université de Ngozi

Tableau 7.1



Composition physico-chimique

du sol expérimental et teneur en nutriments et éléments traces métalliques du vermicompost à base de déchets de bananes à bière utilisés

Sol expérimental	
Paramètres et unités	Valeur
pH eau	5,36
CE (µS/Cm)	35,8
Azote total (%N)	0,066
Carbone organique (%C)	1,72
Phosphore assimilable (mg/kg)	4,48
Ca échangeable (méq/100g)	2,38
Mg échangeable (méq/100g)	0,466
K échangeable (méq/100g)	0,382
Na échangeable (méq/100g)	≤ 0,01
CEC (méq/100g)	11,9
Cu échangeable (méq/100g)	2,23
Zn échangeable (méq/100g)	1,79
Mn échangeable (méq/100g)	9,33
Acidité éch. (méq/100g) A-Al ³⁺	0,125
Acidité éch. (méq/100g) A-H ⁺	0,703
Acidité total	0,828

Vermicompost	
Paramètres et unités	Valeur
Azote total (%N)	1,16
Carbone organique (%C)	8,76
Rapport C/N	7,55
Phosphore tot. (%P ₂ O ₅)	1,88
Potassium (%K ₂ O)	0,871
Sodium (%Na ₂ O)	0,238
Calcium (%CaO)	1,52
Magnésium (%MgO)	0,596
Fer (%Fe)	0,469
Manganèse (%Mn)	0,099
Cuivre (mgCu/kg)	70,5
Zinc (mgZn/kg)	57,6
Cobalt (mgCo/kg)	<5
Nickel (mgNi/kg)	<2,5
Cadmium (mgCd/kg)	<0,8
Plomb (mgPb/kg)	6,77

2.3. Dispositif expérimental et traitements

L'essai a été mis en place selon un dispositif en blocs complets aléatoires (DBCA) avec quatre répétitions (figure 7.4). Chaque bloc comprenait quatre unités expérimentales de 1 m², correspondant aux traitements, séparées par des allées de 0,60 m et complètement randomisés (figure 7.3) :

- T0 : Témoin sans aucun apport de fertilisant.
- T1 : Apport de 140 g de vermicompost par poquet.
- T2 : Apport de 210 g de vermicompost par poquet.
- T3 : Engrais chimiques minéraux composés de DAP (18-46-0), de KCl (0-0-60) et d'urée (46-0-0), appliqués de manière fractionnée afin d'assurer un apport équilibré en N, P et K conformément aux recommandations agronomiques locales.

Le semis a été effectué en saison sèche le 14 septembre 2023, en poquets avec un écartement de 20 cm entre les poquets.

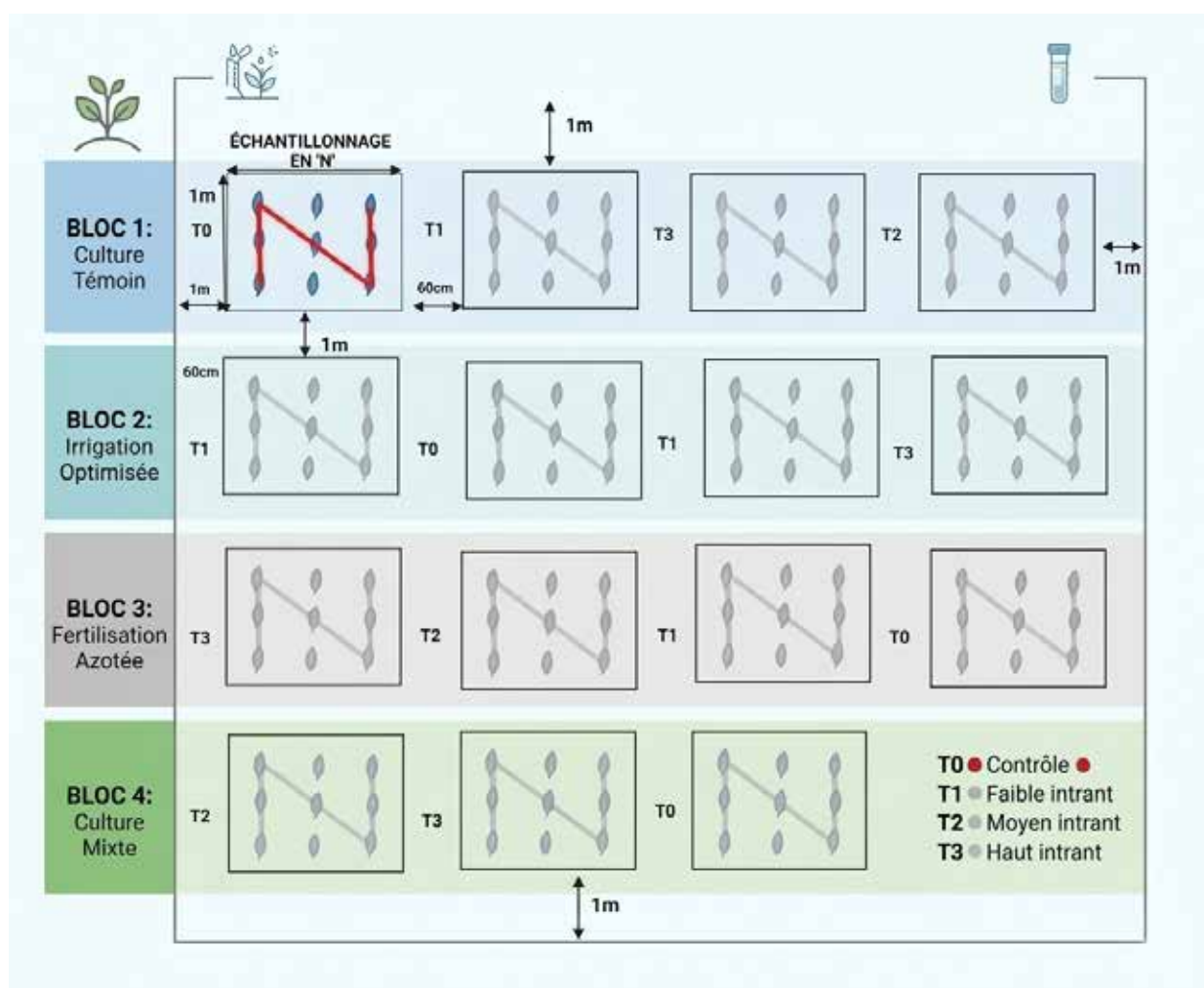


Figure 7.3. Diagramme décrivant le dispositif expérimental et le schéma d'échantillonnage en "N".

2.4. Collecte des données

Les paramètres de croissance ont été mesurés (figure 7.4) sur un échantillon de 112 plantes (choisies selon la méthode "N") (figure 7.3). La hauteur, le nombre de feuilles, de fleurs et de bourgeons ont été relevés périodiquement (au jour 20 et jour 52). La productivité a été déterminée par pesée des graines à 12 % d'humidité après la récolte.



Figure 7.5. Photographie montrant la mesure de la hauteur, après tuteurage dans le champ expérimental. Remarque la différence de taille entre plants.

2.5. Analyses nutritionnelles et statistiques

La teneur en sucres totaux a été déterminée par la méthode de Luff-Schoorl, impliquant la transformation des sucres en réducteurs et un dosage iodométrique. Le dosage des protéines a suivi la méthode de référence AOAC. Le traitement statistique des données a été réalisé sous le logiciel R (version 4.1.2). Une analyse de la variance (ANOVA) à un critère de classification a été appliquée, suivie de comparaisons multiples de moyennes. Un modèle de régression linéaire multiple a été utilisé pour identifier les composantes de croissance influençant significativement la productivité.

3. Résultats

3.1. Croissance végétative

L'analyse exploratoire (Tableau 7.2) montre que le nombre moyen de feuilles le plus élevé a été observé pour le traitement T2 ($28 \pm 5,22$), suivi par les traitements T1 ($17 \pm 3,06$) et T3 ($17 \pm 3,13$). Le témoin (T0) présente la valeur la plus faible avec seulement $8 \pm 2,58$ feuilles (Tableau 2). Une tendance identique est observée pour le nombre de bourgeons, où T2 ($19 \pm 10,73$) surpasse significativement le traitement chimique T3 ($8 \pm 2,55$) et le témoin T0 ($2 \pm 1,74$).

Tableau 7.2



Synthèse des données

des paramètres de croissance végétative et de productivité du haricot au jour 52 (n = 36)

Paramètre	Statistique	T0 (Témoin)	T1 (VC 140g)	T2 (VC 210g)	T3 (engrais)
Hauteur (cm)	Moyenne ± EC	64,75 ± 31,99	108,93 ± 20,61	159,50 ± 19,88	121,79 ± 23,74
	(Min ; Max)	(10 ; 120)	(80 ; 140)	(120 ; 200)	(80 ; 170)
Feuilles (nb)	Moyenne ± EC	8 ± 2,58	17 ± 3,06	28 ± 5,22	17 ± 3,13
	(Min ; Max)	(4 ; 14)	(10 ; 22)	(18 ; 38)	(10 ; 22)
Bourgeons (nb)	Moyenne ± EC	2 ± 1,74	8 ± 4,78	19 ± 10,73	8 ± 2,55
	(Min ; Max)	(0 ; 6)	(2 ; 17)	(4 ; 37)	(4 ; 14)
Fleurs (nb)	Moyenne ± EC	3 ± 1,86	10 ± 4,03	22 ± 7,42	9 ± 3,21
	(Min ; Max)	(0 ; 8)	(3 ; 17)	(12 ; 40)	(4 ; 20)
Gousses/plant	Moyenne ± EC	1 ± 0,95	2 ± 1,93	5 ± 1,95	3 ± 2,4
	(Min ; Max)	(0 ; 3)	(0 ; 6)	(0 ; 8)	(0 ; 10)
Masse graines/plant	(Min ; Max)	(2,5 ; 50,2)	(20,2 ; 84,6)	(55,4 ; 145,8)	(2,9 ; 100)
	Moyenne ± EC	22,27 ± 14,01	59,91 ± 17,5	108,14 ± 22,6	63,3 ± 27,83

VC : Vermicompost ; EC : Écart-type

La hauteur moyenne des plants a varié de 64,75 cm (T0) à 159,50 cm (T2) (Figure 7.6). L'analyse de la variance (ANOVA) confirme un effet hautement significatif du fertilisant ($F=71,08$; $p < 0,001$) (Tableau 7.3).

Tableau 7.3



Résultats d'analyse

de la variance (ANOVA) pour la hauteur des plants

Source	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	Fobs	Ftab	P-value
Traitement	128 293	3	42 764	71,08	2,69	$< 2,0 \times 10^{-16}$
Résiduelle	64 981	108	602			
Totale	193 274	111	17 570,36			

Le test de comparaison multiple de Tukey (Tableau 7.4) montre que si T2 est significativement supérieur à tous les autres, il n'existe pas de différence significative entre le vermicompost à faible dose (T1) et l'engrais chimique (T3) ($p = 0,209$).

Tableau 7.4



Comparaisons multiples

de la hauteur moyenne (Test de Tukey)

Comparaison	Différence (cm)	IC à 95 %	P-value ajustée
T2 vs. T0	94,75	(77, 64 ; 111, 86)	$< 0,001$
T2 vs. T3	37,71	(20, 61 ; 54, 82)	$< 0,001$
T3 vs. T1	12,86	(-4, 25 ; 29, 96)	0,209

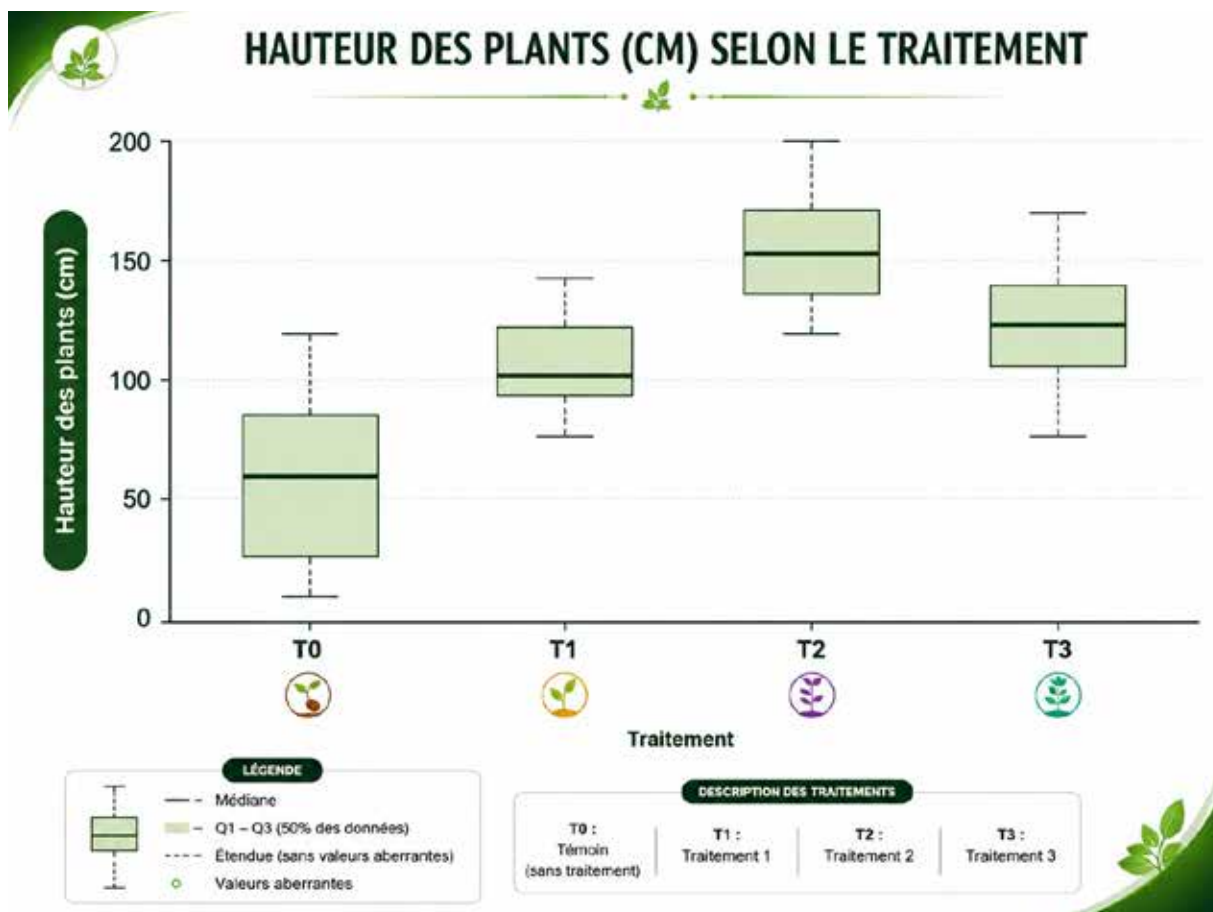


Figure 7.6 : Boîtes à moustaches de la hauteur des plants de haricot selon le traitement appliqué

Au 52ème jour, le nombre de fleurs est significativement impacté par le type d'amendement. Le traitement T2 a généré en moyenne $22 \pm 7,42$ fleurs par plant, soit plus du double du traitement chimique T3 ($9 \pm 3,21$). Le nombre de gousses formées suit cette logique de performance avec $5 \pm 1,95$ gousses pour T2 contre $1 \pm 0,95$ pour le témoin (Tableau 7.2).

3.2 Productivité

L'analyse exploratoire montre que la productivité en termes de masse des graines par plants a été fortement influencée par le régime nutritionnel (Tableau 7.2, figure 7.7). Avec une moyenne de 108,14 g par plant, le traitement à 210 g de vermicompost multiplie par près de 5 la productivité du témoin (22,27 g). Bien que l'engrais chimique (T3) améliore les résultats par rapport au témoin, il reste nettement moins performant que le vermicompost à dose optimale (T2), avec un rendement inférieur de 41,5 %.

L'écart-type du T2 (22,60) reste proportionnellement bas par rapport à sa moyenne élevée, ce qui indique une réponse homogène des plants à cette dose de vermicompost (Tableau 7.2).

L'ANOVA indique un effet traitement majeur ($F=77,38$; $p < 0,001$). Les tests de Tukey confirment que le traitement T2 (210g de VC) produit une biomasse de grains significativement supérieure à T3 (engrais) avec une différence moyenne de 44,84 g ($p < 0,001$). À l'inverse, la productivité entre T1 et T3 est statistiquement équivalente ($p = 0,935$).

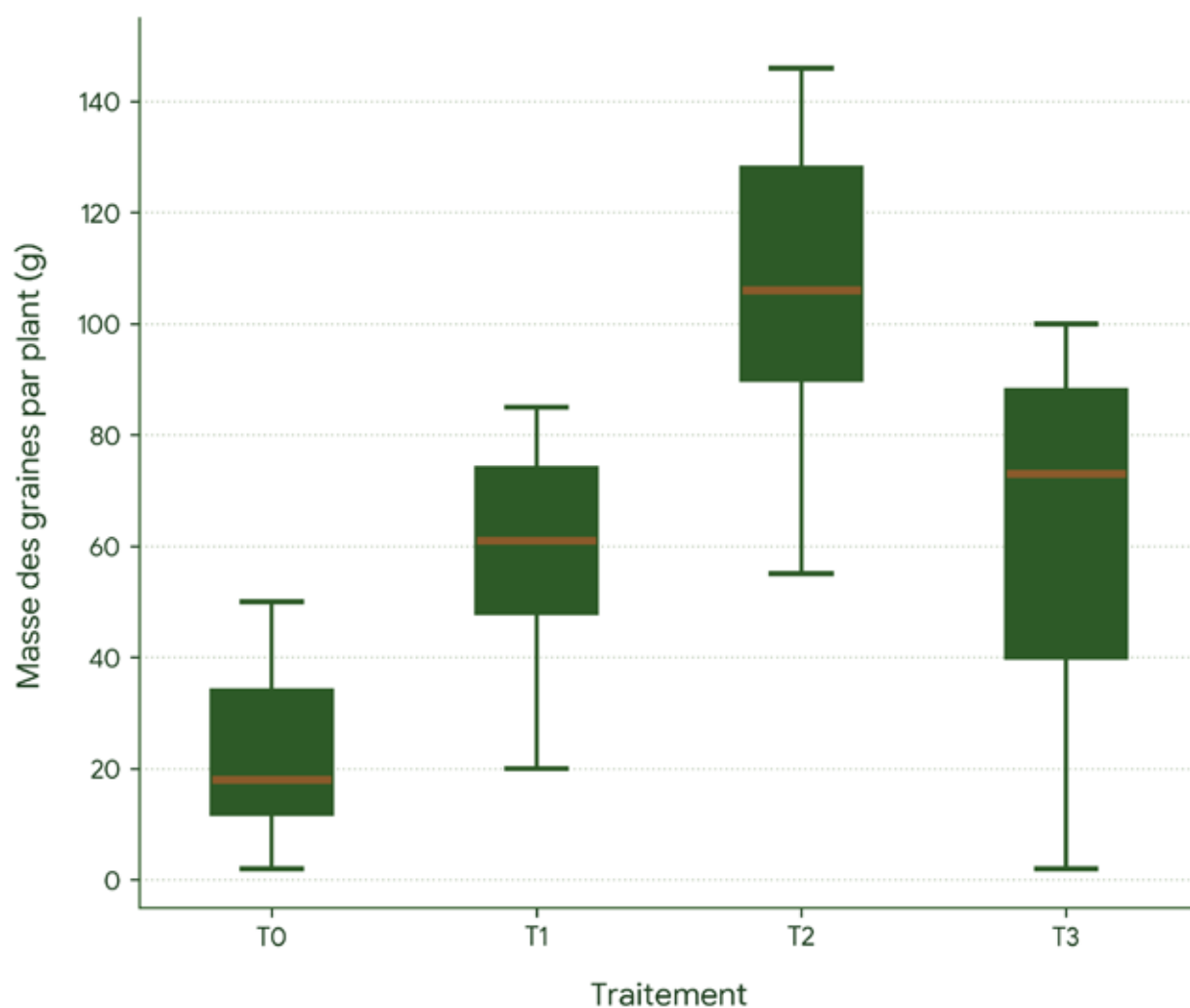


Figure 7.7. Boîtes à moustaches de la masse des graines par plant de haricot selon le traitement

3.3 Analyse de corrélation et modélisation prédictive

L'analyse de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (Tableau 7.5, figures 7.8 et 7.9) révèle que toutes les variables de croissance sont positivement et fortement corrélées à la productivité.

Tableau 7.5



Matrice de corrélation de Pearson entre les variables agronomiques

	Feuilles	Bourgeons	Fleurs	Gousses	Hauteur	Productivité
Feuilles	1,00	0,76*	0,87*	0,66*	0,83*	0,83*
Fleurs		1,00	0,89*	0,68*	0,82*	0,84*
Hauteur					1,00	0,83*

*p < 0,001 (hautement significatif)

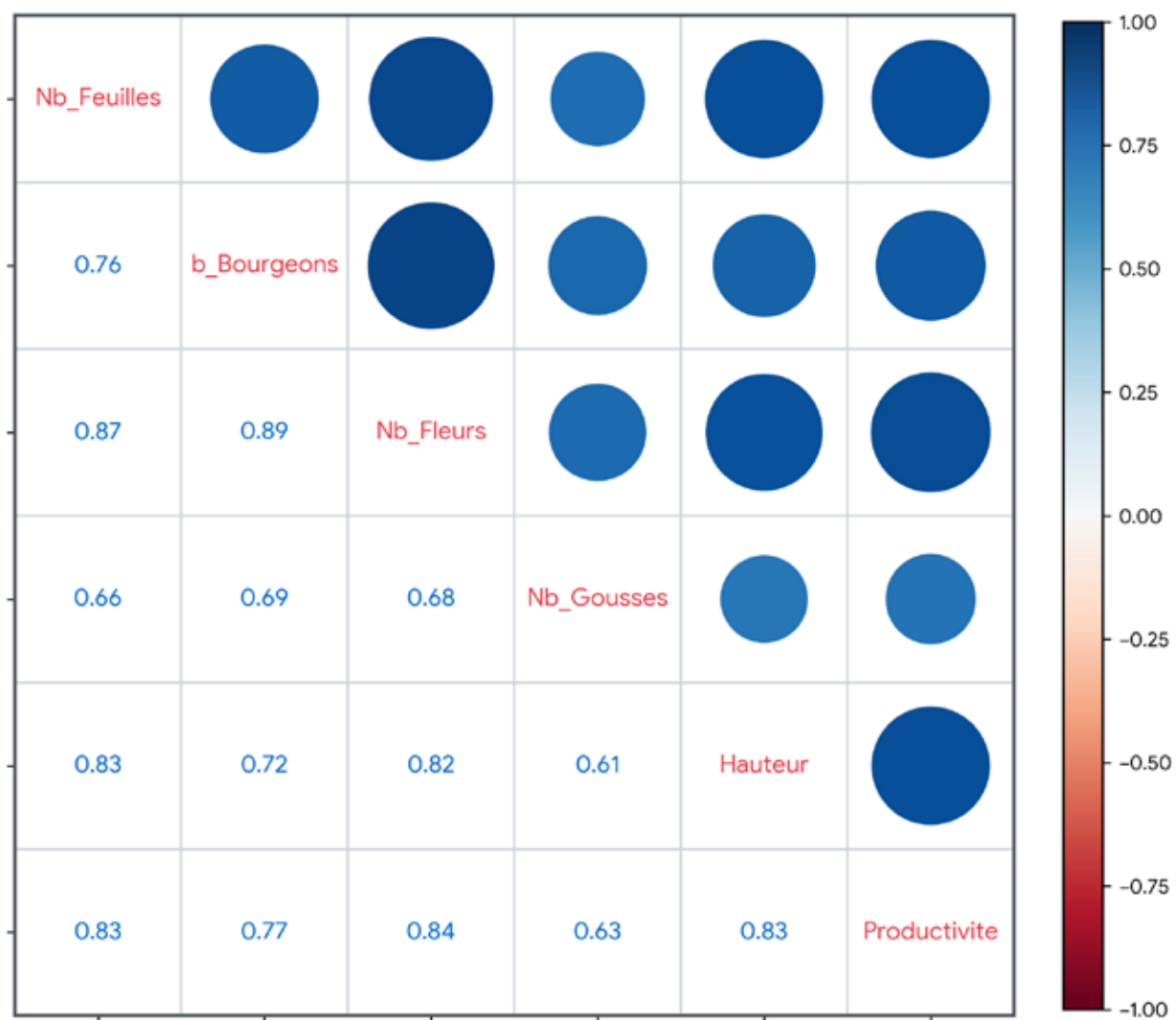


Figure 7.8. Graphique comparatif des coefficients de corrélation

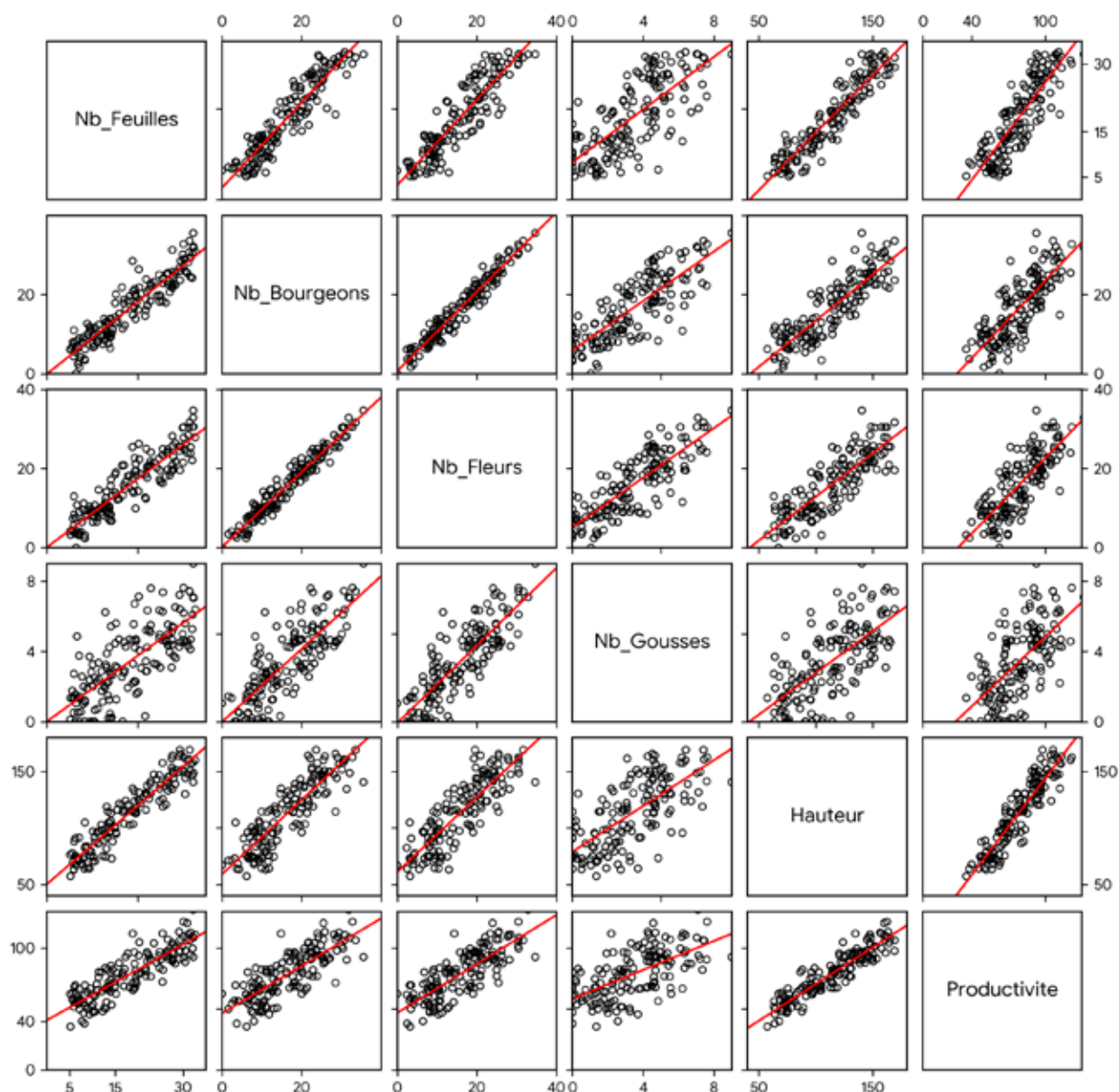


Figure 7.9. Matrice des nuages de points avec droites de régression

Une série de régressions linéaires simples a été réalisée pour évaluer l'influence individuelle de chaque paramètre de croissance sur la productivité du haricot (Tableau 7.6).

Tableau 7.6

Paramètres

des modèles de régression linéaire simple



Variables explicatives	Estimation (beta)	Erreur Standard	Statistique t	IC à 95 %	p-value
Nombre de feuilles	3,76	0,24	15,79	[3,29 ; 4,24]	< 0,001
Nombre de bourgeons	3,38	0,26	12,77	[2,85 ; 3,90]	< 0,001
Nombre de fleurs	3,68	0,23	15,93	[3,22 ; 4,14]	< 0,001
Nombre de gousses	9,97	1,17	8,53	[7,65 ; 12,29]	< 0,001
Hauteur du plant	0,73	0,05	15,32	[0,64 ; 0,83]	< 0,001

Toutes les variables testées présentent un effet hautement significatif ($p < 0,001$) et ont été retenues pour l'élaboration du modèle multiple. La comparaison par le critère d'information bayésien (CIB) montre que le modèle complet (CIB = 986,30) est statistiquement supérieur au modèle nul (CIB = 1135,14).

Le modèle initial incluant l'ensemble des variables a d'abord été estimé (Tableau 7.7).

Tableau 7.7



Résultats

du modèle de régression linéaire multiple (Complet)

Paramètre	Estimation	Erreur Standard	t	IC à 95 %	p-value
Nombre de feuilles	1,09	0,45	2,42	[0,20 ; 1,99]	0,017
Nombre de bourgeons	0,65	0,47	1,40	[-0,27 ; 1,58]	0,166
Nombre de fleurs	1,04	0,57	1,84	[-0,08 ; 2,16]	0,068
Nombre de gousses	0,50	1,04	0,48	[-1,57 ; 2,57]	0,631
Hauteur du plant	0,23	0,06	3,90	[0,11 ; 0,35]	< 0,001

Afin d'optimiser la parcimonie du modèle, une procédure de sélection descendante basée sur le BIC a été appliquée. Les variables « Nombre de gousses » ($p = 0,631$) et « Nombre de bourgeons » ($p = 0,111$) ont été exclues successivement, aboutissant au modèle saturé final (Tableau 7.8).

Le modèle de régression linéaire multiple optimal, après élimination des variables non significatives (bourgeons et gousses), explique 94,05% de la variabilité de la productivité ($R^2_{adj} = 0,9405$). Son équation est : **Productivité = 1,08 (Nombre de feuilles) + 1,73 (Nombre de fleurs) + 0,23 (Hauteur) + ϵ**

Tableau 7.8



Synthèse

du modèle de régression linéaire saturé final

Prédicteur	Estimation	Erreur Standard	t	IC à 95 %	P-value
Nombre de feuilles	1,08	0,45	2,41	[0,19 ; 1,97]	0,017
Nombre de fleurs	1,73	0,37	4,66	[0,99 ; 2,46]	$9,1 \times 10^{-16}$
Hauteur du plant	0,23	0,06	3,91	[0,11 ; 0,35]	0,0002

3.4 Teneurs des graines en sucres et protéines

Tous traitements ont conduit à une amélioration de la teneur en protéines des haricots par rapport au témoin (T0) (Tableau 7.9). Les valeurs les plus élevées ont été observées avec T1 (22,4 %) et T3 (22,2 %), suivies de T2 (21,7 %). Toutefois, les différences entre les traitements ne sont pas statistiquement significatives, suggérant que les types de fertilisation testés ont des effets comparables sur la teneur en protéines.

En ce qui concerne les sucres totaux, le traitement au vermicompost (T2) présente la valeur la plus élevée (2,65 %), nettement supérieure à celle du témoin (1,94 %). Les traitements T3 (2,30 %) et T1 (1,81 %) montrent respectivement une augmentation modérée et une légère diminution par rapport au témoin (Tableau 7.9). Ces résultats suggèrent que le vermicompost pourrait favoriser l'accumulation des sucres dans les grains de haricot, possiblement en améliorant la disponibilité des nutriments et l'activité biologique du sol.

Tableau 7.9



Teneur des graines de haricot en sucres et en protéines

Traitement	Protéines (%)	Sucres totaux (%)
T0	20,0	1,94
T1	22,4	1,81
T2	21,7	2,65
T3	22,2	2,30

4. Discussion



4.1. Croissance végétative et productivité

Les résultats obtenus montrent une amélioration nette des paramètres de croissance et de rendement du haricot avec l'apport de vermicompost, en particulier à la dose de 210 g par poquet. Cette réponse positive est globalement cohérente avec les travaux antérieurs rapportant une augmentation de la biomasse et du rendement des légumineuses sous fertilisation organique (Yadav et al., 2019 ; Mahmoud & Gad, 2020 ; Singh et al., 2008).

Toutefois, l'interprétation de ces effets mérite d'être nuancée. Dans notre étude, le vermicompost utilisé présente des teneurs non négligeables en nutriments (notamment P et K), ce qui suggère que l'amélioration observée pourrait en grande partie résulter d'un effet fertilisant direct, plutôt que de mécanismes spécifiques de biostimulation. Cette distinction est importante, car plusieurs études ont montré que les effets du vermicompost peuvent être confondus avec ceux d'un simple apport organique riche en nutriments (Lazcano et al., 2010).

Néanmoins, des contributions complémentaires liées à la présence de composés organiques bioactifs (acides humiques, substances de type phytohormonal) ne peuvent être exclues (Canellas et al., 2015 ; Blouin et al., 2019). Dans ce cadre, l'amélioration conjointe de la croissance végétative et du rendement observée dans notre étude pourrait résulter d'une combinaison de facteurs nutritionnels et biologiques, sans qu'il soit possible, à ce stade, d'en quantifier les contributions respectives.

Par ailleurs, l'absence de différence significative entre la faible dose de vermicompost (T1) et la fertilisation minérale (T3) suggère l'existence d'un effet seuil, au-delà duquel les bénéfices du vermicompost deviennent pleinement exprimés. Ce résultat souligne l'importance de l'optimisation des doses dans les conditions locales.

4.2. Relations entre croissance et productivité

L'analyse de corrélation et le modèle de régression multiple mettent en évidence une relation étroite entre les paramètres de croissance végétative (hauteur, nombre de feuilles, nombre de fleurs) et la productivité. Ces résultats sont cohérents avec le fait que le rendement chez le haricot dépend fortement de la capacité de la plante à développer une surface photosynthétique suffisante et à soutenir la formation des organes reproducteurs.

Cependant, il convient de noter que ces relations, bien que statistiquement robustes, restent corrélationnelles. Elles ne permettent pas d'établir des liens de causalité stricts entre les variables. Par exemple, le nombre de gousses, bien que directement lié au rendement d'un point de vue agronomique, n'apparaît pas significatif dans le modèle final, ce qui peut s'expliquer par des phénomènes de colinéarité entre variables explicatives.

Le modèle retenu explique une part importante de la variabilité du rendement (R^2 ajusté = 0,94), mais cette valeur élevée doit être interprétée avec prudence, car elle peut refléter en partie la structure du jeu de données et la redondance entre variables. Des validations sur des jeux de données indépendants seraient nécessaires pour confirmer la robustesse prédictive de ce modèle.

4.3. Effets potentiels sur les propriétés du sol

L'amélioration des performances agronomiques observée peut également être liée à des modifications des propriétés du sol induites par le vermicompost. Plusieurs études ont montré que cet amendement peut améliorer la structure du sol, la porosité et la capacité de rétention en eau, tout en stimulant l'activité microbienne (Arancon et al., 2004 ; Lazcano & Domínguez, 2011).

Dans le cas des sols ferrallitiques acides, comme celui du site expérimental, ces effets peuvent être particulièrement déterminants. En effet, ces sols sont caractérisés par une forte fixation du phosphore et une toxicité potentielle liée à l'aluminium échangeable (Sanchez, 2019). Certains travaux suggèrent que les amendements organiques peuvent contribuer à atténuer ces contraintes, notamment par la formation de complexes organo-minéraux et la complexation des ions toxiques (Liu et al., 2019).

Cependant, il est important de souligner que ces mécanismes n'ont pas été directement mesurés dans cette étude. Ainsi, toute interprétation concernant un éventuel effet de "neutralisation" de l'acidité ou de déblocage du phosphore doit être considérée comme hypothétique et nécessiterait des analyses complémentaires (pH post-récolte, aluminium échangeable, phosphore disponible).

4.4. Qualité nutritive des graines

L'absence d'effet significatif du vermicompost sur la teneur en protéines des graines suggère que ce paramètre est principalement déterminé par le génotype, comme cela a été rapporté pour d'autres variétés de haricot (Blair et al., 2013). Ce résultat indique que l'amélioration de la fertilité du sol ne se traduit pas nécessairement par une modification de la teneur protéique, en particulier dans des conditions où ce caractère est génétiquement stabilisé.

En revanche, l'augmentation des sucres totaux observée sous vermicompost pourrait refléter une modification du métabolisme carboné des plantes. Des travaux antérieurs ont montré que certains amendements organiques peuvent influencer l'accumulation de glucides, possiblement via une amélioration de la photosynthèse ou de l'état nutritionnel des plantes (Suthar, 2009 ; Joshi et al., 2015).

Toutefois, l'interprétation fonctionnelle de ce résultat reste limitée. L'augmentation des sucres totaux ne permet pas, à elle seule, de conclure à une amélioration globale de la qualité nutritionnelle, qui dépend d'un ensemble plus large de paramètres (protéines, micronutriments, composés bioactifs). Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour évaluer pleinement l'impact du vermicompost sur la qualité des grains.

4.5. Implications pour les systèmes agricoles et limites de l'étude

Les résultats obtenus suggèrent que le vermicompost peut constituer une alternative pertinente aux engrais minéraux dans les conditions de sols acides du Burundi, en particulier lorsque des doses suffisantes sont appliquées. Cette approche s'inscrit dans les stratégies d'intensification écologique visant à améliorer la productivité tout en réduisant la dépendance aux intrants de synthèse (Lal, 2015 ; FAO, 2021).

Cependant, plusieurs limites doivent être prises en compte :

- l'étude a été conduite sur un seul site et une seule saison culturale ;
- les effets résiduels du vermicompost n'ont pas été évalués ;
- les mécanismes d'action (nutritionnels versus biologiques) n'ont pas été directement testés ;
- les analyses de qualité nutritionnelle sont partielles.

Ces éléments limitent la portée des conclusions et soulignent la nécessité de travaux complémentaires intégrant des approches pluriannuelles, des analyses du sol post-culture et une caractérisation plus fine des processus biologiques.

Conclusion



Cette étude montre que l'apport de vermicompost influence positivement la croissance végétative et le rendement du haricot dans les conditions de sols acides du Burundi. Les doses élevées (210 g par poquet) ont entraîné les effets les plus marqués, notamment sur la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et le nombre de fleurs, et ont permis une amélioration notable de la productivité. Ces résultats confirment le potentiel agronomique du vermicompost comme alternative ou complément aux engrais minéraux, en accord avec les observations précédentes sur la fertilisation organique des légumineuses (Yadav et al., 2019 ; Mahmoud & Gad, 2020 ; Singh et al., 2008).

Cependant, l'absence d'effet significatif sur la teneur en protéines des graines indique que la qualité nutritionnelle des grains peut rester principalement déterminée par le génotype. De même, l'amélioration observée pourrait résulter à la fois de l'apport direct en nutriments et d'éventuels effets bioactifs, sans qu'il soit possible, à ce stade, de distinguer clairement ces mécanismes.

Les résultats doivent donc être interprétés avec prudence. Ils suggèrent que le vermicompost peut contribuer à la productivité dans les systèmes agricoles locaux, mais des études complémentaires sont nécessaires pour :

évaluer les effets pluriannuels et résiduels du vermicompost,

caractériser les mécanismes biologiques et nutritionnels sous-jacents,

analyser plus finement la qualité nutritionnelle des grains et la santé du sol après application.

Dans l'ensemble, cette étude apporte des éléments encourageants pour l'adoption du vermicompost dans les systèmes agricoles burundais et renforce l'intérêt de stratégies d'intensification écologique visant à améliorer la productivité tout en réduisant la dépendance aux engrais chimiques.

Bibliographie



Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Metzger, J. D., & Lucht, C. (2004). Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers, and strawberries. *Pedobiologia*, 48(5-6), 459-463.

Blair, M. W., Cortés, A. J., & Tovar, E. (2013). Genetic diversity and breeding of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for improved nutrient content. *Plant and Soil*, 372(1-2), 23-41.

Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., ... & Brun, J.-J. (2019). A review of earthworm impacts on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 70(1), 23-43.

Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (*Phaseolus spp.*) - Model food legumes. *Plant and Soil*, 252, 55-128.

Canellas, L. P., Olivares, F. L., Okorokova-Façanha, A. L., & Façanha, A. R. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15-27.

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In C. A. Edwards (Ed.), *Vermiculture Technology* (pp. 27-40). CRC Press.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2011). Vermicomposting organic wastes: A review. In C. A. Edwards (Ed.), *The Science of Vermiculture* (pp. 7-16). CRC Press.

FAO. (2021). The state of food and agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., ... & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008-1010.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 179-186.
- Lazcano, C., Domínguez, J., & Zaller, J. G. (2010). Vermicompost as a substrate for growth and production of horticultural crops: Effects on nutrient availability, plant growth, and yield. *Compost Science & Utilization*, 18(4), 287-295.
- Mahmoud, A. M., & Gad, M. F. (2020). Effect of vermicompost and mineral fertilizers on growth, yield and chemical composition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Soil Science and Agricultural Engineering*, 11(9), 399-405.
- MINAGRIE. (2016). Inventaire et cartographie des sols du Burundi: Rapport technique. Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Bujumbura, Burundi.
- Sanchez, P. A. (2019). *Properties and management of soils in the tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Sharma, S., & Garg, N. (2018). Impact of long-term use of chemical fertilizers on soil health. *International Journal of Agriculture Sciences*, 10(4), 1602-1606.
- Singh, R., Kaur, P., & Kapoor, K. K. (2008). Response of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to organic manures and vermicompost. *Journal of Food Legumes*, 21(2), 124-128.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677.
- Yadav, A., Kumar, V., & Choudhary, R. L. (2019). Effect of vermicompost on growth, yield and nutrient uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(10), 2677-2685.



Effets du vermicompost *versus* engrais chimique sur la croissance, la productivité et la qualité de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivée sur sol hautement acide et dégradé



Diomède Ndikumana¹, Longin Baranyizigiye¹, Inès Mugisha¹, Valence Ndayisemga¹, Samuel Kwizerimana², Eric Gilbert Kazitsa^{3*}, Rachelle Buhintahe³, Emmanuel Barankanira³, Oscar Nduwimana⁴



Université de Ngozi, Faculté d'Agronomie, Centre de Recherche en Agriculture et en Développement Rural (CERADER)



École Normale Supérieure du Burundi, Département des Sciences Naturelles, Centre de Recherche en Sciences et de Perfectionnement Professionnel (CReSP)



Société de Valorisation de l'Espace Rural et de Transformation (SOVERT)



International Fertilizer Development Center (IFDC), Projet d'Appui à une Gestion Responsable et Intégrée des Sols (PAGRIS)

* Pour correspondance : email : kazitsae@yahoo.fr



Résumé

La production de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) au Burundi est limitée par des sols Ferralsols fortement acides et dégradés. Cette étude a comparé l'effet de deux doses de vermicompost (140 g et 210 g par poquet) et d'un engrais chimique standard (DAP + KCl + Urée) sur la croissance, la productivité et la qualité des fruits. L'expérimentation, réalisée à la station du CERADER de Ngozi selon un plan en blocs complets randomisés (4 traitements $\times$ 4 répétitions), a mesuré la hauteur, le nombre de ramifications, la biomasse racinaire, le nombre de fleurs, la productivité en masse de fruits et la teneur en vitamine C et protéines.

Les plants fertilisés avec 210 g de vermicompost (T2) ont atteint la plus grande hauteur moyenne ($100,31 \pm 20,77$ cm) et le plus grand nombre de ramifications ($52,38 \pm 19,67$), avec une biomasse racinaire de $65,84 \pm 23,24$ g, presque le double du témoin T0 ($29,44 \pm 19,46$ g).

La fertilisation chimique (T3) a produit le nombre moyen de fleurs le plus élevé ($18,53 \pm 25,38$), mais une croissance végétative moindre que T2. La productivité moyenne a été maximale sous T2 ($2015,12 \pm 1137,40$ g), suivie de T1 ($1500,62 \pm 1024,81$ g) et T3 ($1422,56 \pm 941,32$ g).

L'ANOVA a montré un effet significatif du traitement sur tous les paramètres ($p < 0,001$). Les corrélations de Pearson indiquent que la productivité est fortement liée à la biomasse racinaire ($r = 0,69$, $p < 0,05$) et au nombre de ramifications ($r = 0,67$, $p < 0,05$).

Le modèle linéaire multiple confirme que la biomasse racinaire ($p < 0,001$), le nombre de ramifications ($p < 0,001$) et le nombre de fleurs ($p = 0,029$) influencent significativement la productivité, indépendamment du type de fertilisation.

Ces résultats suggèrent que l'application de vermicompost, particulièrement à 210 g par poquet, constitue une stratégie durable pour améliorer la croissance et la productivité de la tomate sur sols acides et dégradés au Burundi.

Mots-clés

Tomate, Vermicompost, Fertilisation chimique, Croissance végétative, Productivité, Sol acide et dégradé, Burundi



1. Introduction

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est une culture maraîchère stratégique en Afrique subsaharienne, représentant à la fois une source majeure de nutriments essentiels et un vecteur important de revenus pour les exploitations rurales (FAO, 2020). Au Burundi, sa production est confrontée à des contraintes pédologiques importantes, principalement dues à la dégradation des sols ferrallitiques. Ces sols présentent une forte acidité, une faible capacité d'échange cationique et une teneur réduite en matière organique, conditions qui limitent sévèrement la disponibilité des éléments nutritifs nécessaires à un développement végétatif et reproductif optimal des plantes (MINEAGRIE, 2022; FAO, 2020).

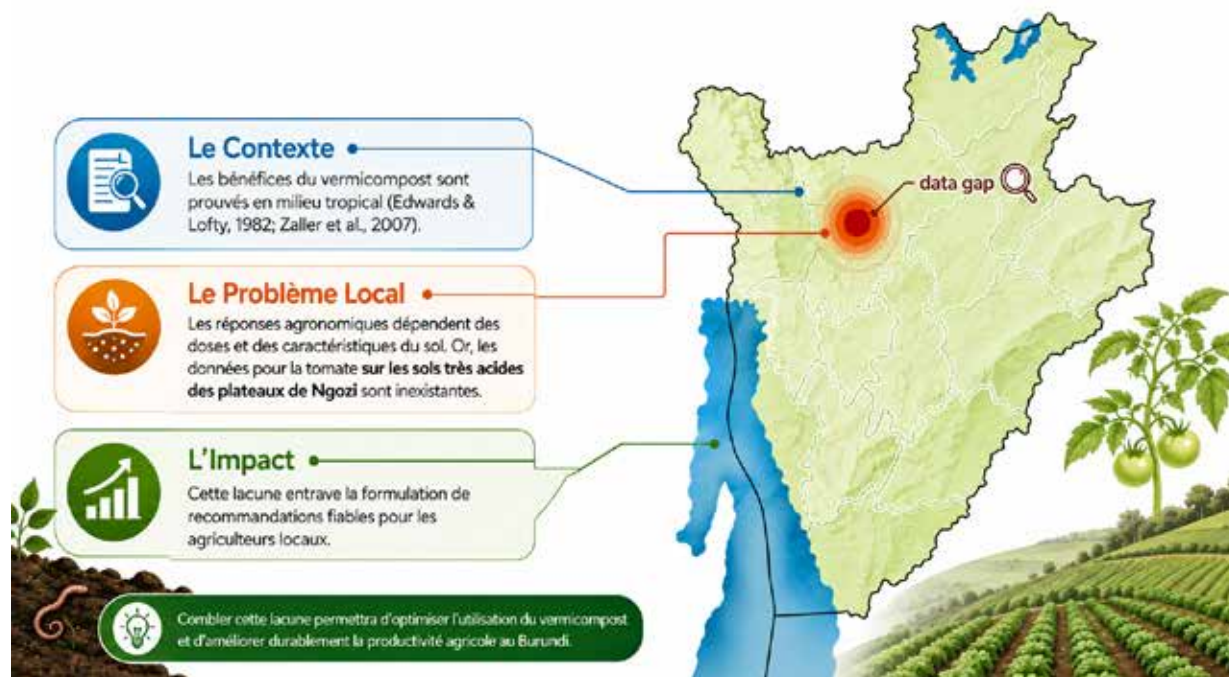
Face à ces contraintes, le recours aux engrais minéraux est devenu systématique pour compenser les carences en nutriments. Cependant, des études récentes montrent que l'usage exclusif d'engrais chimiques peut entraîner une acidification accrue des sols, une lixiviation des nutriments et un déséquilibre de la microbiote du sol, réduisant ainsi la fertilité à long terme (Brady & Weil, 2017; Lal, 2015). Ces limitations justifient l'exploration de stratégies de fertilisation plus durables, capables de concilier productivité et restauration des sols.



Dans ce contexte, les amendements organiques stabilisés, tels que le vermicompost, apparaissent comme une alternative prometteuse. Produit par la bio-oxydation des déchets organiques via l'action des vers de terre, le vermicompost se distingue par sa richesse en matière organique, sa porosité élevée, la présence de micro-organismes bénéfiques et de phytohormones, ainsi qu'une libération progressive des nutriments sous des formes facilement assimilables par les plantes (Atiyeh et al., 2002; Edwards et al., 2011). Les recherches menées dans différents contextes tropicaux indiquent que le vermicompost peut améliorer la croissance racinaire, la biomasse végétative, la floraison et la qualité des fruits de la tomate (Edwards & Lofty, 1982; Zaller et al., 2007). Toutefois, les réponses agronomiques varient selon la dose appliquée, la composition du vermicompost et les caractéristiques du sol, rendant nécessaires des évaluations locales.

Au Burundi, les informations disponibles concernant l'usage du vermicompost pour la tomate sur sols acides et dégradés restent limitées, notamment pour les plateaux centraux. Cette lacune entrave la formulation de recommandations fiables et adaptées aux conditions locales.

La présente étude vise à évaluer les effets de différentes doses de vermicompost (140 g et 210 g par poquet) comparativement à la fertilisation chimique standard (DAP + KCl + Urée) sur : (i) la croissance et le développement végétatif de la tomate (hauteur, ramifications, biomasse racinaire), (ii) la floraison et la productivité des plants, (iii) la qualité nutritionnelle des fruits (teneur en vitamine C et protéines), et (iv) les corrélations entre ces paramètres afin de modéliser la productivité.



La présente étude vise à évaluer, en conditions réelles de champ les effets du vermicompost sur les performances et la qualité de la tomate sur sol très acides et dégradé. Spécifiquement, elle analyse et compare les l'effets de deux différentes doses de vermicompost (140 g et 210 g par poquet) de la dose standard d'engrais (DAP + KCl + Urée) sur : (i) la croissance et le développement végétatif (hauteur et ramifications, développement racinaire), (ii) la floraison et la productivité en termes de masse de graines par pied, et (iii) la teneur des fruits en vitamine C et en protéines; (iv) analyser les corrélations et modéliser la productivité.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site de l'étude

L'expérimentation a été conduite sur le site de la station expérimentale du Centre de Recherche en Agriculture et Développement Rural (CERADER) de l'Université de Ngozi, au Burundi. Le site se caractérise par un climat tropical de savane, avec des précipitations annuelles moyennes comprises entre 1 200 et 1 400 mm et des températures variant entre 18 et 28 °C (Ndayishimiye et al., 2019). Le sol est classé Ferralsol selon la FAO, présentant une texture sablo-argileuse, un pH acide et une faible teneur en matière organique (FAO, 2020). Ces conditions reflètent les sols typiques des zones agricoles dégradées du Burundi, justifiant leur choix pour l'étude de l'effet du vermicompost sur la croissance et la productivité des tomates.

2.2. Matériel végétal, vermicompost et engrais

Le matériel végétal utilisé consistait en jeunes plants de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), issus de semis en pépinière. Les plants présentaient 4 à 6 feuilles vraies au moment du repiquage. Les amendements appliqués comprenaient :

- Vermicompost produit à partir d'une vieille litière d'étable de vaches ou du fumier de vache ;
- Engrais chimiques minéraux composés de DAP (18-46-0), de KCl (0-0-60) et d'urée (46-0-0), appliqués de manière fractionnée afin d'assurer un apport équilibré en N, P et K conformément aux recommandations agronomiques locales.

Les caractéristiques physico-chimiques du vermicompost étaient conformes aux recommandations pour la culture de la tomate, avec une teneur en matière organique > 35 %, un pH compris entre 6,5 et 7,2 et une concentration en azote total de 2,1 % (Edwards et al., 2011; Atiyeh et al., 2002).

2.3. Dispositif expérimental

L'essai a été mis en place selon un dispositif en blocs complets randomisés (BCR) comprenant quatre traitements et quatre répétitions par bloc, pour un total de seize unités expérimentales. Chaque unité expérimentale mesurait 4 m × 2 m (8 m²) et contenait 12 plants espacés de 0,70 m entre les lignes et 0,50 m entre les plants sur la ligne. Les blocs étaient séparés par 1 m et entourés d'une bordure périphérique de 1 m pour limiter les effets de bordure.

Les traitements appliqués étaient les suivants :

- T0 : témoin sans amendement ;
- T1 : 140 g de vermicompost par poquet ;
- T2 : 210 g de vermicompost par poquet ;
- T3 : engrais chimiques.

2.4. Conduite de l'expérimentation

Le terrain a été préparé par désherbage manuel, labourage et nivellement. Chaque unité expérimentale a été délimitée avec des piquets et de la ficelle pour garantir l'homogénéité et la comparabilité entre traitements.

Les plants ont été repiqués manuellement en fin d'après-midi pour réduire le stress hydrique et thermique. Les amendements ont été appliqués localement au moment du repiquage et un paillage sèche a été disposé autour de chaque plant pour limiter l'évaporation et maintenir l'humidité du sol (Zaller et al., 2007).

L'entretien a été fait comme suit :

- Irrigation : régulière selon l'état d'humidité du sol et les besoins des plants.
- Désherbage : manuel, réalisé toutes les deux semaines.
- Protection phytosanitaire : traitements préventifs et curatifs appliqués avec des produits adaptés, conformément aux recommandations des fabricants.
- Paillage : à l'aide d'herbes et depuis la transplantation (Figure 8.1).
- Tuteurage : assuré par des piquets en bois et des ficelles pour soutenir la croissance verticale et faciliter la récolte.

La récolte a été progressive et réalisée en plusieurs cycles. Les fruits ont été pesés et comptés à l'état frais. Après la dernière récolte, les plants ont été arrachés pour l'évaluation de la biomasse racinaire et du nombre de racines, les racines étant séchées au soleil ou en laboratoire avant pesage (Edwards et Lofty, 1982).

2.5. Collecte des paramètres et analyses

- **Paramètres de croissance** : hauteur des plants (figure 8.1), nombre de branches, nombre de fleurs et de fruits par plant, mesurés régulièrement.
- **Paramètres de productivité** : nombre de fruits par unité expérimentale, poids moyen des fruits, biomasse racinaire et nombre de racines par plant.
- **Analyses nutritionnelles** : teneur en protéines et vitamine C des fruits, réalisées selon les méthodes standard AOAC (AOAC, 2016).



Figure 8.1. Méthodologie de mesure de la hauteur des tomates

2.7. Statistiques, analyses de corrélation et modélisation

L'ANOVA à un facteur a été utilisée pour évaluer l'effet du type de fertilisant sur la biomasse racinaire et la productivité de la tomate. Un seuil de significativité de 95 % ($\alpha = 0,05$) a été adopté. Si la p-value associée à F^{obs} est inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle H_0 est rejetée et les différences entre traitements sont considérées comme statistiquement significatives. Les comparaisons multiples entre traitements ont été effectuées par le test de Tukey. Les conditions d'application (indépendance, normalité et homogénéité des variances) ont été vérifiées par les tests de Durbin-Watson, Shapiro-Wilk et Bartlett respectivement (Montgomery, 2017; Kutner et al., 2004).

Une analyse de corrélation de Pearson a été réalisée pour quantifier les relations linéaires entre variables. Les variables indépendantes significatives ($p < 0,10$) ont été incluses dans un modèle de régression linéaire multiple. Une sélection descendante pas-à-pas a été appliquée au seuil de 5 % ($\alpha = 0,05$) pour obtenir le modèle final, en vérifiant la normalité et l'homogénéité des résidus. La sélection a été optimisée par minimisation du Critère de l'Information Bayésienne (BIC). Toutes les analyses ont été effectuées avec le logiciel R version 4.1.2 (R Core Team, 2021).

3. Résultats

3.1. Croissance végétative et floraison

Les effets des traitements sur la croissance des plants de tomate sont présentés dans le Tableau 8.1, qui combine les quatre paramètres étudiés.

Tableau 8.1  **Croissance végétative des plants de tomate selon le type de fertilisant (moyenne $\pm$ écart-type)**

Traitement/fertilisation	N	Hauteur (cm)	Ramifications	Biomasse racinaire (g)	Fleurs
T0 (témoin, sans fertilisant)	32	56,38 $\pm$ 20,50	28,22 $\pm$ 10,14	29,44 $\pm$ 19,46	7,22 $\pm$ 5,81
T1 (140 g vermicompost)	32	85,88 $\pm$ 14,19	47,47 $\pm$ 17,80	42,69 $\pm$ 19,09	8,84 $\pm$ 11,6
T2 (210 g vermicompost)	32	100,31 $\pm$ 20,77	52,38 $\pm$ 19,67	65,84 $\pm$ 23,24	13,72 $\pm$ 11,42
T3 (engrais chimique)	32	79,09 $\pm$ 19,99	42,38 $\pm$ 19,65	43,09 $\pm$ 22,22	18,53 $\pm$ 25,38

Les plants fertilisés avec T2 (210 g de vermicompost) ont atteint la plus grande hauteur moyenne (100,31 $\pm$ 20,77 cm), significativement supérieure au témoin T0 (56,38 $\pm$ 20,50 cm) et aux autres traitements ($p < 0,001$). T1 (140 g de vermicompost) a également favorisé la croissance en hauteur, mais de manière moins prononcée. T3 (engrais chimique) a produit des plants plus hauts que le témoin, mais moins élevés que T2 (figure 8.2).

Le nombre de ramifications suit une tendance similaire à la hauteur. T2 a produit le plus grand nombre moyen de ramifications (52,38 $\pm$ 19,67), suivi de T1 et T3, avec des valeurs significativement supérieures à celles du témoin ($p < 0,001$). Ceci indique un développement végétatif plus dense sous l'influence du vermicompost, probablement lié à l'amélioration de la disponibilité en nutriments et à l'effet bénéfique des micro-organismes présents.

La biomasse racinaire est maximale sous T2 ($65,84 \pm 23,24$ g), presque le double de celle du témoin ($29,44 \pm 19,46$ g) (Tableau 8.1, figure 8.2). T1 et T3 ont des valeurs intermédiaires, non significativement différentes entre elles mais supérieures à T0. La forte biomasse racinaire associée à T2 suggère un système racinaire plus développé, capable d'absorber efficacement l'eau et les nutriments.

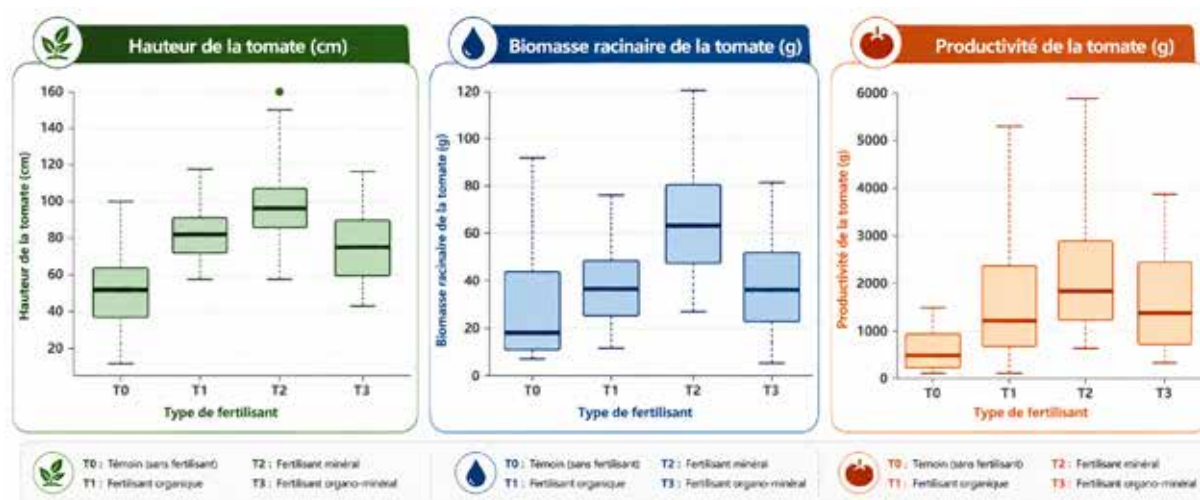


Figure 8.2. Boîtes déjà moustache de la hauteur, biomasse racinaire et productivité des tomates

Le nombre de fleurs varie moins linéairement que les autres paramètres. T3 a produit le nombre moyen de fleurs le plus élevé ($18,53 \pm 25,38$), suivi de T2 ($13,72 \pm 11,42$), alors que T1 et T0 ont montré les valeurs les plus faibles (Tableau 8.1). Cela peut refléter un effet spécifique des engrais chimiques sur la floraison, bien que la croissance végétative reste meilleure sous T2.

L'ANOVA à un facteur montre un effet significatif du traitement sur tous les paramètres (hauteur : $F = 29,53$, $p < 0,001$; ramifications : $F = 12,47$, $p < 0,001$; biomasse racinaire : $F = 17,30$, $p < 0,001$; fleurs : $F = 9,81$, $p < 0,001$). Les tests de comparaisons multiples de Tukey confirment que T2 est le traitement le plus favorable pour la croissance globale, tandis que T3 favorise principalement la floraison.

3.2. Productivité

La productivité des tomates varie significativement selon le type de fertilisant (Tableau 2).

Tableau 8.2 **Statistiques descriptives de la productivité de la tomate**

Traitement	n	Minimum (g)	Moyenne $\pm$ Écart-type (g)	Maximum (g)
T0	32	0	451,56 $\pm$ 388,66	1260
T1	32	50	1500,62 $\pm$ 1024,81	4230
T2	32	365	2015,12 $\pm$ 1137,40	4625
T3	32	235	1422,56 $\pm$ 941,32	3525

Les plants sous T2 ont produit la plus grande moyenne de masse de fruits, suivis de T1, T3 et T0. L'ANOVA montre un effet significatif du traitement sur la production (voir tableau 8.3, $F = 16,12$; $p < 0,001$). Les analyses post hoc révèlent que T2 est significativement supérieur à T3 et T0, mais ne diffère pas significativement de T1 ($p = 0,062$).

Ces résultats indiquent que l'application de vermicompost, particulièrement à 210 g, favorise à la fois la croissance végétative et la productivité, confirmant son rôle dans l'amélioration des performances agronomiques de la tomate sur sol dégradé.

Tableau 8.3



Résultats d'analyse de la variance de la productivité à un critère

Source de variation	Somme des carrés	Degré de liberté	Carré moyen	Fobs	Ftab	P-value
Type de fertilisant	40 880 281	3	13 626 760	16,12	2,68	$6,55 \times 10^9$
Résiduelle	104 812 309	124	845 261			
Totale	145 692 590	127	1 147 186			

Les comparaisons multiples (test de Student et méthode de Tukey) montrent que la différence globale des moyennes est due aux contrastes T0-T1, T0-T2 et T0-T3. Cependant, la productivité moyenne obtenue avec T1 ($1500,62 \pm 1024,81$ g) n'est pas significativement inférieure à celle de T2 ($2015,12 \pm 1137,40$ g ; $p = 0,119$) (Figure 8.7 et Tableau 8.11).

Tableau 4



Comparaisons multiples de la productivité entre traitements

Type de fertilisant	Différence	IC à 95 %	P-value ajustée
T1-T0	1049,06	[450,50 ; 1647,63]	<0,001
T2-T0	1563,56	[965,00 ; 2162,13]	<0,001
T3-T0	971,00	[372,43 ; 1569,57]	<0,001
T2-T1	514,50	[-84,07 ; 1113,07]	0,119
T3-T1	-78,06	[-676,63 ; 520,50]	0,986
T3-T2	-592,56	[-1191,13 ; 6,00]	0,053

Le test de Bartlett montre que les variances de la productivité ne sont pas homogènes ($K^2 = 31,57$; ddl = 3 ; $p = 6,44 \times 10^{-7}$). Le test de Shapiro-Wilk rejette la normalité pour T0 ($W = 0,90$; $p = 0,005$), T2 ($W = 0,93$; $p = 0,045$) et T3 ($W = 0,91$; $p = 0,010$), mais pas pour T1 ($W = 0,94$; $p = 0,061$). L'analyse non paramétrique de Kruskal-Wallis confirme un effet significatif du type de fertilisant sur la productivité ($\chi^2 = 46,05$; ddl = 3 ; $p = 5,53 \times 10^{-10}$).

3.3. Corrélation et modélisation de la productivité

Le tableau 8.5 présente les coefficients de corrélation entre la productivité, la biomasse racinaire, la hauteur, le nombre de fleurs et le nombre de ramifications. Tous les coefficients sont positifs et significatifs ($p < 0,05$), indiquant que l'augmentation d'une variable est associée à celle des autres. Les corrélations les plus élevées sont observées entre la productivité et la biomasse racinaire ($r = 0,69$), ainsi qu'entre la productivité et le nombre de ramifications ($r = 0,67$). La figure 8.3 illustre visuellement ces relations.

Ces résultats suggèrent que le développement végétatif, en particulier la hauteur et la biomasse racinaire, est un déterminant clé de la productivité des tomates.

Tableau 8.5



Coefficient de corrélation de Pearson entre paire de variables

Variables	Productivité	Biomasse racinaire	Hauteur	Nombre de fleurs	Nombre de ramifications
Productivité	1,00	0,69*	0,66*	0,62*	0,67*
Biomasse racinaire	0,69*	1,00	0,42*	0,26*	0,51*
Hauteur	0,66*	0,42*	1,00	0,38*	0,66*
Nombre de fleurs	0,62*	0,26*	0,38*	1,00	0,47*
Nombre de ramifications	0,67*	0,51*	0,66*	0,47*	1,00

* : p-value < 0,05

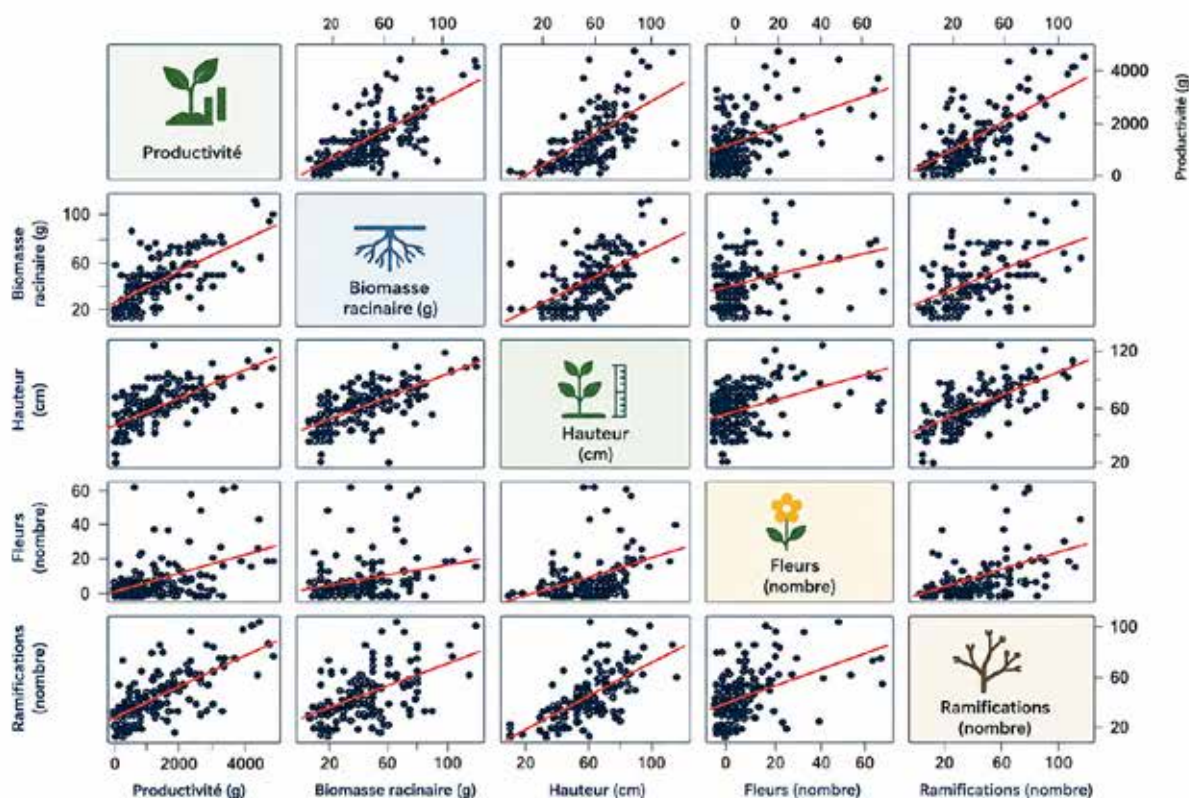


Figure 8.3. Matrice des nuages de points

Les modèles linéaires simples présentés dans le tableau 6 montrent que toutes les variables explicatives influencent significativement la productivité ($p < 0,05$), justifiant leur inclusion dans un modèle multiple. Le modèle linéaire complet (tableau 8.7) intégrant également le type de fertilisant présente un meilleur ajustement que le modèle nul ($BIC = 2055,86$ contre $2157,91$). Toutefois, la variable « hauteur » n'est pas significative ($p = 0,212$) et a été retirée.

Tableau 8.6



Modèles linéaires simples de la productivité de la tomate

Paramètres	Estimation	Erreur standard	t-value	IC à 95 %	p-value
Hauteur	28,78	2,90	3,967	[23,04 ; 34,52]	<0,0001
Biomasse racinaire	30,58	2,83	10,803	[24,98 ; 36,18]	<0,001
Nombre de ramifications	37,22	3,66	10,170	[29,98 ; 44,46]	<0,001
Nombre de fleurs	28,50	5,477	5,204	[17,66 ; 39,34]	<0,001

Tableau 8.7



Modèles linéaires complet de la productivité de la tomate

Paramètres	Estimation	Erreur standard	t-value	IC à 95 %	p-value
Intercept	-849,93	212,76	-4,00	[-1266,93 ; -432,93]	<0,001
Hauteur	4,87	3,88	1,26	[-2,74 ; 12,48]	0,212
Biomasse racinaire	18,37	3,24	5,68	[12,03 ; 24,71]	<0,001
Nombre de ramifications	15,04	4,34	3,47	[6,54 ; 23,54]	0,001
Nombre de fleurs	8,57	4,42	1,94	[-0,09 ; 17,23]	0,055
T1	375,82	191,48	1,96	[0,53 ; 751,11]	0,052
T2	261,9	218,63	1,20	[-166,61 ; 690,40]	0,233
T3	299,68	177,13	1,69	[-47,49 ; 646,84]	0,093

Le modèle final (tableau 8.8) indique que la biomasse racinaire ($p < 0,001$), le nombre de ramifications ($p < 0,001$) et le nombre de fleurs ($p = 0,029$) influencent significativement la productivité après ajustement sur le type de fertilisant. Les traitements T1 et T3 présentent des effets significatifs ($p < 0,05$), tandis que T2 reste marginalement non significatif ($p = 0,059$).

Tableau 8



Modèles linéaires saturé de la productivité de la tomate

Paramètres	Estimation	Erreur standard	t-value	IC à 95 %	p-value
Intercept	-672,08	159,04	4,23	[-983,79 ; -360,38]	<0,001
Biomasse racinaire	19,64	3,08	6,38	[13,61 ; 25,68]	<0,001
Nombre de ramifications	16,87	4,10	4,12	[8,84 ; 24,90]	<0,001
Nombre de fleurs	9,61	4,35	2,21	[1,08 ; 18,14]	0,029
T1	466,86	177,62	2,63	[118,74 ; 814,98]	0,010
T2	378,45	198,38	1,91	[-10,35 ; 767,26]	0,059
T3	355,25	171,91	2,07	[18,32 ; 692,18]	0,041

L'analyse des résidus confirme la validité du modèle linéaire saturé. Les résidus ont une moyenne nulle, comme illustré par la figure 8.4 et confirmé par le test de Student ($p = 1$). Ils présentent une variance constante (voir figure 8.5 ; test de White, $p = 0,783$), suivent une distribution normale (voir figure 8.5 ; $p > 0,05$ pour tous les tests) et sont indépendants (voir figure 8.5 ; test de Box-Pierce, $p = 0,833$).

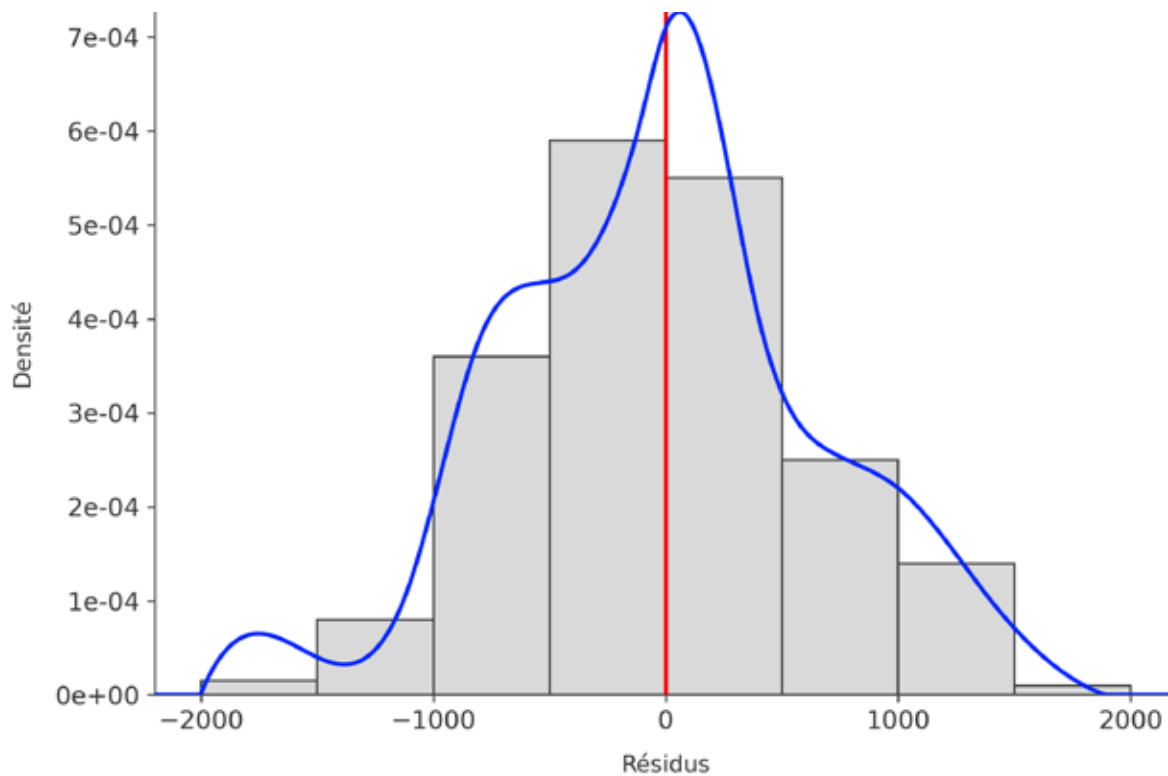


Figure 8.4. Histogramme des résidus du modèle linéaire saturé

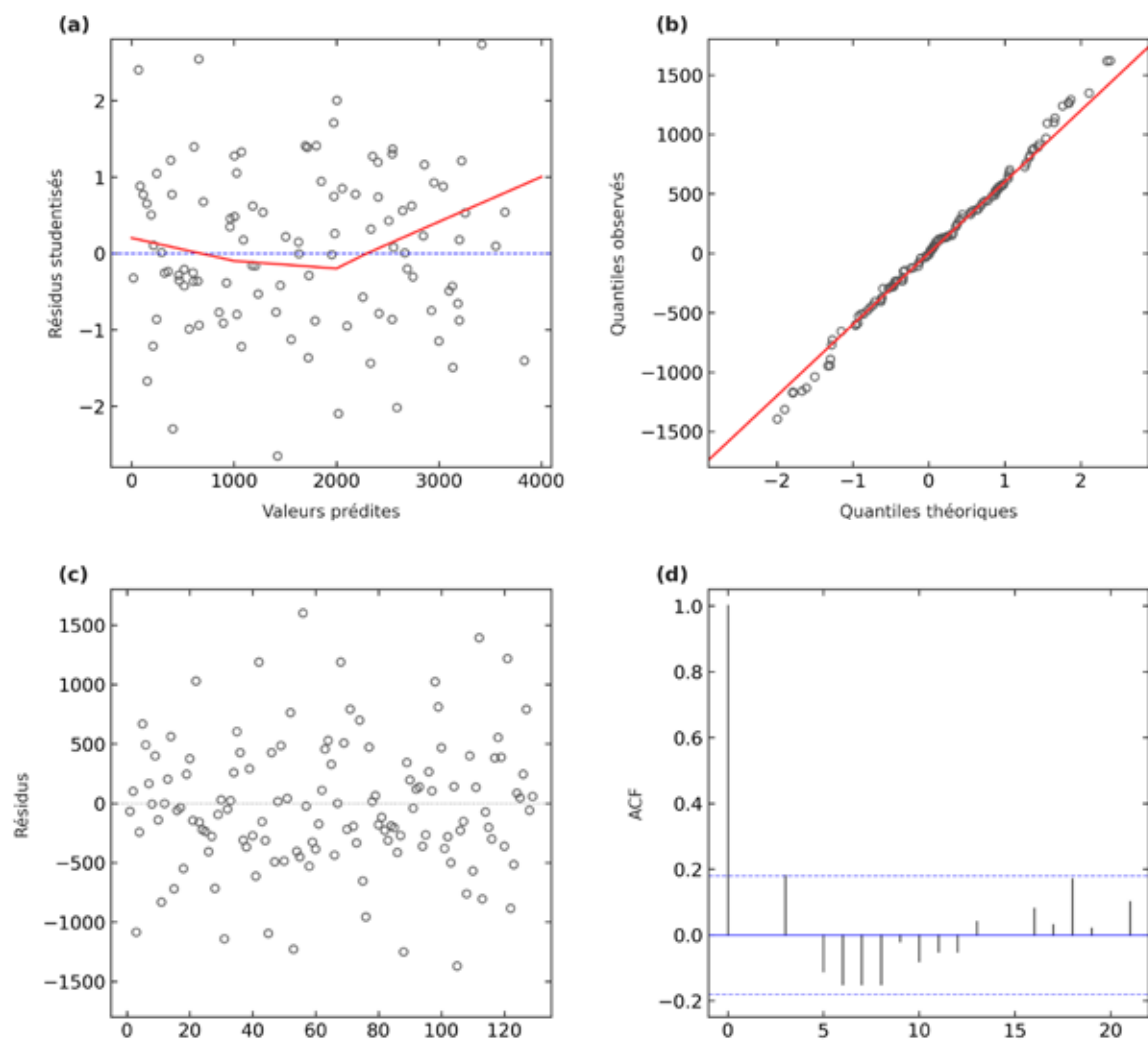


Figure 8.5. Graphs des résidus du modèle de productivité de la tomate. (a) : homogénéité de la variance, (b) : normalité, (c) : indépendance et (d) : autocorrélation des résidus

4. Teneur en vitamine C et protéines



Le tableau 8.9 montre que la teneur en vitamine C la plus élevée est obtenue avec le traitement T2 (41,1 mg/100 g de matière fraîche), tandis que la teneur en protéines la plus élevée est observée avec le traitement T3 (22,7 % de matière sèche).

Tableau 8.9

Teneur des tomates en vitamine C et protéines



Traitement	Vitamine C (mg/100 g de M.S)	Protéines (% en M.S)
T0	30,6	20,3
T1	28,4	20,9
T2	41,1	18,9
T3	24,6	22,7

4. Discussion



Les résultats de cette étude montrent que l'amendement avec du vermicompost, en particulier à la dose de 210 g par poquet (T2), améliore significativement la croissance végétative et la productivité des plants de tomate sur sol ferrallitique acide et dégradé, par rapport au témoin et même à l'engrais chimique conventionnel. Ces observations confirment l'hypothèse selon laquelle l'apport de matière organique stabilisée favorise le développement racinaire, la ramification et la biomasse totale des plants.

4.1. Effets sur la croissance végétative

La hauteur des plants et le nombre de ramifications ont été significativement supérieurs sous T2 par rapport aux autres traitements. Ces résultats corroborent les observations d'Atiyeh et al. (2000a, 2002), qui ont montré que le vermicompost améliore la croissance végétative de *Solanum lycopersicum* grâce à la libération lente de nutriments et aux phytohormones (auxines et cytokinines) présentes dans les excréments des vers de terre. De même, Zaller et al. (2007) ont rapporté une augmentation notable de la biomasse racinaire et de la densité de ramifications dans des tomates fertilisées avec du vermicompost produit localement, ce qui est cohérent avec notre résultat sur la biomasse racinaire maximale sous T2 ($65,84 \pm 23,24$ g).

L'effet positif du vermicompost sur la croissance racinaire peut également être expliqué par l'amélioration de la structure du sol et de la capacité de rétention en eau, comme l'ont observé Edwards et Lofty (1982) dans des sols tropicaux pauvres en matière organique. En comparaison, les engrais chimiques (T3) ont favorisé davantage la floraison que la croissance racinaire, confirmant que les engrais minéraux stimulent principalement les processus reproductifs à court terme mais n'améliorent pas toujours la santé racinaire ni l'architecture végétative globale (Bashan et al., 2013).

4.2. Effets sur la productivité

La productivité en fruits (moyenne de 2015,12 g sous T2) est supérieure à celle du témoin et légèrement meilleure que celle obtenue avec les engrais chimiques, bien que la différence entre T2 et T1 (140 g) ne soit pas statistiquement significative. Ces résultats s'accordent avec ceux d'Edwards et al. (2004), qui ont démontré que des doses modérées de vermicompost peuvent égaler voire surpasser l'efficacité des fertilisations minérales classiques en termes de rendement. De plus, Atiyeh et al. (2002) ont montré que l'utilisation du vermicompost augmente la productivité par l'effet combiné d'une meilleure nutrition et de l'activation de la microflore du sol, ce qui favorise la disponibilité des nutriments et la stimulation hormonale de la plante.

L'analyse des corrélations dans cette étude montre que la productivité est fortement corrélée avec la biomasse racinaire ($r = 0,69$) et le nombre de ramifications ($r = 0,67$), indiquant que le développement végétatif constitue un déterminant majeur du rendement. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Zaller et al. (2007) et Edwards et Lofty (1982), qui soulignent que les plantes à racines plus développées exploitent mieux les nutriments et l'eau, conduisant à une meilleure fructification.

4.3. Effets sur la qualité des fruits

Le traitement T2 a également produit les fruits les plus riches en vitamine C (41,1 mg/100 g), confirmant que le vermicompost peut améliorer non seulement la quantité mais aussi la qualité nutritionnelle des tomates. Ces observations sont en accord avec les travaux de Garg et al. (2006), qui ont montré une augmentation significative de la vitamine C et des protéines dans des tomates fertilisées avec du compost stabilisé et du vermicompost, probablement due à la meilleure disponibilité en nutriments assimilables et à la stimulation de l'activité enzymatique des plantes. En revanche, l'engrais chimique T3 a légèrement favorisé la teneur en protéines, ce qui pourrait être lié à la disponibilité immédiate de l'azote minéral, déjà notée par Bashan et al. (2013).

4.4. Modélisation et facteurs déterminants

Les modèles linéaires multiples ont confirmé que la biomasse racinaire et le nombre de ramifications sont des prédicteurs robustes de la productivité. Ces résultats sont en accord avec ceux d'Edwards et al. (2004), qui ont démontré que la croissance racinaire est un facteur clé limitant la performance des tomates sur sols pauvres. Le fait que la hauteur des plants n'ait pas été un facteur significatif dans le modèle final souligne que la simple croissance verticale ne suffit pas pour prédire la productivité sur des sols dégradés.

Conclusion

Cette étude met en évidence le rôle crucial du vermicompost dans l'amélioration de la croissance, de la productivité et de la qualité nutritionnelle des tomates cultivées sur des sols ferrallitiques acides et dégradés du Burundi. Les résultats montrent que le traitement T2 (210 g de vermicompost par poquet) a produit les meilleures performances en termes de biomasse racinaire, nombre de ramifications, rendement en fruits et teneur en vitamine C, surpassant même certaines fertilisations chimiques conventionnelles.

Ces observations confirment que l'utilisation de matières organiques stabilisées stimule non seulement la nutrition et la croissance des plantes, mais favorise également la santé du sol par l'amélioration de sa structure, de sa capacité de rétention en eau et de l'activité microbienne. Elles s'inscrivent dans la continuité des travaux d'Atiyeh et al. (2000a, 2002), Edwards et Lofty (1982), et Zaller et al. (2007), qui soulignent le potentiel du vermicompost comme alternative durable aux engrais minéraux, en particulier dans les systèmes maraîchers sur sols pauvres et acides.

En somme, cette étude démontre que le vermicompost constitue un outil efficace pour concilier productivité agricole et restauration des sols, offrant un double bénéfice agronomique et environnemental, particulièrement pertinent pour les contextes tropicaux et les exploitations à ressources limitées comme au Burundi.

Bibliographie

AOAC. (2016). Official Methods of Analysis of AOAC International (20th ed.). AOAC International.

Atiyeh, R. M., Subler, S., Edwards, C. A., Bachman, G., Metzger, J. D., & Shuster, W. (2000). Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media. *Pedobiologia*, 44, 579-590.

Atiyeh, R. M., Lee, S., Edwards, C. A., & Metzger, J. D. (2002). The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*, 84(1), 7-14.

Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2013). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives. *Plant and Soil*, 378, 1-33.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.

Edwards, C. A., & Lofty, J. R. (1982). *Biology of Earthworms* (2nd ed.). Chapman and Hall.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Bierman, P. (2004). Influence of vermicomposts on field crops. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm Ecology* (2nd ed., pp. 345-380). CRC Press.

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (Eds.). (2011). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.

FAO. (2020). FAOSTAT statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. <https://www.fao.org/faostat/>

Garg, P., Gupta, A., & Satya, S. (2006). Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia fetida*. A comparative study. *Bioresource Technology*, 97(3), 391-395.

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.

MINEAGRIE, ISABU, & IFDC. (2022). *Cartographie de la fertilité des sols du Burundi : Édition 2022. Rapport technique et atlas des cartes de fertilité validés en janvier 2022 sous le projet PAGRIS*.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.

Ndayishimiye, J., Barutwanayo, D., & Nsengiyumva, S. (2019). Climatic characterization of Ngozi region, Burundi: Implications for agriculture. *Journal of Agricultural Studies*, 7(2), 45-58.

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>

Zaller, J. G., Arnone, J., Heigl, F., & Traugott, M. (2007). Effects of vermicompost on tomato growth and soil microbial activity in pot and field experiments. *Applied Soil Ecology*, 37(2), 184-194.



Dynamique comparée de l'activité enzymatique lors du compostage thermophile de différents déchets et résidus *versus* vermicompostage par *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867)



Prudence Bararunyeretse^{1*}, Juvénal Ndirariha¹, Eric Gilbert Kazitsa², Gustave Nkurunziza³



Université du Burundi, Faculté des Sciences, Centre de Recherche en Sciences naturelles et de l'environnement, Bujumbura, Burundi



École Normale Supérieure du Burundi, Département des Sciences Naturelles, Centre de Recherche en Sciences et de Perfectionnement Professionnel (CReSP)



Université Polytechnique de Gitega, Faculté des Sciences de l'Environnement, Gitega, Burundi

* : Pour correspondance :
prudencebara@gmail.com



Résumé

L'évaluation de l'activité enzymatique constitue un indicateur fonctionnel majeur de la transformation biologique des matières organiques. Cette étude compare la dynamique oxydative et hydrolytique observée lors du compostage thermophile *versus* du vermicompostage le ver de terre *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867) obtenus de populations naturelle du Burundi, appliqués à six différents déchets et résidus

agro-industriels burundais (balles de riz, paille de riz, fibres de palmier à huile, fumier bovin, contenu digestif de bovins, mélange bagasse-écume).

L'activité catalasique (CAT) et l'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) ont été mesurées à 30, 60 et 90 jours. En compostage thermophile, la catalase a présenté des pics marqués à 60 jours pour la majorité des substrats (jusqu'à 1,62 unités relatives pour le mélange bagasse-écume), suivis d'une diminution à 90 jours, traduisant une phase d'oxydation microbienne intense puis une stabilisation progressive. En vermicompostage, les valeurs catalasiques sont restées plus modérées (généralement <0,70) et moins fluctuantes, indiquant une régulation plus progressive de l'activité oxydative.

A maturité (90 jours), l'activité hydrolytique globale (FDA) s'est révélée systématiquement plus élevée en vermicompostage (0,42-0,52 $\mu\text{g g}^{-1} \text{MS h}^{-1}$) qu'en compostage thermophile pour la majorité des substrats, où les valeurs étaient faibles voire nulles pour les matériaux lignocellulosiques pauvres en azote. Le contenu digestif de bovins constitue une exception, présentant une activité FDA initialement élevée en compostage thermophile (0,53), probablement liée à sa richesse microbienne intrinsèque.

Le vermicompostage a induit une homogénéisation des niveaux d'activité hydrolytique entre substrats contrastés, suggérant une stimulation microbienne durable associée au transit intestinal des vers de terre et à la fragmentation mécanique des particules organiques. A l'inverse, le compostage thermophile se caractérise par une activité oxydative intense mais transitoire.

Ces résultats démontrent que le vermicompostage par des souches locales d'*Eudrilus eugeniae* constitue une stratégie biologiquement régulée et potentiellement plus stable pour la valorisation des déchets et résidus organiques au Burundi, favorisant une activité hydrolytique soutenue et une maturation organique équilibrée.

Mots-clés

Vermicompostage, Compostage thermophile, *Eudrilus eugeniae*, Activité enzymatique, Déchets et résidus agro-industriels, Burundi

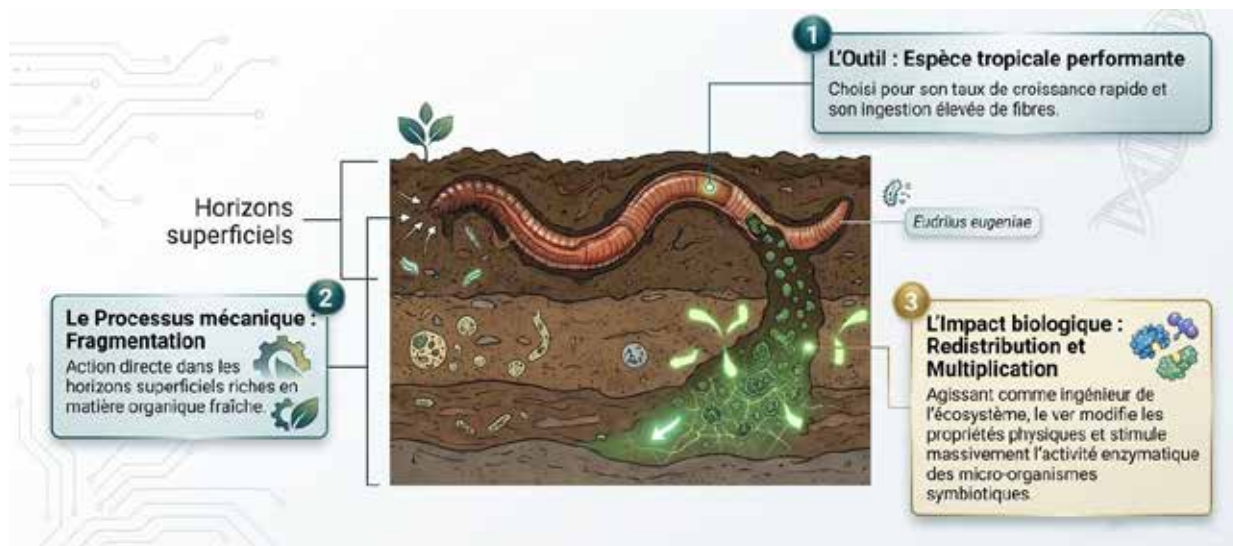


1. Introduction

La gestion durable des déchets organiques constitue un enjeu environnemental et agronomique majeur au Burundi. La pression démographique, l'intensification agricole et la diminution de la matière organique des sols compromettent la durabilité des systèmes de production. Dans ce contexte, la valorisation des résidus agro-industriels par compostage représente une stratégie clé pour renforcer la fertilité des sols et promouvoir une agriculture circulaire (Lal, 2015; FAO, 2017). Au Burundi, des déchets tels que les balles et pailles de riz, les fibres de palmier à huile, la bagasse de canne à sucre, le contenu digestif de bovins produit dans les abattoirs et le fumier de bovins constituent d'importants gisements organiques encore peu exploités.

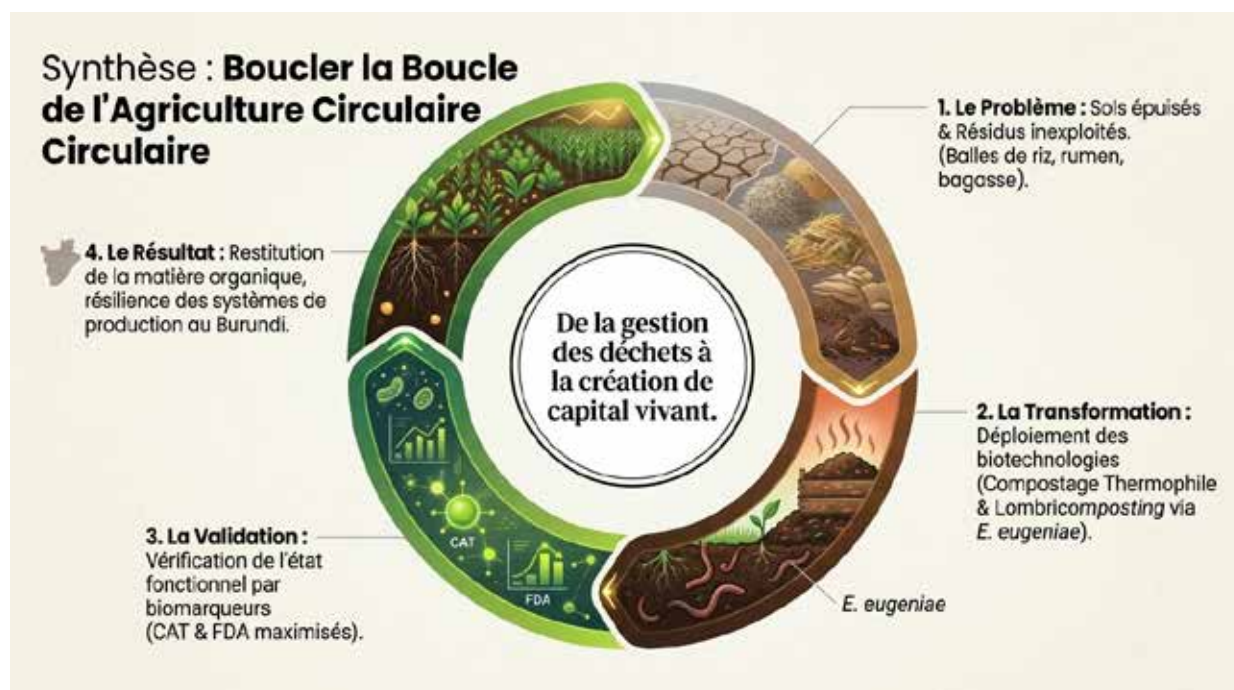
Le compostage thermophile ou traditionnel est un processus biologique aérobie caractérisé par une succession de communautés microbiennes spécialisées et par une élévation de température pouvant atteindre 55-70 °C (de Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983; Tuomela, Vikman, Hatakka, & Itävaara, 2000). Cette phase thermophile favorise la dégradation rapide des composés organiques labiles, assure l'hygiénisation du substrat et stimule la production d'enzymes extracellulaires telles que les cellulases, protéases et phosphatases (Insam & de Bertoldi, 2007; Ryckeboer et al., 2003). Toutefois, les températures élevées peuvent réduire temporairement la diversité microbienne et inactiver certaines enzymes thermosensibles, modifiant la dynamique biochimique globale du processus (Tiquia, 2005).

Le vermicompostage constitue une alternative biotechnologique intégrant l'activité conjointe des micro-organismes et des vers de terre épigés. Parmi les espèces tropicales les plus performantes figure *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867), largement utilisée dans les systèmes tropicaux pour sa capacité d'ingestion élevée, son taux de croissance rapide et son efficacité dans la transformation de substrats riches en fibres (Edwards & Bohlen, 1996; Domínguez & Edwards, 2011; Suthar, 2009). Ces vers de terre, agissant principalement dans les horizons superficiels riches en matière organique fraîche, exercent une fragmentation mécanique des particules, favorisent la redistribution et la multiplication des micro-organismes, et stimulent ainsi l'activité enzymatique (Aira, Monroy, Domínguez, & Mato, 2007; Domínguez et al., 2010). Par leur rôle de "ingénieurs de l'écosystème", ils modifient profondément les propriétés physiques, chimiques et biologiques des substrats (Lavelle et al., 1997; Lavelle et al., 2006).



Les enzymes jouent un rôle central dans la transformation de la matière organique, en catalysant les réactions biochimiques impliquées dans les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore (Burns, 1982; Dick, 1994; Nannipieri et al., 2012). L'activité enzymatique constitue un indicateur sensible de l'état fonctionnel des substrats, reflétant à la fois l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments (Mondini, Martin, & Pera, 2004). Dans ce contexte, la catalase (CAT) est une enzyme oxydative intracellulaire clé impliquée dans la décomposition du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), reflétant l'intensité de la respiration microbienne et l'aération du substrat (García, Hernández, Costa, & Ceccanti, 1993; Perucci, 1992; Tiquia, 2002). L'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA), quant à elle, fournit une mesure globale de l'activité enzymatique hydrolytique, intégrant les actions des estérases, lipases et protéases (Schnürer & Rosswall, 1982; Adam & Duncan, 2001).

Plusieurs études ont montré que le vermicompostage peut maintenir une activité enzymatique plus stable et souvent plus élevée que le compostage thermophile, en raison des conditions mésophiles constantes et de la stimulation microbienne induite par le transit intestinal des vers de terre (Aira et al., 2002; Suthar, 2009; Gómez-Brandón, Lazcano, Domínguez, & Insam, 2013). Cependant, ces dynamiques enzymatiques dépendent fortement de la nature des substrats, de leur composition lignocellulosique et du rapport carbone/azote initial, ainsi que de l'espèce de ver utilisée (Lazcano, Gómez-Brandón, & Domínguez, 2008; Singh, Ramesh, & Kumar, 2011). Au Burundi et dans d'autres contextes tropicaux africains, les données comparatives restent limitées, en particulier pour des souches locales adaptées aux conditions écologiques.



Dans ce contexte, comparer le compostage thermophile et le vermicompostage de déchets agro-industriels burundais est essentiel pour identifier les mécanismes biologiques dominants et optimiser la qualité agronomique des amendements produits. L'analyse conjointe de l'activité catalasique et de l'hydrolyse de la FDA permet d'appréhender la dynamique oxydative et hydrolytique des substrats, offrant une vision intégrée de la stabilisation organique.

La présente étude vise à comparer l'évolution de l'activité enzymatique durant le compostage thermophile et le vermicompostage de six types de déchets agro-industriels courants au Burundi en utilisant une souche locale d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867). L'hypothèse centrale est que le vermicompostage induit une régulation enzymatique plus homogène et plus stable que le compostage thermophile, favorisant ainsi une maturation biologique équilibrée et une meilleure qualité agronomique du produit final.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Zone d'étude et conditions expérimentales

L'étude a été conduite à Bujumbura (Burundi), située à environ 775 m d'altitude sur les rives du lac Tanganyika. Le climat est de type tropical chaud subhumide, avec une température moyenne annuelle comprise entre 23 et 25 °C et une pluviométrie moyenne avoisinant 800-1 000 mm, concentrée principalement entre octobre et avril. Les expérimentations ont été réalisées sous un hangar ventilé afin de protéger les dispositifs des précipitations directes et du rayonnement solaire excessif, tout en maintenant des conditions mésophiles favorables à l'activité biologique et au développement des vers de terre.

2.2. Collecte et caractérisation des substrats

Six différents déchets et résidus agro-industriels couramment produits au Burundi ont été sélectionnés. Ils ont été collectés frais dans différentes provinces du Burundi en fonction de la disponibilité locale des biomasses. La paille de riz (PR) et les balles de riz (BR) ont été collectées dans la commune de Gihanga, en commune Bubanza), les fibres de mésocarpe de palmier à huile (FP) au niveau d'une unité de production d'huile de palme, à Kanyenkoko en commune Rumong; le contenu digestif de bovins (CD) à l'abattoir public de Bujumbura, l'écume et la bagasse de canne à sucre dans la commune Rutana, au niveau du complexe sucrier de la Société sucrière du Moso, (SOSUMO), et le fumier bovin dans un système d'élevage de bovins, en commune de Bubanza. Les coordonnées géographiques des sites ont été enregistrées afin d'assurer la traçabilité des matériaux (Tableau 9.1).

Tableau 9.1



Localisation géographique des sites de collecte des déchets et résidus

Déchet	Commune et localité	Latitude Sud (°)	Longitude Est (°)
Paille de riz	Bubanza, Gihanga	3,193	29,312
Balles de riz	Bubanza, Gihanga	3,189	29,304
Fibres de palmier à huile	Rumonge, Kanyenkoko	3,986	29,437
Contenu digestif de bovins	Bujumbura (Abattoir)	3,365	29,386
Ecume et bagasse de canne à sucre	Rutana, Gihofi (SOSUMO)	4,027	30,156
Fumier bovin	Bubanza, Buringa	3,273	29,320

2.3. Préparation des substrats et phase de pré-compostage

La paille de riz a été broyée mécaniquement afin d'augmenter la surface spécifique d'attaque microbienne et d'améliorer l'homogénéité du mélange. Chaque type de déchet ou résidu a été mélangé individuellement avec du fumier bovin frais (25% en volume), utilisé à la fois comme agent inoculateur microbien et comme matériau structurant. La bagasse (75%) a été préalablement mélangée avec l'écume (25%), formant le mélange bagasse-écume (BEC). L'objectif de ces mélanges était d'ajuster le rapport carbone/azote initial dans une fourchette estimée entre 25 et 35, favorable au démarrage du processus de compostage.

L'humidité des mélanges a été ajustée à environ 70 % de la capacité au champ, déterminée par méthode gravimétrique. Les mélanges ont ensuite été disposés en tas distincts sur une surface imperméabilisée, humidifiés régulièrement et recouverts de bâches imperméables afin de limiter les pertes hydriques et les phénomènes de lessivage.

La phase de pré-compostage, assimilée au compostage thermophile initial, a été conduite pendant un mois. Cette période a permis la montée en température, la réduction des composés phytotoxiques potentiels et une stabilisation partielle des substrats, condition nécessaire avant l'introduction des vers de terre.

2.4. Dispositif expérimental de vermicompostage

A l'issue de la phase de pré-compostage, chaque substrat a été divisé en deux lots distincts. Le premier lot a poursuivi le processus en compostage traditionnel, tandis que le second lot a été transféré dans des bacs de vermicompostage à flux continu installés sous hangar. Une période d'acclimatation d'une semaine a été respectée avant l'inoculation afin de permettre la stabilisation thermique et l'adaptation des substrats.

Le vermicompostage a été réalisé à l'aide d'une souche sauvage locale de *Eudrilus eugeniae* collectée à l'abattoir de Bujumbura (3,365° S, 29,386° E) et préalablement acclimatée aux déchets et résidus pendant un mois. La densité d'inoculation a été fixée à 2 kg de biomasse fraîche par mètre carré de surface active. Les conditions expérimentales ont été maintenues dans une plage thermique de 24 à 30 °C, avec une humidité comprise entre 60 et 80 %, favorable à l'activité et à la survie des vers.

2.5. Plan d'échantillonnage et suivi temporel

Un suivi temporel a été mis en place afin d'évaluer la cinétique enzymatique des substrats en compostage traditionnel et en vermicompostage. Pour chaque type de substrat, aussi bien pour le lot en compostage et celui en vermicompostage, des échantillons composites de 200 g ont été prélevés à 30 jours, 60 jours et 90 jours, après le démarrage du suivi.

Chaque échantillon composite a été constitué à partir de prélèvements élémentaires réalisés en différents points (surface, milieu et profondeur) afin de garantir leur représentativité. Le prélèvement à 90 jours a été considéré comme correspondant à la phase de maturation.

2.6. Analyse de l'activité enzymatique

Les échantillons ont été transportés au laboratoire dans des conditions isothermes et analysés immédiatement après réception.

L'activité catalasique (CAT) a été déterminée par méthode titrimétrique basée sur la décomposition du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Une masse connue d'échantillon frais a été mise en contact avec une solution standardisée de H_2O_2 . Après un temps d'incubation déterminé, l'excès de peroxyde non décomposé a été titré à l'aide d'une solution de permanganate de potassium ($KMnO_4$). Les résultats ont été exprimés en quantité relative de H_2O_2 décomposé par unité de masse de substrat.

L'activité microbienne totale a été évaluée par la méthode d'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) selon le protocole adapté de Schnürer et Rosswall (1982). Le principe repose sur l'hydrolyse enzymatique de la FDA par les estérases, lipases et protéases présentes dans l'échantillon, libérant de la fluorescéine quantifiée par spectrophotométrie à 490 nm. Les résultats ont été exprimés en quantité de fluorescéine libérée par gramme de substrat.

2.7. Analyse des données

Les valeurs obtenues pour les activités enzymatiques ont été comparées entre compostage thermophile ou traditionnel (PC) et vermicompostage (VC), entre types de substrats et entre périodes d'échantillonnage. Une analyse comparative descriptive a été réalisée afin d'identifier les tendances évolutives et d'interpréter les variations observées comme indicateurs de la dynamique biologique et du degré de stabilisation organique.

3. Résultats

3.1. Activité hydrolytique globale (FDA)

L'activité hydrolytique globale, mesurée par l'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA), a montré des différences nettes entre le compostage thermophile et le vermicompostage pour tous les substrats étudiés (Tableau 9.2, Figure 9.1).

Tableau 9.2. Activité FDA en compostage thermophile et vermicompostage, exprimée en $\mu g\ g^{-1}\ MS\ h^{-1}$ à maturité (90 jours).

Déchet/résidu	Compostage thermophile	Vermicompostage
Balles de riz (BR)	0,01	0,46
Paille de riz (PR)	0,01	0,52
Bagasse-écume (BEC)	0,32	0,50
Fumier de bovins (FV)	0,00	0,42
Contenu digestif de bovins (CD)	0,53	0,49
Fibres de palmier (FP)	0,01	0,45

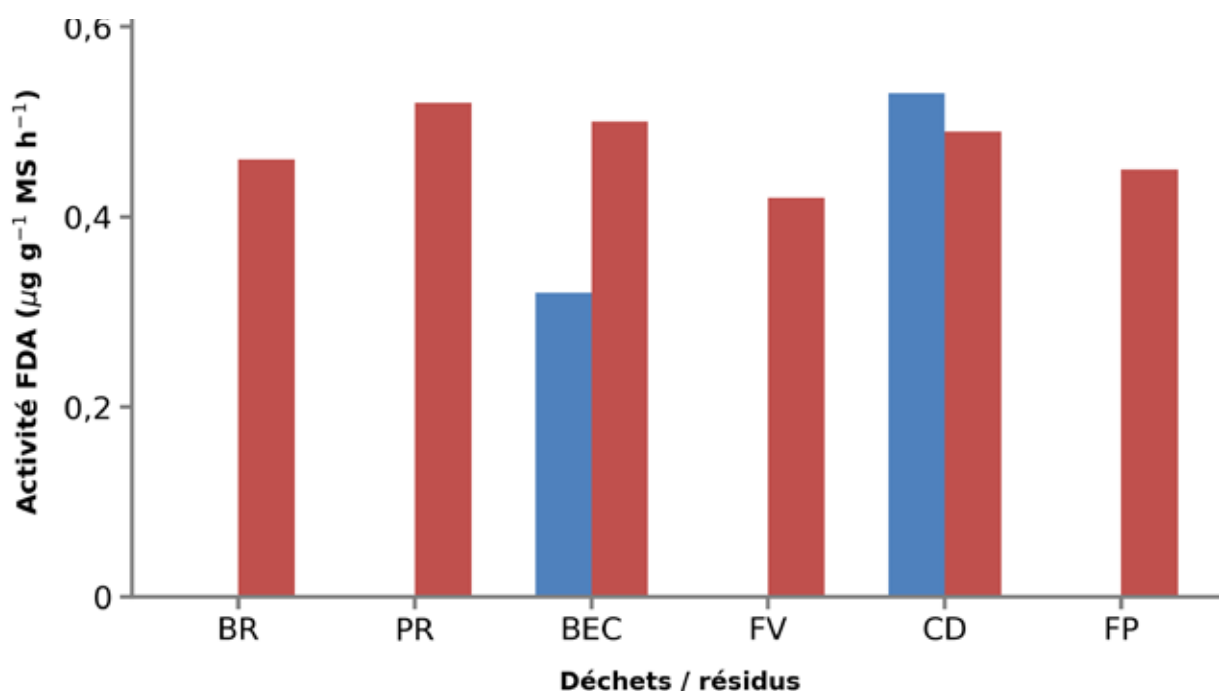


Figure 9.1 : Représentation graphique du profil de l'activité FDA en compostage thermophile et vermicompostage selon les déchets / résidus sous étude, après 90 jours d'incubation.

En compostage thermophile, les valeurs à maturité étaient très faibles pour les substrats lignocellulosiques : BR et PR ($0,01 \mu\text{g g}^{-1} \text{MS h}^{-1}$) et FP (0,01). Le FV était quasi nul (0,00). Le BEC affichait une activité modérée (0,32), tandis que le CD présentait la valeur la plus élevée (0,53), probablement en raison de sa richesse microbienne initiale.

En vermicompostage, l'activité FDA a été systématiquement stimulée pour presque tous les substrats, variant entre 0,42 et $0,52 \mu\text{g g}^{-1} \text{MS h}^{-1}$. Les valeurs les plus élevées ont été observées pour PR (0,52) et BEC (0,50), suivies de BR (0,46), FP (0,45) et FV (0,42). Seul le CD a montré une légère diminution par rapport au compostage thermophile (0,49 vs 0,53).

Cette homogénéisation en vermicompostage suggère un effet combiné du transit intestinal et de la fragmentation mécanique par *Eudrilus eugeniae*, favorisant l'activation enzymatique et la régulation de l'activité hydrolytique entre substrats contrastés.

3.2. Dynamique temporelle de l'activité catalasique (CAT)

L'évolution de l'activité catalasique a été suivie à 30, 60 et 90 jours (Tableau 3, Figure 2).

Tableau 3. Activité catalasique (CAT) des substrats en compostage thermophile et vermicompostage, exprimée en unités relatives en millilitres de KMnO_4 par gramme de matière sèche)

Déchets/résidus	Compostage thermophile			Vermicompostage		
	30 jours	60 jours	90 jours	30 jours	60 jours	90 jours
BR	0,00	0,80	0,49	0,39	0,36	0,23
PR	1,10	1,60	0,90	0,49	0,53	0,49
BEC	1,10	1,60	0,90	0,49	0,53	0,49
FV	1,10	0,90	0,49	0,53	0,49	0,00
CD	0,46	1,60	0,66	0,23	0,68	0,31
FP	0,43	0,96	0,83	0,83	0,53	0,19

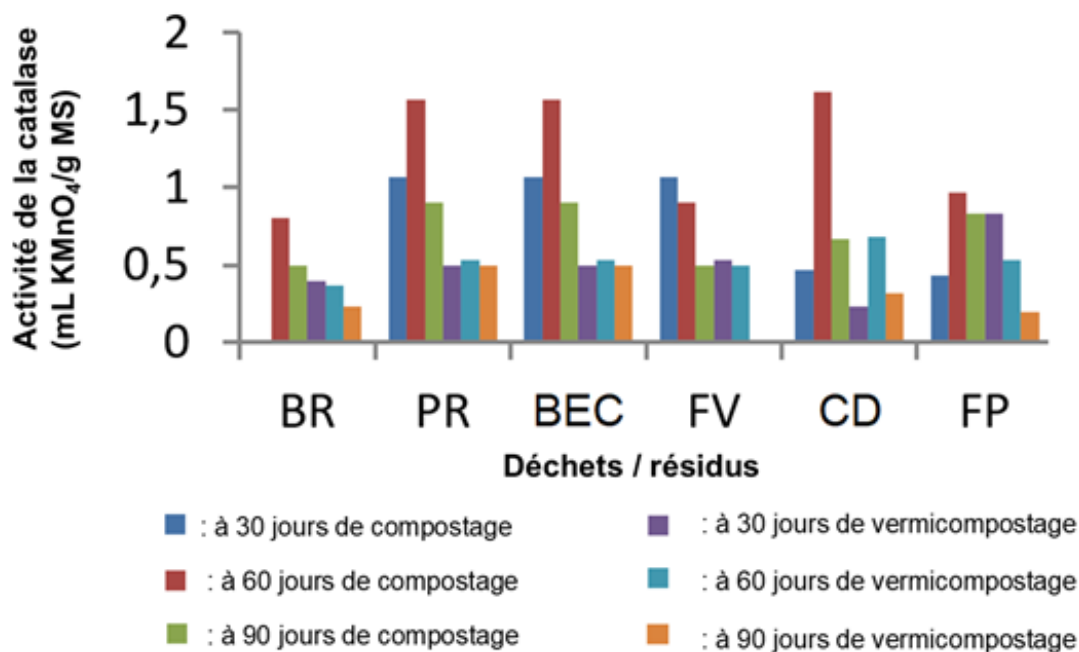


Figure 9.2. Représentation graphique de l'évolution de l'activité de catalase en fonction de la période et des déchets / résidus pendant le compostage *versus* vermicompostage

En compostage thermophile, les pics d'activité catalasique sont apparus à 60 jours pour la majorité des substrats, suivis d'une baisse à 90 jours (ex. PR : 1,10 → 1,60 → 0,90 ; BEC : 1,10 → 1,62 → 0,92). Cette dynamique reflète une intense activité microbienne oxydative suivie d'une stabilisation progressive.

En vermicompostage, les valeurs sont restées modérées et relativement stables dans le temps, traduisant une régulation biologique plus progressive de l'activité oxydative. Par exemple, BR : 0,39 → 0,36 → 0,23 et BEC : 0,51 → 0,54 → 0,50. Le CD a montré une augmentation à 60 jours (0,23 → 0,68) avant une légère diminution à 90 jours (0,31).

3.3. Comparaison globale entre procédés

La comparaison des deux procédés met en évidence des dynamiques enzymatiques distinctes :

- **Compostage thermophile** : activité oxydative intense mais transitoire, avec pics à 60 jours ; activité hydrolytique faible ou nulle pour les substrats lignocellulosiques pauvres en azote.
- **Vermicompostage** : activité catalasique modérée et stable ; activité hydrolytique systématiquement plus élevée et homogénéisée entre substrats.

Ainsi, le compostage thermophile favorise une dégradation rapide mais transitoire des composés labiles, tandis que le vermicompostage induit une régulation biologique plus stable, stimulant durablement les hydrolases et assurant une maturation organique équilibrée.

4. Discussion

4.1. Dynamique oxydative : interprétation de l'activité catalasique

L'activité catalasique (CAT) a montré des pics à 60 jours pour la majorité des substrats en compostage thermophile, suivis d'une diminution à 90 jours. Cette dynamique correspond à une phase d'intense activité microbienne oxydative, associée à la dégradation rapide des composés organiques labiles et à une respiration microbienne élevée (García et al., 1993 ; Tiquia, 2002). La baisse observée à 90 jours traduit une stabilisation progressive et une diminution du métabolisme microbien actif (Mondini et al., 2004 ; Bernal et al., 2009).

En vermicompostage, les valeurs catalasiques sont restées modérées et relativement stables, reflétant une régulation biologique progressive. Ce comportement peut s'expliquer par plusieurs mécanismes :

Le processus mésophile constant évite les fluctuations thermiques importantes, limitant les pics métaboliques transitoires.

L'activité mécanique et l'ingestion sélective des vers régulent la disponibilité des fractions organiques labiles (Aira et al., 2007 ; Domínguez et al., 2010).

Le transit intestinal redistribue les micro-organismes et fragmente les particules, augmentant la surface disponible pour l'action enzymatique tout en évitant une suractivation oxydative.

Ainsi, le vermicompostage induit une stabilisation enzymatique progressive, favorisant un processus de maturation organique régulé et équilibré.

4.2. Activité hydrolytique globale : stimulation par le vermicompostage

L'activité hydrolytique (FDA) a été systématiquement plus élevée en vermicompostage pour la majorité des substrats, à l'exception du contenu digestif de bovin. Cette stimulation reflète l'action combinée des vers de terre et des micro-organismes associés (Aira et al., 2002 ; Gómez-Brandón et al., 2013).

Le passage des substrats dans le tube digestif des vers favorise :

- La fragmentation mécanique et l'augmentation de la surface spécifique des particules.
- La redistribution et la multiplication des micro-organismes actifs.
- L'enrichissement des turricules en enzymes extracellulaires (Domínguez & Edwards, 2011).

Ces mécanismes expliquent l'homogénéisation des valeurs FDA entre substrats très contrastés (BR, PR, FP, BEC), atténuant l'influence des différences initiales de composition lignocellulosique. Le contenu digestif de bovin, riche en micro-organismes et enzymes digestives dès le départ, montre une stimulation moindre, ce qui souligne l'importance de la composition initiale des substrats.

4.3. Influence de la nature des substrats

La réponse enzymatique dépend fortement de la composition biochimique initiale des substrats :

- Les substrats lignocellulosiques pauvres en azote (BR, PR, FP) ont montré de faibles activités FDA en compostage thermophile mais une stimulation nette en vermicompostage.
- Les substrats riches en azote et micro-organismes initiaux (FV, CD) ont présenté une activité catalasique plus élevée dès les premières phases, traduisant une dégradation rapide des composés facilement biodégradables (Singh et al., 2011).

Ces observations confirment que l'efficacité du vermicompostage dépend à la fois de la composition initiale du substrat et de l'espèce de ver utilisée.

4.4. Implications biologiques et agronomiques

Les résultats démontrent que :

- Le compostage thermophile favorise une dégradation rapide mais transitoire des composés labiles.
- Le vermicompostage induit une stimulation homogène et durable des hydrolases, associée à une régulation progressive de l'activité oxydative.

Cette dynamique enzymatique équilibrée en vermicompostage est favorable à la humification, à la stabilisation des composés organiques et à la disponibilité prolongée des nutriments, améliorant ainsi la qualité agronomique du produit final (Lazcano et al., 2008 ; Lazcano & Domínguez, 2011).

Dans le contexte tropical du Burundi, où la dégradation rapide de la matière organique limite la fertilité des sols, l'utilisation d'une souche locale d'*Eudrilus eugeniae* constitue une stratégie adaptée, combinant régulation biologique et adaptation écologique.

Conclusion

Cette étude a comparé la dynamique enzymatique lors du compostage thermophile et du vermicompostage de six types de déchets et résidus agro-industriels burundais, en utilisant une souche locale d'*Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867).

Les principaux enseignements sont les suivants :

- (i) Compostage thermophile : activité catalasique intense mais transitoire, avec des pics à 60 jours, et activité hydrolytique faible ou quasi nulle pour les substrats lignocellulosiques pauvres en azote. Ce procédé favorise une minéralisation rapide des composés organiques labiles mais présente une régulation enzymatique limitée et peu stable dans le temps.
- (ii) Vermicompostage : activité catalasique modérée et stable, activité hydrolytique systématiquement plus élevée et homogénéisée entre substrats. Le transit intestinal et la fragmentation mécanique par les vers stimulent durablement les hydrolases, favorisant une maturation organique équilibrée et une régulation biologique progressive.
- (iii) Impact de la nature des substrats : les substrats riches en azote et micro-organismes initiaux (fumier et contenu digestif de bovins) montrent une activité enzymatique élevée dès le départ, tandis que les substrats lignocellulosiques pauvres en azote bénéficient particulièrement de l'action des vers dans le vermicompostage.
- (iv) Implications agronomiques : le vermicompostage avec des souches locales d'*Eudrilus eugeniae* constitue une stratégie durable et adaptée pour la valorisation des déchets organiques au Burundi, permettant d'obtenir un produit stable, riche en enzymes et en micro-organismes bénéfiques, et susceptible d'améliorer la fertilité des sols tropicaux.

En perspective, des analyses ciblant des enzymes spécifiques et une caractérisation chimique approfondie du compost et du vermicompost permettront de mieux comprendre les mécanismes biochimiques et de guider l'optimisation des procédés de valorisation des résidus agro-industriels au Burundi.

Cette étude s'est concentrée sur deux indicateurs enzymatiques globaux (CAT et FDA). Bien que pertinents, ils ne permettent pas d'identifier spécifiquement les enzymes responsables de la dégradation des fractions lignocellulosiques ou phosphatées.

Des analyses complémentaires ciblant cellulases, β -glucosidases, uréases et phosphatases, couplées à une caractérisation chimique détaillée (rapport C/N final, lignine résiduelle, humification), permettraient d'affiner la compréhension des mécanismes biochimiques.

De plus, l'intégration d'analyses statistiques plus poussées renforcerait l'interprétation des dynamiques enzymatiques et la généralisation des résultats à d'autres contextes agro-industriels du Burundi.

Bibliographie

- Adam, G., & Duncan, H. (2001). Development of a sensitive and rapid method for measuring total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) hydrolysis. *Journal of Microbiological Methods*, 44(2), 121-129.
- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., & Mato, S. (2002). How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure. *European Journal of Soil Biology*, 38(2), 7-11.
- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., & Mato, S. (2007). Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates. *European Journal of Soil Biology*, 43(1), 119-125.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453.
- Burns, R. G. (1982). Enzyme activity in soil: Some theoretical and practical considerations. *Soil Biology and Biochemistry*, 14(5), 423-427.
- de Bertoldi, M., Vallini, G., & Pera, A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Management & Research*, 1(2), 157-176.
- Dick, R. P. (1994). Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 107-124). Soil Science Society of America.
- Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.
- Domínguez, J., Edwards, C. A., & Aira, M. (2010). The biology and ecology of earthworms. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm ecology* (2nd ed., pp. 23-49). CRC Press.
- FAO. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- García, C., Hernández, T., Costa, F., & Ceccanti, B. (1993). Microbial activity during the composting of organic solid wastes of agroindustrial origin. *Biological Wastes*, 46(2), 145-160.
- Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., Domínguez, J., & Insam, H. (2013). Comparison of composting and vermicomposting: A review. *Process Biochemistry*, 48(9), 135-145.
- Insam, H., & de Bertoldi, M. (2007). Microbiology of the composting process. In G. Stentiford, K. K. Morgan, & C. M. Morgan (Eds.), *Composting and waste management* (pp. 25-48). Springer.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., ... & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4), 159-193.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42(S1), S3-S15.
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2008). Short-term changes in microbial activity during the stabilization of vermicomposts produced from animal manures. *Bioresource Technology*, 99(12), 5553-5560.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. *Soil Biology & Biochemistry*, 43(2), 223-233.

Mondini, C., Martin, C., & Pera, A. (2004). Composting of agro-industrial residues: Microbial activity and organic matter transformation. *Bioresource Technology*, 93(2), 111-118.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2012). Role of soil enzymes in maintaining soil quality. *Soil Enzymology*, 1-27.

Perucci, P. (1992). Catalase activity in composting and soil. *Compost Science & Utilization*, 1(3), 46-52.

Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., Clercq, D. D., Coosemans, J., ... & Swings, J. (2003). Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *Journal of Applied Microbiology*, 94(1), 127-137.

Schnürer, J., & Rosswall, T. (1982). Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(6), 1256-1261.

Singh, R., Ramesh, A., & Kumar, R. (2011). Influence of substrate composition and earthworm density on vermicomposting of lignocellulosic residues. *Waste Management*, 31(12), 2361-2368.

Tiquia, S. M. (2002). Microbial population dynamics in composting. *Compost Science & Utilization*, 10(3), 243-251.

Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itävaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology*, 72(2), 169-183.

