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

Analyse de l’évolution microbienne associée au processus de vermicompostage de différents types des résidus organiques collectés au Burundi

Ndirariha, Juvénal; sous la direction du : Dr. Prudence Bararunyeretse

2024-05
Ub, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2011

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT

CRSNE

ANALYSE DE L'EVOLUTION MICROBIENNE ASSOCIEE AU PROCESSUS DE VERMICOMPOSTAGE DE DIFFERENTS TYPES DES RESIDUS ORGANIQUES COLLECTES AU BURUNDI



Par

Juvénal NDIRARIHA

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Spécialité : Gestion des Ressources Naturelles

SOUS LA DIRECTION DE

Dr. Prudence BARARUNYERETSE

Bujumbura, Mai 2024

MEMBRES DU JURY

Président : Dr. Pierre NTAKIYIRUTA

Directeur : Dr. Prudence BARARUNYERETSE

Secrétaire : Dr. Ir. Lambert NIYOYITUNGIYE

Membre : Prof. Christophe NIYUNGEKO

DEDICACES

A mes parents

A mes frères et sœurs

A mon épouse

A mes enfants

A tous ceux qui s'interessent à l'échange scientifique

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Le présent travail est le fruit des efforts de plusieurs personnes envers lesquelles l'honneur m'échoit d'exprimer mes sincères reconnaissances. Je suis reconnaissant en premier lieu à Dieu Tout Puissant qui m'a prêté santé et force durant la réalisation du présent travail. Je suis également reconnaissant à tous ceux, qui, de loin ou de près ont conjugué leurs efforts en suivant mon éducation depuis le début de mes études jusqu'à la production de ce travail.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit du Dr. BARARUNYERETSE Prudence, Doyen de la faculté des Sciences et directeur du présent travail pour son encadrement, ses conseils scientifiques pendant la période qu'a durée ce mémoire.

Les mêmes remerciements vont également à l'endroit de tous les professeurs qui m'ont donné une formation digne et adéquate me permettant d'aborder ce sujet de mémoire. Leur encadrement académique m'a été d'une grande importance.

Je tiens également à remercier mes camarades étudiants de Master pour leur franche collaboration durant le cursus de formation, qu'ils trouvent ici leur reconnaissance.

Je tiens également à remercier Lieutenant colonel Dr. René NSABIMANA pour son soutien tant moral que matériel, son encouragement, des conseils scientifiques qu'il m'a donnés m'ont été d'une grande importance. Qu'il trouve ici ma reconnaissance.

Mes remerciements sont également adressés aux responsables et travailleurs du service d'expérimentation dans les différents laboratoires de microbiologie et surtout ceux du Veterinary Microbiology Laboratory ou Laboratoire National de Santé Animale du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage, du Bureau Burundais de Normalisation et de Contrôle de la Qualité ainsi que ceux des laboratoires de la Faculté des Sciences pour leur franche collaboration durant le déroulement des analyses.

Je serais ingrat de terminer mes remerciements sans exprimer ma sincère reconnaissance à l'Ambassade des Pays – Bas, qui, à travers l'IFDC, a financé le projet de recherche sur la « Valorisation Agricole des Déchets et Résidus Organiques à travers la Technologie de Vermicompostage ». Son appui tant matériel que financier a contribué dans la réalisation du présent travail. Que l'Ecole Normale Supérieure du Burundi touve sa reconnaissance pour avoir abrité le processus de verrmicompostage.

Pour tous, je dis merci.

Juvénal NDIRARIHA

RESUME

La plupart des sols des régions du Burundi restent peu productifs en raison de leur acidité et la carence en nutriments mais aussi en carbone organique qui caractérisent la plupart des sols cultivés au Burundi. Ces caractéristiques limitent sévèrement la productivité de beaucoup de cultures dans plusieurs régions du pays affectant ainsi la production nationale. Il existe cependant des déchets et résidus organiques potentiellement vermicompostables disponibles au Burundi. La valorisation de ces déchets et résidus organiques tels que la paille et balle de riz, écume et bagasse de canne à sucre, fumier de vache, contenu ruminal et épis et noix de palmier à huile en vermicompost s'avère une solution de sols peu productifs.

L'objectif global de cette étude est de contribuer à l'amélioration de la qualité du compost par la technique de vermicompostage. Dans ce processus, il existerait un microbiote associé aux vers de terre qui favoriserait la décomposition de la matière organique. Pour y arriver, une analyse qualitative et quantitative c'est-à-dire culture et dénombrement de colonies microbiennes a été réalisée. Cette analyse a été réalisée à différentes étapes du processus de vermicompostage aussi bien pour la flore totale, les microorganismes d'intérêts et les microorganismes pathogènes.

Les résultats de recherche ont rapporté le nombre de bactéries par gramme de vermicompost sec suivant : $6{,}25.10^{11}$ de balle de riz ; $7{,}12.10^{11}$ de paille de riz ; $5{,}28.10^{11}$ d'écume et bagasse de canne à sucre ; $5{,}72.10^{11}$ de fumier de vache; $4{,}22.10^{11}$ du contenu ruminal et $7{,}28.\ 10^{11}$ de fibres et épisde noix de palmier à huile. Les germes pathogènes et d'intérêts mis en évidence lors de cette étude sont répartis en deux groupes: les bactéries pathogènes: *Escherchia coli, Salmonnella, Staphylococcus, Streptococcus et Listeria* et les champignons pathogènes: *Cladosporium, Aureobasidium, Rhizomucor, Rhizopus et Geotrichum.* Les bactéries d'intérêts : *Bacillus,* et *Enterobacter,* les champignons d'intérêt: *Aspergillus, Penicillium, Mucor, Trichoderma* et *Fusarium*.

Au cours de la réalisation de cette étude, les analyses ont montré que beaucoup de différents types de microorganismes associés aux vers de terre, participent activement à la production d'un compost de qualité.

Mots clés: microbiote, vermicompostage, germes pathogènes, déchets organiques et sol acide.

ABSTRACT

Anywhere else in the world, acidic soil always remains unproductive. In Burundi, the low productivity of the soils in most of its regions is not only due to the acidity of the soils but also to their low content of nutrients and organic waste. However, there are many organic residues and many other biodegradable wastes coming from either agriculture or livestock, the recovery of which can generate compost rich in humus. Invasive plants like *Eichhornia crassipes*, *Lantana camara* and *Tithonia diversifolia* can also be transformed into compost.

With the aim of valorizing natural resources in order to have assured land production, a study entitled "Analysis of microbial evolution associated with the vermicomposting process of organic waste products: case of rice husk and straw; sugar cane scum and bagasse; cow manure; ruminal content and oil palm nut fiber and cobs" is carried out.

The overall objective of this study is to contribute to the improvement of compost using the vermicomposting technique. In this process there would exist a microbiota associated with earthworms which would promote the decomposition of organic matter. To achieve this, a qualitative and quantitative analysis, i.e. culture and enumeration of microbial colonies at different stages of the vermicomposting process, for the total flora, the microorganisms of interest and the pathogenic microorganisms, was carried out.

The research results reported the following number of bacteria per gram of dry vermicompost: $6.25.10^{11}$ rice husk; $7,12,10^{11}$ of rice straw; $5,28,10^{11}$ of sugarcane meerschaum and bagasse; $5,72,10^{11}$ of cow manure; $4.22.10^{11}$ of rumen content and $7.28.\ 10^{11}$ of oil palm fibre and nuts.

The pathogenic germs and germs of interest highlighted during this study are divided into two groups: pathogenic bacteria such as: *Escherchia coli*, Salmonnella, *Staphylococcus*, *Streptococcus* and *Listeria* and fungi such as *Cladosporium*, *Aureobasidium*, *Rhizomucor*, *Rhizopus* and *Geotrichum*. Bacteria of interest such as *Bacillus*, *Enterobacter* and *Klebsiella*. Fungi of interest such as *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Trichoderma* and *Fusarium*.

Taking into account this poorly exploited biomass, the authorities and structures competent in agroecology and organic agriculture, supported by researchers, should raise awareness and train the population on the vermicomposting technic.

Key words: microbiota, vermicomposting, pathogenic germs, organic waste and acidic soil.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i
DEDICACES ii
REMERCIEMENTS iii
RESUME iv
ABSTRACT v
TABLE DES MATIERES vi
SIGLES ET ABREVIATIONS ix
LISTE DES FIGURES x
LISTE DES TABLEAUX xi
AVANT PROPOS xii
0. INTRODUCTION 1
0.1. Contexte de la recherche 2
0.2. Problématique 3
0.3. Objectifs de la recherche 3
0.4. Hypothèses de la recherche 4
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE 5
I.1 Cadre conceptuel 5
I.1.1. Compostage 5
I.1.2. Vermicompostage 6
I.1.3. Vermiculture 6
I.1.4. Microbiote 6
I.1.5. Bacs à compost ou composteur 7
I.2. Généralités sur le compostage 7
I. 2. 1. Etat des lieux du compostage au Burundi 10
I.2.1.1. Compostage classique 10
I.2.1.2. Vermicompostage 10
I. 2.2. Acteurs principaux du compostage 11
I.2.2.1. Vers de terre 11
I.2.2.1.1. Mode de reproduction des vers de terre 12
I.2.2.1.2. Rôle des vers de terre dans le compostage 13
I.2.2.2. Bactéries 15
I.2.2.2.1. Bactéries PGPR 16
I.2.2.3. Champignons 17

I.2.2.4. Autres êtres vivants 17
I.2.3. Facteurs influençant l'activité microbienne au cours du compostage 18
I.2.4. Techniques de compostage 19
I.2.4.1. Principales phases du vermicompostage....20
I.2.5. Microorganismes et risques sanitaires. 21
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES....23
II.1. Matériel 23
II.1.1. Matière en compostage 23
II.1.1.1. Balle de riz 23
II.1.1.2. Paille de riz 24
II.1.1.3. Ecume et bagasse de canne à sucre 24
II.1.1.4. Fumier de vache 25
II.1.1.5. Contenu ruminal....25
II.1.1.6. Fibres et épis de noix de palmiier à huile 25
II.1.2. Matériel de laboratoire 27
II.1.2.1. Milieux de culture 27
II.2. Méthodologie adoptée....30
II.2.1. Intérêt et choix de la période d'étude....30
II.2.2. Collecte des échantillons bruts 30
II.2.3. Prélevement et préparation des échantillons....30
II.2.4. Analyse des échantillons 33
II.2.4.1.Ensemencement 33
II.2.4.2. Incubation 34
II.2.4.3. Protocole pour le comptage des colonies....34
CHAPITRE III. PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS 37
III.1. Présentation et analyse des résultats....37
III.1.1. Les germes totaux....37
III.1.2. Microorganismes pathogènes et d'intérêts....41
III.1.2.1. Bactéries....41
III.1.2.2. Champignons....42
III.2. Discussion des Résultats....43
III.2.1. Germes totaux.....43
III.2.1.1. Compost à base de balle de riz (BR)....43
III.2.1.2. Compost à base de Paille de riz (PR) 44
III.2.1.3. Compost à base d'écume et bagasse de canne à sucre 44
III.2.1.4. Compost à base de Fumier de vache. 44
III.2.1.5. Compost à base du contenu ruminal 45

III.2.1.6. Compost à base des fibres et épis de noix de palmier à huile 45
III.2.2. Germes pathogènes et d'intérêts 45
III.2.2.1. Bactéries 45
III.2.2.2. Champignons 46
CHAPITRE IV. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 48
IV.1. Conclusion 48
IV.2. Recommandations 49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 50
ANNEXES 55

SIGLES ET ABREVIATIONS

AB : Agriculture Biologique

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ASPESA : Australian and South Pacific external Studies Association

BBN : Bureau Burundais de Normalisation et de Contrôle de la Qualité

BR : balle de riz

CEC : Capacité d'échange de cations

CFN : Centre Floristique National

CR : Contenu ruminal

EBCS : écume et bagasse de canne à sucre

EM : Effectives microorganisms

ENS : Ecole Normale Supérieure

FENPH : Fibres et épis de noix de palmier à huile

FV : Fumier de vache

IFDC : Internatinal Fertilizer development Center

ISO : International standard organisation

JIRCAS : Japan International Research Center for Agricultural Sciences.

MINEAGRIE: Ministère de l'environnement, de l'agriculture et de l'élevage

MO : Matière organique

ODECA : Office pour le dévelopement du café du Burundi

OGM : Organisme génetiquement modifié

OLENTICA : Societé spécialisée dans le diagnostique des émissions gazeuses et des odeurs.

PCA : Plate Count Agar

PDA : Potato Dextrose Agar

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

PR : paille de riz

PRO : Produit Résiduaire organique

PRRVE : prévention, réemploi, recyclage, valorisation et élimination

SOSUMO : Societé Sucrière du Moso

VML : Veterinary Microbiology Laboratory

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Exemple de bac à compost ou composteur 7
Figure 2. Position de reproduction des vers de terre 13
Figure 3. *Eisenia foetida* et la localisation de son clitellum 13
Figure 4. Courbe de croissance des bactéries 16
Figure 5. Différentes phases du processus de compostage au cours du temps selon l'évolutionnde la température 21
Figure 6. Compost à base de balle de riz 24
Figure 7. Compost à base de paille de riz 24
Figure 8. Compost à base d'écume et bagasse.....25
Figure 9. Compost à base de fumier de vache 25
Figure 10. Compost à base du contenu ruminal.....25
Figure 11. Compost à base des épis et noix de palmier à huile 26
Figure 12. Amendement des vermicomposteurs 26
Figure 13. Inoculation des vers de terre dans les composteurs 27
Figure 14. Schéma du mode opératoire de recherche des Salmonella 29
Figure 15. Echantillon de vermicompost humide (A), séché (B) et en solution (C) 31
Figure 16. Technique de dilution (en bas) et Photo de l'auteur (en haut). 32
Figure 17. Protocole générale d'analyse 33
Figure 18. Stérilisation pendant l'ensemencement 34
Figure 19. Boîte de pétri divisée en 4 quadrants lors du comptage du nombre de colonies 36
Figure 20. Evolution du microbiote dans les six types de composts.....40
Figure 21. Boîtes de pétri contenant des champignons 41
Figure 22. Boîtes de pétri contenant des bactéries 41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Dénombrement des colonies à T_0.....37
Tableau 2. Dénombrement des colonies à T_{15}.....37
Tableau 3. Dénombrement des colonies à T_{30}.....38
Tableau 4. Dénombrement des colonies à T_{60}.....38
Tableau 5. Dénombrement des colonies à T_{90}.....38
Tableau 6. Dénombrement des colonies à T_{120}.....38
Tableau 7. Présentation condensée des UFC.10^{12} des six types de MO.....39
Tableau 8. Germes pathogènes et d'intérêts d'origine bactérienne.....42
Tableau 9. Germes pathogènes et d'intérêts d'origine fongique.....42

AVANT PROPOS

La préoccupation de notre travail de recherche est de fournir l'information scientifique et technique nécessaire au développement durable à travers la technologie de vermicompostage. Au Burundi, la technologie de vermicompostage est récente.

Une autre ambition est d'arriver à des résultats qui reflètent au mieux la valeur des vers de terre du Burundi et le microbiote y associé dans le processus de dégradation de la matière organique en vue de produire un compost de qualité.

Etant donné que les sols de la plupart des régions du Burundi sont caractérisés par une acidité, pauvreté en matières organiques avec une faible activité microbienne, la présente recherche vise à résoudre ce problème. La résolution se fera par des essais visant une combinaison optimale des amendements organiques et minéraux. Des études récentes ont montré l'effet positif de cette combinaison.

La valorisation des produits résiduaires organiques par la technique de vermicompostage peut significativement contribuer à remédier au problème de faible productivité. Ainsi, l'usage des vers de terre et le suivi de l'évolution du microbiote y associé durant le processus de vermicompostage, produit un vermicompost riche en humus. Le rendement agricole dépendra dans du compost, du sol et de l'interaction entre les deux pour donner enfin un produit final de valeur riche en humus, le vermicompost. Ce produit augmente la productivité agricole.

0. INTRODUCTION

Partout ailleurs au monde, un sol à caractère acide reste toujours peut productif. Au Burundi, la faible productivité des sols de la plupart de ses régions n'est pas seulement due à l'acidité des sols mais également à leur faible teneur en nutriments et en déchets organiques qui contribuent à la fertilité du sol.

Cependant, il existe beaucoup de résidus organiques et bien d'autres déchets biodégradables provenant soit de l'agriculture, soit de l'élevage dont leur valorisation peut générer un compost riche en humus. On citerait entre autre le palmier à huile.

Le palmier à huile possède des résidus organiques après sa récolte. Ces matières biodégradables peuvent être valorisées en les transformant en un compost par le processus de vermicompostage. Il est maintenant admis que le palmier à huile est d'origine africaine et que le foyer se trouve vraisemblablement le long du golfe de Guinée, une région où l'on trouve encore des palmeraies naturelles spontanées très étendues. On distingue les palmeraies naturelles, les palmeraies naturelles aménagées et les palmeraies sélectionnées **(Surre et Ziller, 1960)**. *Elaeis guineensis* est le plus important et le plus répandu, suivi de *Elaeis melanococca* qui se rencontre dans le nord de l'Amérique du sud en peuplements spontanés **(Memento de l'agronome, 1993)**

Une meilleure gestion des déchets des huileries de palme à travers la fabrication et l'utilisation du compost permet d'accroître durablement la production d'huile de palme. Elle permet également d'améliorer la productivité agricole des terres et les propriétés physiques et chimiques du sol. Elle assure une bonne fertilité au sol, en maintenant un bon taux d'humidité du sol à travers une meilleure structure et un régime hydrique. Une bonne gestion des déchets maintient une activité microbiologique favorable et un rapport chimique équilibré en éléments nutritifs **(Igué et al, 2008).**

Mais ce choix de valorisation demande une bonne planification du producteur **(Tatiana Windékpè, 2020).**

Cependant, la population burundaise utilise encore du compost classique. Les conditions de production de ce compost classique ne sont pas controlés et par conséquent, un compost qui en résulte n'est pas suffisamment riche en humus**.**

Le vermicompostage est une technologie faisable à petite, moyenne et grande échelles. Le développement durable de la technologie de vermicompostage a des exigences. Il exige entre-autre une disponibilité de vers de terre performants et de matières organiques qui

permettent la production d'un vermicompost de qualité ; un savoir-faire en vermiculture et en vermicompostage mais aussi une maîtrise du mode d'emploi du vermicompost.

0.1. Contexte de la recherche

Le contexte du présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la production d'un compost de qualité. Ce compost sera produit par recyclage des déchets organiques à travers la technologie de vermicompostage. Le vermicompost joue un rôle important dans le domaine agricole. C'est dans cette optique que la réutilisation en agriculture de la matière organique obtenue par vermicompostage apparaît comme une voie intéressante de gestion et de valorisation des déchets d'origine organique.

Les sols sont grouillants de vie. Cette vie est essentielle notamment pour assurer les cycles de nutriments dans les écosystèmes. Les résultats des études faites sur les sols laissent entendre que les bactéries et les champignons sont en constante compétition pour les nutriments. Et ces microorganismes produisent un véritable arsenal d'antibiotiques destinés à prendre l'avantage l'un sur l'autre **(Mayer, 2018).**

Un seul gramme de terre contient des milliers de milliards de ces micro-organismes. Ils transforment d'innombrables substances en nutriments pour les plantes, les animaux et les hommes. Ils sont en d'autres mots la base de toute forme de vie **(Norme Iso 657-1 de 2001).** Des résultats obtenus en analysant près de 60.000 échantillons de sol collectés sur quelques 1.450 sites répartis dans le monde entier, mais sélectionnés pour être vierges d'activité humaine ont montré que les sols plus riches en champignons présentent une diversité bactérienne moindre. (**Finstein et Morris, 1975).**

Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a reconnu l'importance de la biodiversité souterraine, clé de l'agriculture durable, de la biodiversité de surface et de l'économie mondiale **(Munroe, 2004).**

Dans l'optique de doter au sol un pouvoir de rétention des éléments nutritifs, le rendre efficacement productif et non pollué, le recourt au vermicompostage est une méthode naturelle et écologique permettant de recycler les déchets organiques en un compost riche et nutritif pour ce sol. Le compost sera dans ce cas une solution efficace pour non seulement la réduction des déchets mais aussi pour la nutrition écologique du sol. Cet engrais naturel permet de fertiliser les sols et d'améliorer la qualité de l'air **(Rouelle, 1984).**

0.2. Problématique

Le Burundi est un pays dont la plupart de ses régions sont caractérisées par des sols acides. Cette acidité du sol limite la productivité **(Hicintuka** et **Mulungula, 2013).**

La production émanant de l'agriculture et de l'élevage laisse des produits résiduaires organiques tels que balle et paille de riz, écume et bagasse de canne à sucre, contenu ruminal, fumier de vache, épis et noix de palmier à huile, paille de blé, épis de maïs, restes des amarantes, restes des pastèques, restes des tomates,…

Ces déchets organiques ne sont pas bien gérés. On les trouve éparpillés au niveau des marchés en ville, au sein des ménages sous forme de tas et peuvent d'une manière ou d'une autre être source de maladies. Pour remédier au problème de besoin alimentaire, la population fait recourt aux engrais chimiques dans leur agriculture **(Hicintuka** et **Mulungula, 2013).**

D'une manière général, l'utilisation des engrais organiques naturels sont plus avantageux que les engrais chimiques

Tenant compte de ce problématique, une étude intitulée **«***Analyse de l'évolution microbienne associée au processus de vermicompostage de différents types des résidus organiques collectés au Burundi* **»** a été réalisée.

0.3. Objectifs de la recherche

L'objectif global du présent travail est de contribuer à l'amélioration de la qualité du compost par la technique de vermicompostage en vue d'augmenter la production agricole. La qualité hygiénique du vermicompost produit, le suivi régulier de l'évolution des microorganismes et autres acteurs décomposeurs au cours du vermicompostage contribueraient à l'amélioration de ladite technique.

Pour atteindre cet objectif, des objectifs spécifiques doivent être atteints :

Objectif 1. Analyser et interpréter l'évolution microbienne du processus de vermicompostage;

Objectif 2. Mettre en évidence le rôle du ver de terre dans la production du compost et sa régulation microbienne ;

Objectif 3. Mettre en évidence le rôle des bactéries associées aux vers de terre pendant le compostage ;

Objectif 4. Identifier les microorganismes pathogènes et d'intérêt du vermicompost et vérifier son innocuité microbiologique.

Objectif 5. Déterminer un pic de croissance microbienne au cours du processus de vermicompostage

0.4. Hypothèses de la recherche

Tenant compte du processus de vermicompostage et différents acteurs participant dans la décomposition de la matière organique, on peut penser aux hypothèses suivantes :

- Dans un processus de vermicompostage, l'évolution de la population microbienne dépend de la nature de la matière organique.
- Le ver de terre régule la population microbienne lors du vermicompostage.
- Les bactéries associées au processus de vermicompostage sont en relation de symbiose avec les vers de terre.
- Un vermicompost mature contient peu ou pas de bactéries pathogènes.
- Il existe un pic de croissance microbienne au cours du processus de vermicompostage

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE

I.1 Cadre conceptuel

I.1.1. Compostage

Le compost est le résultat de la décomposition de matières organiques contenant du carbone et de l'azote à travers un processus naturel dû à l'action de microorganismes, de l'air et de l'eau ce qui permet de les utiliser aisément pour les cultures **(Caldwell, 2012)**. En passant par ce processus, on peut valoriser des déchets tels que les résidus de culture, les déjections animales, les déchets ménagers et autres matières biodégradables. L'engrais naturel qui en résulte peut être utilisé pour fertiliser les sols, améliorer leur structure ainsi que la qualité de l'air **(Alfred et Michel, 2020)**. Ainsi, ce processus de transformation des produits résiduaires organiques, le compostage, est une excellente solution pour réduire non seulement ces déchets organiques, mais aussi pour les valoriser dans l'optique d'améliorer la qualité du sol et des jardins.

Il serait difficile d'arriver à donner une définition précise et rapide du compostage car selon le point de vue utilisé, les objectifs et les caractéristiques qui lui sont alors attribués varient. D'après la définition du dictionnaire, le compostage correspond à « l'action de faire fermenter en présence d'air, des matières organiques » **(Alfred et Michel, 2020)**.

L'équation du compostage s'établit : $C_6 H_{10} O_5 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 5 H_2 0$ + chaleur.

Or, le phénomène prend une dimension plus complexe : il s'agit alors de « la décomposition biologique et la stabilisation des substrats organiques dans des conditions qui permettent le développement de températures thermophiles, résultat d'une production calorifique d'origine biologique, avec obtention d'un produit final suffisamment stable pour le stockage et l'utilisation sur les sols sans impacts négatifs sur l'environnement.» Selon cette seconde définition, le compostage est donc avant tout une technique de stabilisation et de traitement des déchets organiques. **(Loveland et Webb, 2003).**

Pour d'autres encore, c'est une opération qui consiste à faire fermenter en présence de l'oxygène de l'air des déchets organiques pour obtenir un amendement riche en humus : composter correspond donc essentiellement à la production d'humus stables.

Et finalement, le compostage peut se définir simplement come «une méthode naturelle et écologique permettant de recycler les déchets organiques en un compost riche et nutritif pour les sols.**(Deneuville, 2022)**. Le compostage est un processus biologique contrôlé de

conversion et de revalorisation des substrats organiques en un produit organique stable, hygiénique, semblable à un terreau riche en composés humiques que 1'on nomme Ie compost **(Philippe, 1997).** Dans la majorité des cas, le compostage est Ie fruit d'une activité microbienne aérobie intense.» **(Killham, 1993).**

I.1.2. Vermicompostage

Le vermicompostage, aussi appelé lombricompostage, désigne la transformation des déchets organiques par les vers de terre. Il s'agit d'un processus aérobie naturel et inodore qui est très différent du compostage conventionnel.

Les vers de terre ingèrent les déchets organiques puis excrètent du fumier foncé, sans odeur et fertile, ainsi que des granules de boue riches en matières organiques. **(Chaoui, 2022).**

I.1.3. Vermiculture

La vermiculture également appelée lombriculture est l'élevage intensif en conditions contrôlées de vers de terre épigés, commercialement développée depuis les années 1980. **(Rouelle, 1984).** Ces vers, grâce aux bactéries symbiotiques abritées par leur intestin peuvent manger jusqu'à une fois leur poids par jour. Ils réduisent le volume des déchets organiques de 40 % à 60 %. Et 50 % de ce qu'ils ont ingéré est excrété sous forme de déjections **(Adhikary, 2012).** Ces derniers peuvent ensuite être vendus pour divers usages **(Bedon, 1986).** C'est un moyen simple de composter des déchets tout en permettant d'améliorer le sol des jardins et des potagers, via le lombricompost très apprécié des jardiniers **(Collaert, 2009)** et parfois qualifié d'« *or noir* » **(Milliet, 2015).**

À l'échelle domestique ou d'une collectivité, le vermicompostage permet notamment de transformer ses déchets de cuisine ou d'autres restes des matières organiques comme les pailles de riz, balles de riz, épis et noix de palmier à huile, les amarantes,… en un compost et de produire un engrais organique naturel qui nourrit écologiquement le sol.

I.1.4. Microbiote

Le microbiote est l'ensemble des microorganismes comme les bactéries, les virus, les parasites et champignons non pathogènes, dits commensaux qui vivent dans un environnement spécifique. Ce microbiote aide les vers de terre dans le processus de la dégradation de la matière organique, la transformant ainsi en un compost riche en humus nutritif pour les plantes **(Dorain, 2015).**

I.1.5. Bacs à compost ou composteur

Le bac à compost est un dispositif dans lequel se fait le compostage. Il peut être monté à partir de divers matériaux **(figure 1)**.



Figure 1. Exemple de bac à compost ou composteur (**Photo prise à l'ENS, 2023**)

I.2. Généralités sur le compostage

L'accroissement continu de la population a conduit à une explosion de la quantité de déchets, qui représente actuellement un véritable défi social, économique et environnemental **(Sharma et Jain, 2020).**

En France, les obligations de valorisation des déchets sont apparues grâce à la loi du 13 juillet 1992 (LOI no 92-646) qui redéfinit le déchet non plus comme un résidu à l'abandon de son détenteur, mais comme une ressource. De plus, la directive européenne (2008/98/CE) a proposé en 2008 d'hiérarchiser la gestion des déchets dans l'ordre suivant : **prévention**, **réemploi**, **recyclage**, **valorisation** et **élimination** (PRRVE). Cependant, certains déchets comme les déchets organiques, bien qu'ils puissent être réduits dans le cadre du campagne anti-gaspillage, seront toujours présents.

Les besoins alimentaires ne cessent d'augmenter parallèlement à la croissance démographique à l'échelle mondiale ce qui nécessite d'accroître la production agricole tout en limitant notre impact sur l'environnement **(Rayfuse et Weisfelt, 2012)**.

L'agriculture intensive basée sur de nombreux intrants a montré ses limites notamment sur le plan environnemental. En effet, la révolution verte a permis une augmentation des rendements mais également une accélération de nombreux processus de dégradation des sols

tel que l'érosion, le tassement, la contamination ou encore la perte de biodiversité **(Bünemann et al., 2018).**

De plus, la production d'engrais minéraux n'est pas durable car elle est limitée par l'extraction de ressources non renouvelables comme le phosphore minéral, ce qui pose actuellement de nombreuses questions sur l'agriculture mondiale **(Chowdhury et al., 2017)**.

Ainsi, pour répondre à nos besoins de manière durable, il est nécessaire de développer et de promouvoir une agriculture viable et durable sur le long terme **(Lichtfouse et al., 2009)**.

Récemment, grâce à la prise de conscience internationale sur les enjeux environnementaux, de nombreux concepts d'agricultures plus durables tels que l'agriculture biologique ou l'Agroécologie qui est définie dans le dictionnaire comme un « ensemble des méthodes de production agricole respectueuses de l'environnement » ont vu le jour. Cependant, même dans les modèles plus vertueux d'agriculture, la gestion des déchets organiques qui en découlent directement c'est-à-dire les déchets organiques agricoles ou indirectement , déchets organiques issus de la consommation humaine ou animale reste un défi majeur pour le développement durable au 21ème siècle **(Wilson et al., 2015)**.

Historiquement, l'agriculture s'est largement développée à partir des déchets organiques des villes, mais en raison du développement de l'industrie chimique et agroalimentaire au 20ème siècle, ces déchets n'intéressaient plus les agriculteurs **(Barles, 2014)**.

Le développement des engrais de synthèse a facilité l'agriculture car ils sont directement accessibles aux plantes ce qui limite l'effet du climat sur les cultures. Le lien entre les déchets organiques urbains et l'agriculture n'est donc pas un concept moderne mais il a été largement oublié suite à l'intensification de l'agriculture et l'explosion de l'urbanisation **(Béguin, 2013)**. En effet, les pratiques agricoles se sont standardisées autour de pratiques normalisées telles que l'utilisation d'engrais N-P-K **(Kibblewhite et al., 2008).**

La spécialisation des exploitations a conduit à une répartition des activités par secteur et par région. Par exemple, **Martin et al. 2018)** ont noté que les déchets des animaux tels que le fumier sont concentrés dans certaines régions du monde ou dans certaines régions comme la Bretagne à l'échelle de la France, ce qui peut entraîner une pollution potentielle, tandis que d'autres zones agricoles manquent de matière organique pour nourrir leurs sols.

Ainsi, ces deux phénomènes ont créé un paradoxe autour de la MO qui est insuffisamment présente dans les campagnes tandis que les villes ont développé des gestions non durables

de leurs biodéchets. Néanmoins, il est possible de restaurer ce lien ville/campagne grâce aux principes de l'économie circulaire et du circuit court tout en diminuant notre impact sur l'environnement. La MO des villes pourrait être valorisée pour être réutilisée dans l'objectif d'augmenter la production tout en préservant la qualité des sols **(Walter et al., 2015)**.

Ensuite la production pourrait servir d'alimentation directe aux habitants des villes et les déchets issus de cette consommation retourneraient à nouveau au sol et ainsi de suite. La valorisation des déchets organiques représente donc un énorme défi pour la gestion circulaire des déchets, qui vise à retourner la MO au sol afin de "boucler la boucle" et ainsi économiser et gérer efficacement les ressources naturelles et réduire notre impact sur l'environnement **(Ghisellini et al., 2016).**

Pour gérer les déchets organiques de manière durable, il est nécessaire de les soustraire aux modes de gestion et de traitement tels que l'incinération et/ou la mise en décharge afin de favoriser des processus de transformation plus vertueux. De plus, **(Bortolotti et al. 2018)** ont montré, à travers différents modèles que la gestion décentralisée des déchets organiques urbains à différentes échelles est une alternative prometteuse aux installations industrielles centralisées. Il existe de nombreuses techniques disponibles pour la valorisation des déchets organiques. Dans sa revue, **(Lohri et al. 2017)** les classe en 4 catégories différentes :

(i) utilisation directe (épandage direct, alimentation animale directe ou combustion directe),
(ii) traitement biologique (compostage, vermicompostage, traitement par larve de mouche soldat noire, digestion anaérobie, fermentation),
(iii) traitement physico-chimique (transestérification, densification) et
(iv) traitement thermochimique (pyrolyse, liquéfaction, gazéification).
Les produits issus du recyclage des déchets organiques d'origine urbaine qui ont vocation à être valorisés en agriculture sont une partie de ce qu'on appelle les produits résiduaires organiques (PRO) **(Houot et al., 2014).** La technique du vermicompostage représente une opportunité très intéressante, bien qu'elle soit très peu étudiée en général. En effet, ce processus utilisant des vers de terre pour valoriser les biodéchets a fait ses preuves dans de nombreuses régions du monde (Asie, Cuba, Australie etc…) **(Appelhof et al., 1996).**

Cependant, bien que cette pratique soit émergente au Burundi, elle est encore très peu utilisée et évaluée malgré son potentiel d'amélioration des sols en termes de fertilité, de rendement agronomique, de nutritionn des sols et de maintien de la biodiversité des terres **(Adhikary, 2012).**

Le vermicompost peut être particulièrement intéressant dans les systèmes en agriculture biologique (AB) de type grande culture. En effet, le cahier des charges de l'AB issu du règlement européen du conseil n°2092/91 repose sur l'interdiction d'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse, d'organismes génétiquement modifiés (OGM) et limite l'usage des intrants **(Leroux, 2015).**

Historiquement, l'AB s'est orientée vers l'utilisation de MO pour fertiliser les sols et est ainsi appelée « Organic Farming » en anglais. Toutefois, de plus en plus d'agriculteurs se spécialisent dans les cultures en AB en dehors du modèle de polyculture. Cela engendre un manque de MO dans ces systèmes spécialisés en AB. Le vermicompost issu des déchets organiques semble être ainsi une piste intéressante pour remédier à ce problème.

I. 2. 1. Etat des lieux du compostage au Burundi

I.2.1.1. Compostage classique

La population burundaise crée le plus souvent des fosses pour y mettre des restes des récoltes, des épluchures et bien d'autres matières organiques facilement décomposables. Le compostage en fosse est la méthode classique de compostage utilisée au Burundi et en particulier dans la région de Mugamba et de Bututsi. Deux compostiers de $2 \times 1 \times 1\,m$ sont le plus souvent installés et la durée de compostage est d'environ 4 mois. La population y met de la matière organique provenant de plusieurs sources **(Van den Berghe et al, 1992).**

I.2.1.2. Vermicompostage

L'existence des matières potentiellement vermicompostables mais aussi des vers de terre au Burundi, semble offrir une opportunité de développer le vermicompostage à grande échelle au Burundi.

Cependant, bien que cette pratique soit émergente au Burundi, elle est encore très peu utilisée et évaluée malgré son potentiel d'amélioration des sols en termes de fertilité, de rendement agronomique, de nutritionn des sols et de maintien de la biodiversité des terres. **(Van den Berghe et al, 1992)**.

Le vermicompostage est une méthode d'utilisation des vers en vue de transformer des matières organiques en une matière très semblable à l'humus ou au terreau connu sous le nom de lombricompost ou vermicompost **(Munroe, 2004)**.

L'objectif du vermicompostage est le traitement le plus rapide et le plus efficace possible des matériaux. On estime à 1800 le nombre d'espèces de vers de terre, mais parmi toutes ces

espèces, un nombre restreint est capable de jouer le rôle de vermicompostage **(Edwards et Lofty, 1972).**

La principale activité des vers de terre consiste à ingérer du sol, à mélanger différentes composantes du sol et à produire du fumier en surface, convertissant ainsi la matière organique en humus du sol **(Ansari et Ismail, 2012)**. Les vers de terre jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique et le métabolisme du sol par l'alimentation, la fragmentation, l'aération, le renouvellement et la dispersion **(Shuster, Subler et Mccoy, 2000)**. Dans les conditions idéales, les lombrics peuvent consommer pratiquement toutes sortes de matières organiques et ils peuvent manger l'équivalent de leur propre poids par jour. Par exemple, des vers de terre pesant 1 kg peuvent consommer un kilogramme de résidus tous les jours **(FAO, 2005).**

I. 2.2. Acteurs principaux du compostage

Différents microorganismes sont capables de produire différentes enzymes et donc de dégrader différents types de matières organiques. Ce sont des décomposeurs constituant une plaque tournante de flux de carbone et de nutriment dans le sol **(Dorain, 2015)**.

Les êtres vivants du compost sont en fait les mêmes que ceux constituant la faune du sol, appelée pédofaune. Ils sont organisés en une extraordinaire chaîne alimentaire composé d'un nombre incalculable d'organismes. Cette biodiversité représente 26% des espèces connues de la planète. La différence principale entre la biodiversité du sol et celle du compost étant la concentration elevée des organismes dans le compost (**Finstein et Morris, 1975).**

I.2.2.1. Vers de terre

Le ver de terre, *Eisenia foetida,* également connu sous les noms de «ver du fumier», «ver du compost», «ver du terreau», «ver composteur», «ver zébré», «ver rouge» est un ver anécique, ubiquiste, extrêmement résistant et indigène à la plupart des régions du monde **(Ansari et Ismail, 2012).**

Les vers fouisseurs sont à la surface la nuit afin de traîner de la nourriture dans leurs galeries creusées dans les couches minérales profondes du sol, c'est l'exemple du lombric commun ou ver nocturne rampant.

Les vers endogés («à l'intérieur de la terre») sont également des vers fouisseurs vivant dans le sol mais leurs «tubes» ou trous sont généralement peu profonds; ils se nourrissent de la matière organique du sol et viennent rarement à la surface.

Les vers anéciques vivent dans la couche superficielle du sol.

Les vers épigés («à la surface du sol»), ces vers vivent dans des litières à la surface du sol et se nourrissent de la matière organique en décomposition. Ils forent très peu le sol et n'ont pas de trous permanents. Ce sont ces vers «décomposeurs» que l'on utilise dans le lombricompostage. **(Card et al, 2000)**

Les vers élevés à des fins commerciales sont généralement de type épigé. *Eisenia foetida* est loin d'être le seul ver épigé, mais c'est celui qu'on emploie le plus souvent à des fins de compostage dans les climats nordiques. Il résiste à une large gamme de températures allant de 0^0 à 35^0 C et peut même survivre quelque temps dans la matière organique gelée. **(Collaert, 2009)**

I.2.2.1.1. Mode de reproduction des vers de terre

On a prouvé que ses cocons demeuraient viables après avoir été congelés pendant plusieurs semaines. Il supporte, en outre, la manipulation et les conditions difficiles. Encore plus important : comme la plupart, si ce n'est l'ensemble, des vers qui vivent dans une litière, le ver composteur a la capacité de se reproduire très rapidement. Toutes ces caractéristiques font d'*Eisenia foetida* le candidat naturel de ceux qui veulent effectuer leur lombricompostage en plein air, tout au long de l'année, dans des climats aux hivers rigoureux. **(Munroe, 2004)**

Les figures ci-dessous **(figures 2-3)** montrent respectiveement la position de reproduction des vers de terre et la localisation du clitellum contenant les gamètes. Cas d'*Eisenia foetida.*

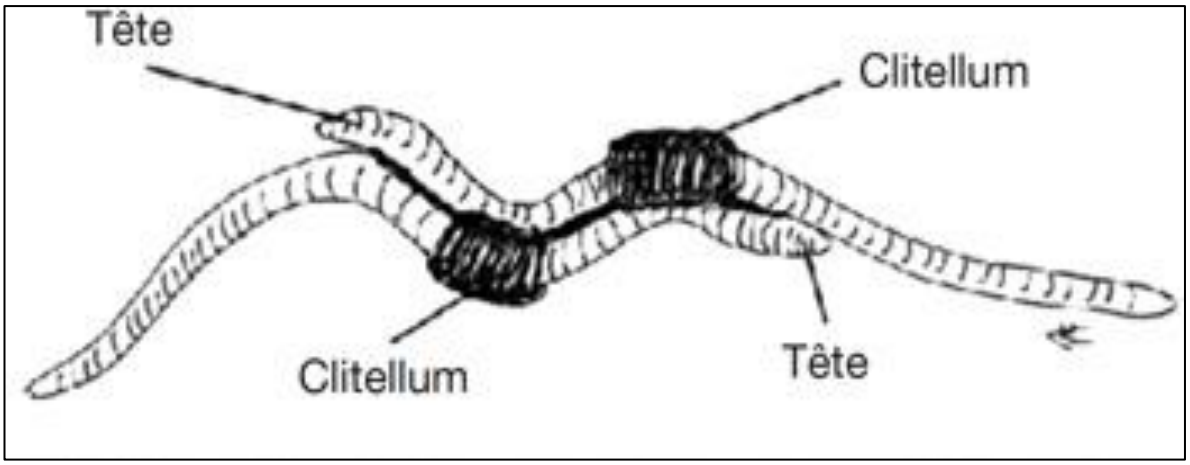


Figure 2. Position de reproduction des vers de terre (Morin, 2004)



Figure 3. *Eisenia foetida* et la localisation de son clitellum (Photo de l'auteur, 2023)

I.2.2.1.2. Rôle des vers de terre dans le compostage

Les vers de terre, par leur activité fouisseuse, leur ingestion de sol ou encore la fabrication de déjections sont identifiés comme des ingénieurs de l'écosystème, influençant fortement la structure des sols et modifiant l'environnement des autres organismes **(Curry** et **Schmidt, 2007)**. En parallèle, en changeant la répartition et la disponibilité des nutriments, l'activité et la composition de la communauté bactérienne, ils influencent indirectement la composition des communautés de plantes et leur croissance (**Eisenhauer** et **Scheu, 2008)**.

a. Effets des vers de terre sur les microorganismes du sol

Les vers de terre, indépendamment des catégories écologiques, peuvent influencer les populations de la microflore et d'autres organismes de la faune du sol par deux grands

mécanismes : le broyage, le fouissage et les déjections d'une part et la dispersion de microorganismes d'autre part.

- Le broyage des éléments de la litière augmente leur surface d'attaque et leur décomposition par la microflore, ce qui a un effet positif sur la disponibilité des nutriments. Les galeries et les déjections(turricules) quant à elles présentent de très bonnes conditions de prolifération pour les microorganismes (oxygène, MO, carbone assimilable et humidité).
- La dispersion des microorganismes se fait soit au contact du corps des vers soit par le passage dans leur tube digestif (**Brown, 1995)**.

On note cependant que quand les galeries et les déjections des vers de terre sèchent et se stabilisent avec le temps, la décomposition de la MO, la minéralisation des nutriments et l'activité microbienne baissent et atteignent souvent des niveaux plus bas que ceux observés dans les sols non digérés. Après un certain temps, ce sont les effets de conservation du C, de N et de régulation de l'activité microbienne qui prédominent. (**Brown et al., 2000)**

b. Effet des vers de terre sur l'activité microbienne

Les vers de terres ingèrent des microorganismes qui sont stimulés par leur passage dans le tube digestif. Cependant, toute la microflore n'est pas influencée de la même manière par son passage dans l'intestin du ver de terre, et il est également possible que différents vers de terre affectent de manière différente une même bactérie. Le temps de transit apparaît comme l'un des principaux facteurs déterminant les effets sur la population microbienne. Le temps de transit dépend à son tour de facteurs tels que la qualité de la nutrition ou la température du sol. L'activité microbienne est en général plus élevée dans les intestins que dans les sols digérés et les déjections, et plus élevée dans ces dernières que dans les sols non digérés **(Brown, 1995)**.

Plus globalement, les bactéries seraient également plus nombreuses dans la drilosphère (ensemble du volume de sol sous l'influence des vers de terre) que dans le sol non atteint (+42% de bactéries fixatrices aérobies par exemple). Cette activation dépend du ver, de l'espèce de la bactérie, du type de sol, de la période de l'année et de la qualité de la nourriture ingérée par le ver **(Brown, 1995)**.

L'activité des vers de terre crée les conditions favorables à l'activation de certaines bactéries en les mettant au contact avec la MO du sol, ce qui en résulte une augmentation de la décomposition de cette dernière. L'étude de Brown rapporte une plus grande quantité de

bactéries, soit 13 fois plus, dans les déjections que dans le sol non digéré. La relation mutualiste développée entre les vers de terre et les bactéries est basée sur le « paradoxe de la belle au bois dormant » qui part du principe que les bactéries ont la capacité de digérer la plupart des MO mais que faute d'accès à cette ressource carbonée elles sont dormantes la majeure partie du temps dans le sol. Le réveil des bactéries est déclenché par la production de mucus intestinal qui provoque un effet d'amorçage. La comparaison de plusieurs espèces a pu montrer que les vers de terre endogés produisent plus de mucus que les épigés par exemple, ce qui s'expliquer par un plus grand besoin de stimulation des microorganismes; les anéciques ayant une production intermédiaire **(Brown et al., 2000)**.

c. Effets des vers de terre sur la dispersion des microorganismes

La dispersion de la microflore peu mobile dans le sol par les vers de terre permettrait l'apparition d'interactions bénéfiques grâce à différentes symbioses. La dispersion de bactéries fixatrices, par exemple, entrainerait la présence de cinq fois plus de nodosités sur le trèfle. Même si cette nodulation supplémentaire ne modifie pas la croissance de la plante, elle peut être à l'origine d'une augmentation de l'azote foliaire de 20 à 30% et d'une augmentation de la biomasse des tiges et des racines de 20 à 30% **(Brown, 1995).** .

I.2.2.2. Bactéries

Elles sont toujours présentes dans la masse des déchets organiques et ce dès le début du processus. Elles restent actives durant tout le compostage et en particulier à haute température à la phase thermophile. Elles se multiplient très rapidement et ctte croissance suit une courbe logarithmique **(Figure 4)**. Les quelques bactéries suivantes sont rencontrées dans le compost. Certaines d'entre elles sont sont susceptibles de provoquer les maladies. Il s'agit d'*Escherchia coli, Coccidies, Salmonnella, Staphylococcus, Streptococcus, Clostridium, Klebsiella* et *Listeria* **(Bouskraoui et al, 2017)** .

Cette multiplication rapide et le grand nombre d'espèces différentes permettent l'utilisation de résidus organiques pour les transformer en un compost **(Zegels, 2012).**

II a été démontré que, dans des composts à base de sciures et de boues de stations d'épuration et sous des conditions idéales, les activités de biodégradation intense suivie de la montée de température dans les premiers jours de compostage étaient essentiellement dues aux bactéries **(Strom, 1985).**

Des températures de 60^0-80^0 C sont souvent obtenues dans la première semaine du compostage laissant ainsi la place aux bactéries thermophiles. Mais quand les températures redescendent après quelques jours, les microorganismes mésophiles qui ont survécu à la

montée de température sous l'effet de la thermotolérance ou spores reprennent la multiplication. Dans des composts où la phase thermophile est maintenue artificiellement à 50°-60°C pendant plusieurs jours, des bactéries du genre Bacillus constituent la majorité des bactéries isolées. Cependant, lorsque la température d'incubation atteint 65°C, *Bacillus stearothermophilus* est la seule espèce représentée. Certaines bactéries thermophiles dont *Bacillus steathermophilus*, et *Clostridium thermocellum* sont dominantes dans les composts **(Atlas et al, 1992).**

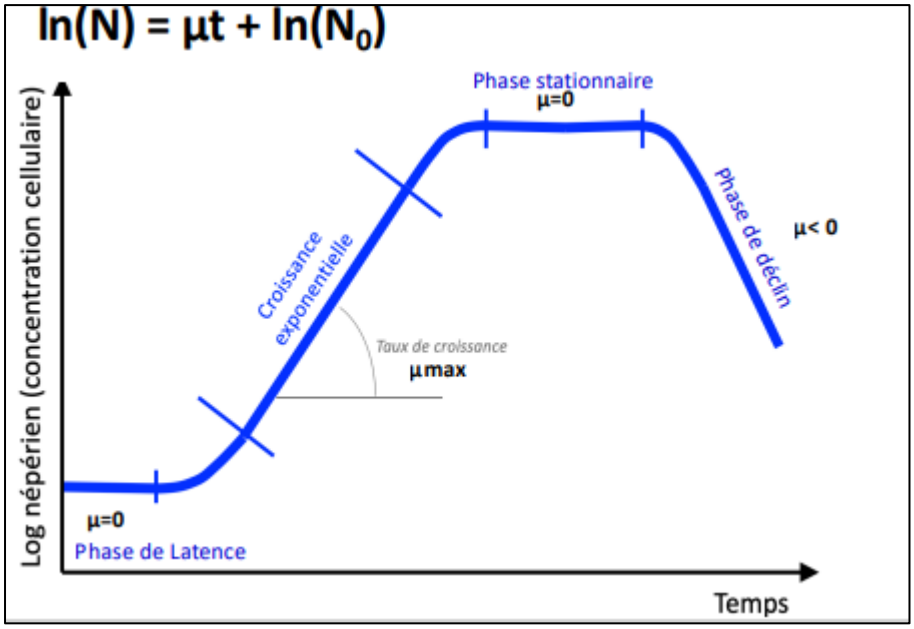


Figure 4: Courbe de croissance des bactéries (Imache,1997)

I.2.2.2.1. Bactéries PGPR

Certaines bactéries provenant du sol sont reconnues pour posséder certaines caractéristiques bénéfiques pour les plantes tant au niveau du contrôle des pathogènes qu'au niveau de l'augmentation de croissance. Plusieurs genres bactériens sont reconnus pour être capables d'aider la croissance des plantes et sont regroupés sous le nom de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Il est possible d'utiliser les PGPR comme aide à la croissance des plantes à la place de fertilisants chimiques ou en combinaison avec ceux-ci comme l'ont démontré plusieurs études. Certains produits à base de PGPR sont déjà commercialisés comme produit de biocontrôle ou biofertilisant **(Lauriane, 2015).**

Plusieurs chercheurs ont identifié des bactéries du sol possédant des propriétés bénéfiques pour les plantes tant pour leur croissance que pour leur santé. Ils ont regroupé ces bactéries sous le nom de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Les PGPR sont retrouvés dans la rhizosphère, à la surface des racines ou encore en association avec les racines **(Ahmad et al, 2008).**

La rhizosphère peut être défmie comme la zone du sol qui entoure les racines. La rhizosphère est une zone riche en nutriments pour les bactéries principalement grâce aux exsudats des racines. Les exsudats racinaires sont composés de sucres solubles, d'acides organiques, d'acides aminés, mais peuvent aussi contenir des hormones, des vitamines, des composés aminés, des composés phénoliques et d'ester de phosphate de sucre **(Nihorimbere et al, 2011)**

Plusieurs souches bactériennes ont été identifiées comme étant PGPR, notamment des bactéries appartenant aux genres *Bacillus, Azospirillum, Enterobacter, Klebsiella, Pseudomonas, Rhizobium, Bradyrhizobium, Azorhizobium, Allorhizobium, Sinorhizobium* et *Mesorhizobium* **(Hayat et al, 2010)**

Les PGPR peuvent influencer la croissance des plantes de façon directe ou indirecte. Les mécanismes impliqués directement sont la sécrétion d'honnones (auxines, gibberellines, cytokinines, etc.) ou en facilitant l'absorption de nutriments (fixation d'azote, solubilisation de phosphate ou de potassium et synthèse de sidérophore). Indirectement, les PGPR vont aider la croissance des plantes via la sécrétion d'antibiotiques ou d'enzymes limitant les phytopathogènes **(Glick et al, 2007)**

I.2.2.3. Champignons

Les champignons sont le plus souvent retrouvés dans les systèmes en compostage dans la phase de maturation lorsque la température est plus basse et que les seuls substrats disponibles sont des polymères complexes. Ceux-ci préfèrent des conditions aérobiques et peuvent croître à une large gamme de pH allant de 2 à 9. Même si certains champignons comme *Geotrichium candidum, Aspergillus fumigatus, Thermoascus aurantiacus, Torula thermophila,* peuvent croitre à des températures au-dessus de 50°C, la plupart des champignons sont sensibles à une trop forte augmentation de température et par conséquent ne se développent pas durant la phase thermophile **(Killham,1993).**

L'analyse de la microflore à partir des différents types de matière organique à composter révèle la présence des différentes espèces fongiques. Cetaines espèces sont toxiques ou pathogènes bien que d'autres soient d'importance capitale dans le processus de décomposition et d'autres dans la lutte contre les maladies des plantes. Ce sont notamment *Aspergillus, Cladosporium, Fusarium, Aureobasidium, Mucor, Rhizomucor, Rhizopus, Trichoderma, Penicillium et Geotrichum* (**Doumbouya et al., 2021**).

I.2.2.4. Autres êtres vivants

Les macroorganismes interviennent lorsque la température est inférieure à 40°C, c'est à dire essentiellement des lombrics mais aussi de nombreuses espèces d'insectes, acariens,

gastéropodes, myriapodes, cloportes, etc. La décomposition et la minéralisation de la matière organique ne sont pas uniquement assurées par les bactéries et les champignons. D'autres microorganismes tels que les protozoaires et les moisissures participent activement à la décomposition de cette matière **(Ziegler et Héduit, 1991).**

I.2.3. Facteurs influençant l'activité microbienne au cours du compostage

On peut citer comme conditions importantes du compostage les éléments suivants: la température, l'aération, l'humidité, le pH, la capacité d'échange cationique (CEC), l'acidité, le rapport carbone/azote (C/N), la forme des composés carboniques, etc. **(Singh et al., 2013)**

La **température** joue un rôle important au cours du compostage. En effet, l'activité microbienne est influencée par la variation de la température. Il y a dégradation optimale de la matière par les bactéries une température comprise entre 40^0 - 50^0 C. Au-delà de 50^0C, l'activité de dégradation par les bactéries décroit et disparaît pour des températures elevées.

L'**aération** : Il est souhaitable d'assurer une bonne oxygénation, la décomposition des matières organiques étant principalement le fait de microorganismes aérobies.

L'**humidité** : Une certaine humidité est indispensable pour que les microorganismes effectuent le travail de décomposition des matières organiques. Cependant, il y a un rapport entre l'humidité et l'aération qui fait que, si l'humidité est trop importante, il devient difficile d'assurer l'oxygénation, et qu'il est à craindre que la décomposition en soit retardée. C'est pour cette raison qu'il est souhaitable que le taux d'humidité avoisine les 50-60 %.

Le **pH** : Un milieu basique est le plus propice au compostage, la décomposition n'avançant pas dans un milieu acide. Le pH est un paramètre important dans le processus de compostage et du vermicompostage, car permettant de déterminer l'acidité ou l'alcalinité du substrat. Le pH des vermicomposts reste constamment basique au cours du vermicompostage.

La **capacité d'échange cationique** (CEC) d'un compost est liée à sa capacité à retenir des cations. Elle représente la quantité maximale de cations (ions positifs) que la matrice peut adsorber. La CEC évolue dans le même sens que le pH, du fait de la libération de charges négatives avec l'augmentation du pH. Le processus d'humification produit des groupements fonctionnels et l'oxydation de la matière organique entraînant une élévation de la capacité d'échange cationique. Celle-ci varie parallèlement avec le pH ce qui conditionne aussi la dynamique du microbiote car ce dernier a un préférendum, un milieu basique.

La qualité des composts élaborés montre qu'ils peuvent être appliqués sur les sols acides comme fertilisants. Leurs structures en feuillet leur confère de puissantes charges négatives permettant à une certaine quantité de cations libres de la solution du sol de s'y fixer (Ca^{2+}, K^{+} , NH^{+} , Na^{+}, etc.) **(Ousmane, 2020)**

L'acidité est principalement générée par la production d'acide butyrique et d'acide lactique sous l'effet des fermentations anaérobies dues au manque d'aération **(Rostami, 2011).**

Le rapport carbone/azote : Dans le processus de décomposition, les matières carboniques contenues dans les matières organiques sont utilisées par les microorganismes et rejetées sous forme de CO_2. Si, lors du processus de compostage, le rapport carbone / azote (rapport C/N) des matières organiques est inférieur à 15, une perte d'azote est à craindre. Si par ailleurs le rapport C/N est trop élevé, le processus de décomposition en est considérablement ralenti. Le rapport C/N optimal se situe entre 15 et 30.

Forme des composés carboniques : La forme des composés carboniques influe sur la vitesse de la décomposition des matières organiques. Les glucides simples, les amidons, les hémicelluloses, les pectines ou encore les acides aminés etc, se décomposent aisément. Les celluloses sont plus résistantes et les lignines se décomposent difficilement.

Matériaux et matériels pour la confection du compost : Les matières utilisées pour la fabrication du compost se divisent en deux grandes catégories, celles des matières organiques à forte teneur en carbone et celle des matières organiques à forte teneur en azote. Exemples de matières organiques à forte teneur en carbone : Paille, balle de riz, foin, feuilles mortes, Ordures ménagères, cendres de bois, sciure, copeaux, Papier, carton,Coton, laine.

Exemples de matières organiques à forte teneur en azote : déjections animales (bovins, ovins, caprins, asines, poulets, pintades), feuilles fraîches (feuilles coupées sur les haies-vives, herbes fauchées, feuilles provenant de l'élagage des arbres), restes des fruits et légumes (**JIRCAS, 2012).**

I.2.4. Techniques de compostage

Le compost peut être confectionné dans toutes sortes d'endroits. On peut accumuler les matières organiques en petits tas, les mettre au fur et à mesure dans une fosse, dans un pavillon muni d'un toit ou même dans une enceinte totalement close. Cependant, quel que soit l'endroit, les principes du compostage doivent toujours rester les mêmes notamment la création des conditions optimales d'un environnement dans lequel les microorganismes effectuent la décomposition des matières organiques par compostage **(FAO, 2005).**

Ce processus de compostage se fait en deux principales phases : Une première phase d'activation des microorganismes qui se produit à une température inférieure à 50° .Une seconde phase d'activités intenses qui se produit à haute température variant de 50^{o} à 70^{o} C. La phase à haute température contribue tout particulièrement à la désactivation des graines de mauvaises herbes et des œufs de parasites **(Lores et *al*., 2006).**

I.2.4.1. Principales phases du vermicompostage

Phase mésophile

C'est la phase durant laquelle les acteurs du compostage mélangent les déchets organiques induisant ainsi l'installation de nouvelles conditions favorables au développement des germes. Cette phase doit être caractérisée par une quantité suffisante non seulement de l'eau et de l'oxygène mais aussi des nutriments. Elle est également caractérisée par une assimilation aisée des sucres, des acides aminés et des protéines contenus dans ce mélange par les microorganismes et un dégagement d'une grande quantité de chaleur. Une partie de la chaleur est utilisée pour le métabolisme bactérien et une autre partie s'accumule dans la masse à composter favorisant ainsi la prolifération de bactéries thermo-tolérantes et thermophiles ce qui conduit à la phase suivante du processus **(Debril, 2005).**

Phase thermophile

Selon le gradient de température, une succession des microorganismes colonisent le tas de compost. Il y a dégradation optimale de la matière par les bactéries quand la température est comprise entre 40-50^{0} C. Au-delà de 50^{0}C, l'activité de dégradation par les bactéries décroit et disparaît pour des températures supérieures à 70^{0}C. Les enzymes produites par les bactéries pendant la phase mésophile continuent à dégrader la matière après cette température excessive **(Sierra et *al*.,2013).**

Phase de refroidissement

Les substrats facilement biodégradables disparaissent. La température diminue à ce moment. Les microorganismes mésophiles non détruits par la température de la phase thermophile colonisent à nouveau le substrat. L'odeur désagréable qui était émise par le souffre et l'azote disparait car ces deux éléments ont été utilisés et les débris fermentescibles ont été dégradés. Il y a amorcement de la dégradation des composés ligno-cellulosiques évoluant ainsi vers la phase de maturation **(Sierra et *al*.,2013).**

Phase de maturation

Egalement appelée phase de fermentation lente, elle se déroule à température ambiante avec des microorganismes et une faune tellurique ; la dégradation de l'hémicellulose et de la lignine en composés organiques moins complexes est amorcée. La réaction de condensation et de polymérisation de ces molécules, des sous-produits provenant du métabolisme bactérien et des composés minéraux conduisent à la formation des molécules humiques précurseurs de l'humus. De manière générale, cette phase est plus lente et correspond à la conversion du carbone en dioxyde de carbone et en humus et l'azote en nitrates par les microorganismes **(Cefrepade, 2012)**

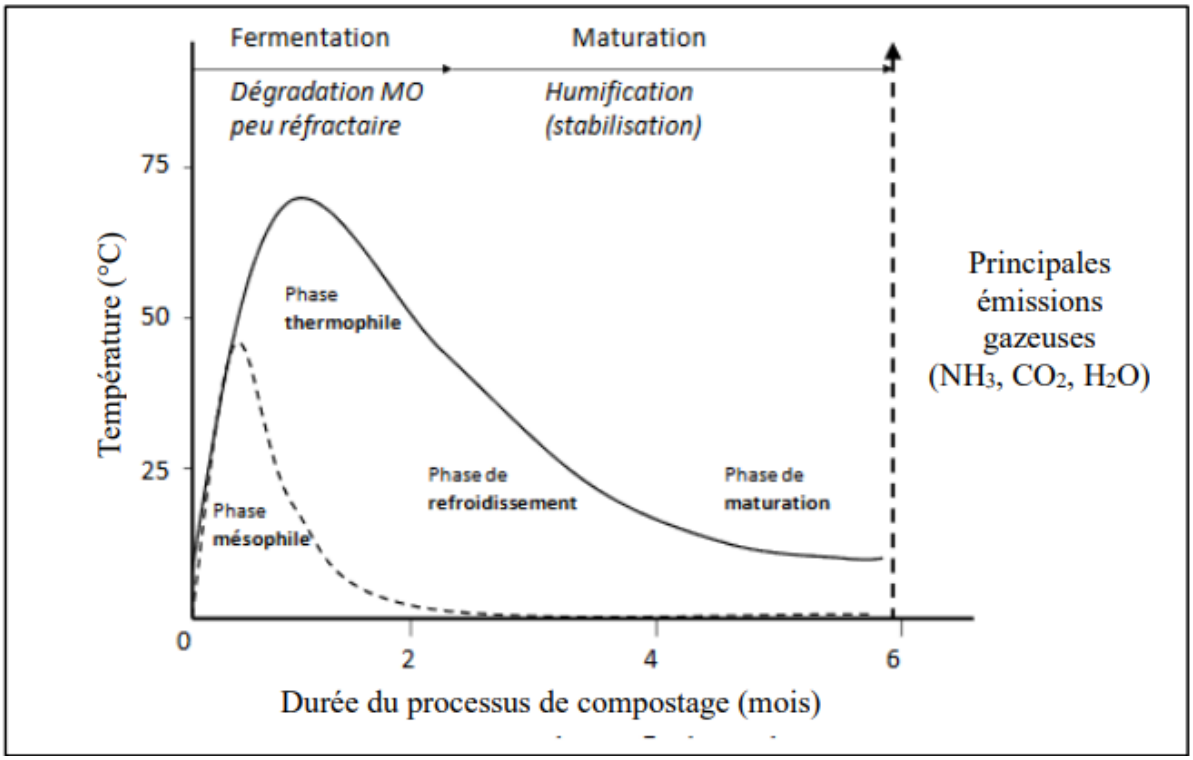


Figure 5. Différentes phases du processus de compostage au cours du temps selon l'évolutionnde la température (Oudart, 2013)

I.2.5. Microorganismes et risques sanitaires.

Le compostage de la matière organique est un processus naturel, vivant, opéré par des micro-organismes en particulier les bactéries et champignons sans oublier d'autres microorganismes et organismes outre les deux grands groupes. L'exposition à certains de ces organismes peut provoquer des affections pouvant conduire aux maladies ou d'autres effets néfastes sur la santé humaine **(FAO, 2005).**

Le risque réside dans l'ingestion involontaire de sol ou de poussières contenant une part de compost et donc d'organismes pathogènes. Cette ingestion peut entraîner des infections. Le

risque potentiel est lié à l'inhalation ou à l'ingestion de poussières organiques puisque celles-ci, tout comme le compost d'où elles proviennent, peuvent parfois contenir des microorganismes ou autres germes pathogènes **(ADEME, ASPESA, OLENTICA, BIO intelligence Service, 2015).**

Des microorganismes d'origine fécale ou animale comme c'est le cas des composts de toilettes sèches qui peuvent contenir des virus ou bactéries pathogènes, mais également celui de ceux comportant des sous-produits animaux. C'est à dire tous les composts dans lesquels des résidus de cuisines et de table sont déposés. Des micro-organismes se développant lors du processus de compostage comme les champignons. Des toxines et allergènes libérées par des bactéries et des champignons se développant lors du compostage **(ADEME, ASPESA** et **OLENTICA, BIO intelligence Service, 2015).**

Dans le cadre de la pratique du compostage, la propagation de poussières organique et donc de ces micro-organismes ou toxines, est maximale : lors d'un brassage, au moment d'un retournement, lors de la récupération du compost et son utilisation à l'occasion de l'addition de broyat sec. Des poussières organiques peuvent également se retrouver sur des légumes directement en contact avec le sol. Compte tenu de ces différentes voies susceptibles de contamination, Il faut informer sans alarmer que nous inhalons et intégrons tous quotidiennement un nombre important de particules comme les spores, les microorganismes et les poussières organiques diverses sans que cette exposition engendre des troubles de la santé chez la plupart d'entre nous **(ADEME, ASPESA** et **OLENTICA, BIO intelligence Service, 2015).**

Il reste cependant important, pour permettre le développement du compostage de proximité en toute quiétude, d'informer les usagers sur ces risques potentiels et les façons simples de s'en protéger.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Matériel

II.1.1. Matière en compostage

Divers composés organiques ont fait l'objet d'étude de l'évolution des microorganismes, acteurs du compostage au cours de notre travail de recherche. La matière de compost est analysé à deux périodes principales. Elle est analysée durant le **pré-compostage** d'une part et durant le processus de **vermicompostage** d'autre part.

Six produits résiduaires organiques suivants ont fait l'objet des analyses microbiologiques: balle de riz **(BR)**, pailles de riz **(PR)**, écume et bagasse de canne à sucre **(EBCS)**, fumier de vache **(FV)**, contenu ruminal **(CR)** et Fibres et épis de noix de palmier à huile **(FENPH)**. Les photos ci-après **(Figures 6 -11)** de ces composés organiques ont été prises après deux mois du processus de vermicompostage.

Notons que, à part la matière organique essentielle, des ingrédients ont été ajoutés dans l'objectif de fournir aux vers de terre assez de nourriture. Les amendements concernaient essentiellement le *Titonia diversifolia*, des amarantes, des pastèques, des choux, des papayes et des laitues. De l'eau a été régulièrement ajoutée dans tous les bacs d'expérimentation à raison d'une petite quantité permettant de garder la matière organique humide pour créer des conditions optimales de vie du ver de terre, un milieu humide.

II.1.1.1. Balle de riz

Le riz est une plante qui produit, non seulement du riz consommable mais aussi d'autres produits résiduaires organiques pouvant être valorisés. Ce sont notamment, le son de riz, balle de riz, paille de riz,….

La faible quantité de la matière organique dans les sols africains constitue une contrainte majeure pour la production agricole, alors qu'une quantité importante de restes de récolte inexploitée existe à cette utilité. Pour résoudre ce problème, l'usage de la paille de riz s'avère nécessaire. Cependant compte tenu de sa décomposition qui est lente, un prétraitement a été fait plus précisément avec le Calcium (dolomite) à l'Université Félix Houphouët-Boigny dans le Centre Floristique National (CFN). Cependant, malgré la dégradation lente, cette matière organique renferme toujours beaucoup de microorganismes utiles pour la dégradation (**Kouakou Konan, 2020).**



Figure 6. Compost à base de balle de riz (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.1.2. Paille de riz

Le riz renferme encore d'autres produits résiduaires organiques comme la paille de riz pouvant être valorisée pour donner un compost aussi riche en matière organique et nutritif pour les sols.



Figure 7. Compost à base de paille de riz (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.1.3. Ecume et bagasse de canne à sucre

Le Burundi renferme une bonne superficie capable de supporter la culture de canne à sucre et ainsi fournir une bonne production. Le canne à sucre est une plante qui présente un bon nombre de produits résiduaires organique avant et / ou après son traitement. Ecume et bagasse sont parmi ces résidus. La valorisation de ces restes joue un rôle important sur plan agricole. Ainsi notre recherche a porté sur le vermicompostage de ces résidus qui produisent un compost riche en humus.

Les écume et bagasse issues de l'exploitation de la canne à sucre sont valorisées pour plusieurs utilités : soit pour produire de l'énergie soit l'alimentation du bérail ou du compost.



Figure 8. Compost à base d'écume et bagasse (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.1.4. Fumier de vache

La vache possède dans sa panse, une grosse quantité de matière organique quotidiennement venue de digestion des herbes et autre nourriture du bétail. Quand la vache déjecte ce contenu, il devient fumier.



Figure 9. Compost à base de fumier de vache (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.1.5. Contenu ruminal

Les ruminants possèdent un rumen dans lequel se fait la transformation des aliments qu'ils mangent. Ces aliments, sous l'action de l'eau, des bactéries symbiotiques se trouvant dans la panse des ruminants subissent une fermentation la transformant en contenu ruminal. Ce contenu ruminal peut être valorisé pour plusieurs fins, on peut l'ajouter dans l'alimentation d'autres animaux ou le traiter par vermicompostage afin d'obtenir un vermicompost de valeur.



Figure 10. Compost à base du contenu ruminal (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.1.6. Fibres et épis de noix de palmiier à huile

Le palmier à huile possède aussi des résidus organiques valorisables en un compost. Ce sont les épis, fibres et noix.



Figure 11. Compost à base des épis et noix de palmier à huile (**Photo de l'auteur, 2023**)

Après le retournement et le mélange de ces matières organiques, on ajoute des fruits et légumes divers pour faciliter et accelérer la dégradation **(Figure 12)**. Les pastèques, les laitues et les papayes sont ajoutés. Cela augmente non seulement la nourriture pour les vers de terre mais aussi pour les microorganismes décomposeurs.



Figure 12. Amendement des vermicomposteurs (**Photo de l'auteur, 2023**)

Après l'amendement des vermicomposteurs, l'étape d'inoculationdes vers de terre s'en suit **(Figure 13)**. Il s'agit de l'introduction des vers de terre composteur dans la matière organique. Ici, le ver de terre utilisé est *Eisenia foetida*. Après inoculation, les bacs à compost sont recouverts de carton et une petite quantité d'eau est versée au dessus pour garder l'humidité optimale nécessaire à la vie des vers de terre.



Figure 13. Inoculation des vers de terre dans les composteurs contenant de la matière organique (Photo de l'auteur, 2023)

II.1.2. Matériel de laboratoire

II.1.2.1. Milieux de culture

Le milieu de culture à utiliser dépend du paramètre à rechercher. Les milieux de culture utilisés au cours de la présente étude ont été choisis en fonction des paramètres recherchés. Il s'agissait de la détermination des types de bactéries et ou de champignos du processus de vermicompostage.

Deux types de milieux de culture ont été utilisés. Il s'agit des milieux de culture généraux et des milieux de culture spécifiques.

Le milieu de culture général est utilisé pour déterminer les germes totaux au moment où le milieu séléctif spécifie une espèce microbiologique. Cela traduit le dénombrement du microbiote par culture générale et l'isolement par culture spécifique.

La recherche des microorganismes pathogènes ainsi que d'intérêts d'origines bactérienne et fongique dans le compost a été également effectuée.

- **Potatoe dextrose agar ou PDA**

  Ce milieu de culture est utilisé pour la culture des champignons. Afin d'inhiber la croissance bactérienne, un comprimé de chloramphénicole est ajouté au milieu de culture après la stérilisation. Dans ce cadre, si les autres conditions et protocoles sont respectées, on est sûr que tous les germes qui pousseront après incubation seront tous des champignons.

- **Plate Count Agar ou PCA**

Ou encore Gélose ordinaire (ou Nutrient Agar en anglais) pour la culture générale

Ce milieu de culture est utilisé pour la culture des bactéries. Il permet en effet, après incubation à 37^{o} C pendant plus ou moins 18 heures , de déterminer les germes totaux. Les unités formatrices de colonies sont visibles dans les boîtes de pétri après la période d'incubation.

- **Lb –Agar**

Ce milieu specifique est utilisé pour déterminer les Escherchia coli. Après l'ensemencement, on a incubé le milieu gélosé à 37 ^{o} C pendant plus ou moins 18 heures. La lecture se fait après cette période pour dénombrer les colonies de cette espèce et d'autres bactéries apparentées.

- **L'eau peptonnée.**

Elle a été fréquemment utilisée pour diluer les substrats. Elle sert ainsi à lever la dormance de certains germes microbiologiques qui ont développé une forme de résistance due aux mauvaises conditions.

- **Sabouraud**

Milieu sélectif pour détecter les lévures et les moisissures surtout pour faciliter le dénombrement des germes totaux.

- **Mac Conkey Broth**

Milieu séléctif pour la recherche des E. coli et d'autres bactéries apparentées

- **Baird Parker agar base** pour la recherche des staphylocoques
- **Hektoen Enteric agar** pour la recherche des entérobactéries
- **SS-Agar**: C'est un milieu spécifique pour la culture des *Salmonella*. Les salmonelles sont des bactéries dont leur culture passe par plusieurs étapes.

  On commence par le pré-enrichissement puis l'enrichissement sélectif, l'isolement suivi de la confirmation comme cela est indiqué sur le schéma du mode opératoire de recherche des salmonelles dans des aliments **(Figure 14).**

  (ISO 6579-1 : 2017)

  Exemple de mode opératoire de recherche des salmonelles dans des aliments

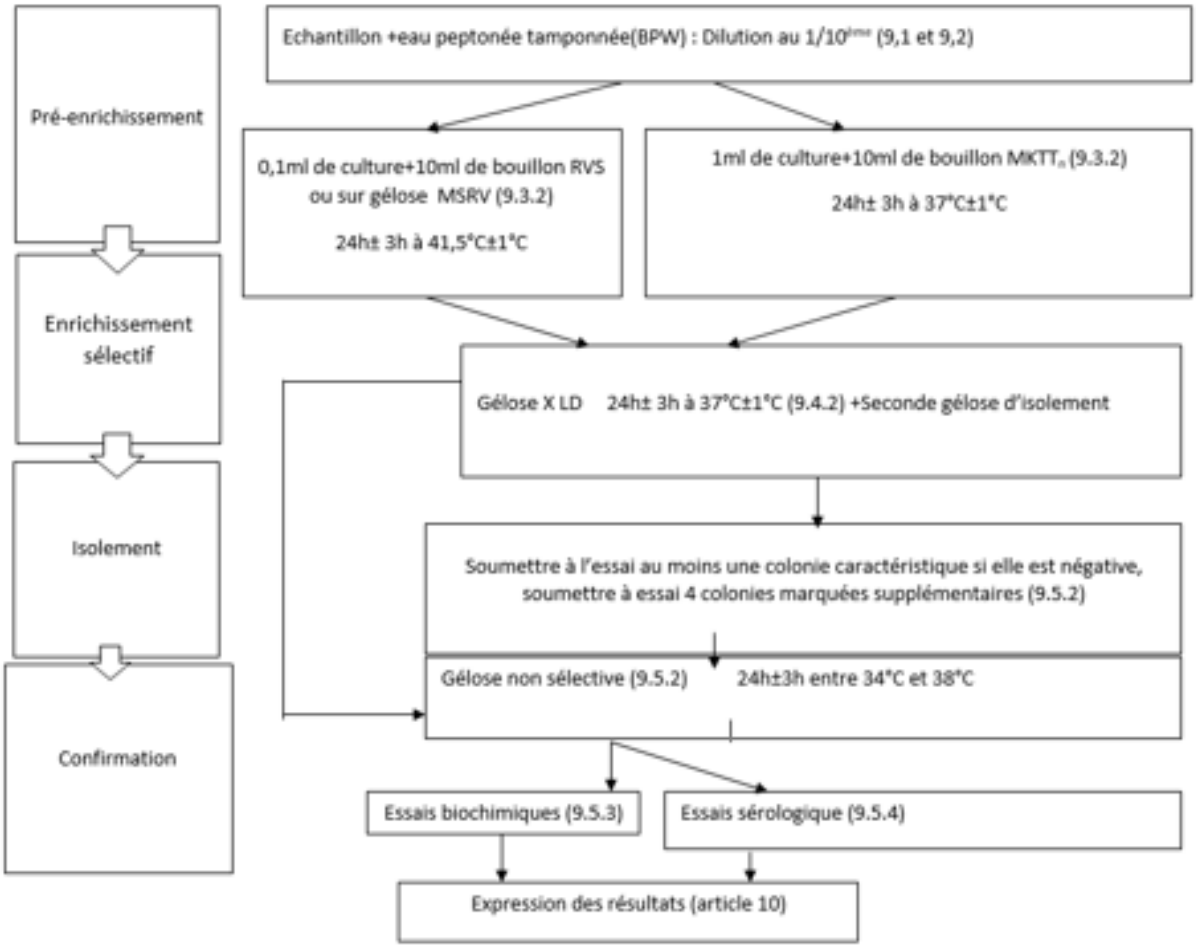


Figure 14. Schéma du mode opératoire de recherche des Salmonella dans les aliments (ISO 6579-1 : 201

II.2. Méthodologie adoptée

II.2.1. Intérêt et choix de la période d'étude

Les résultats de recherche sont obtenus à partir du dénombrement et l'isolement des microorganismes : germes totaux, germes pathogènes et germes d'intérêt. Les microorganismes analysés concernent les bactéries et champignons contenus dans chacun des six produits résiduaires organiques ensemencés dans les boîtes de pétri. Les matières organiques concernées sont : **BR (**balle de riz), **PR** (pailles de riz), **EBCS** (écume et bagasse) de canne à sucre, **FV(**fumier de vache), **CR** (contenu ruminal) et **FENPH** (fibres et épis de noix de palmier à huile). La période de prélevement des échantillons a duré 4 mois, répartis en six phases.

Le présent travail de recherche a été effectué de juin à novembre 2023. Pendant ce travail, six phases de prélevement ont été effectuées pour les périodes de 0, 15, 30, 60, 90 et 120 jours (T_0, T_{15}, T_{30}, T_{60}, T_{90} et T_{120}). Le premier prélevement à 0 jour correspond à la période du précompostage, c'est-à-dire avant l'inoculation des vers de terre. Les autres jours des périodes successives suivantes ont été choisis pour suivre l'évolution des microorganismes au cours du vermicompostage. La dernière période de prélevement (120 jours) a été considérée comme une période de maturité du compost où la population microbienne ne variait plus de façon remarquable.

II.2.2. Collecte des échantillons bruts

Les échantillons sur terrain ont été collectés dans les différentes provinces du Burundi.
Les balle et paille de riz, fibres et épis de noix de palmier à huile ont été colléctés dans l'IMBO NORD et à Rumonge, le contenu ruminal à l'abattoire de Bujumbura Mairie, le fumier de vache en province de Bujumbura en commune Mutimbuzi et Bubanza en commune Gihanga, les écume et bagasse de canne à sucre ont été collectées à la SOSUMO en province de RUTANA.

Ces matières organiques ont été déposées dans un endroit bien amenagé pour cette fin localisé à l'Ecole Normale Supérieure. Le pré-compostage a été effectué dans des tentes pour permettre la prédécomposition. Un hangar a été érigé pour abriter les bacs à compost où devrait se faire le vermicompostage.

II.2.3. Prélevement et préparation des échantillons

Les échantillons utilisés sont prélevés à l'Ecole Normale supérieure de Bujumbura aux deux grands moments du processus de compostage déjà cités. Le premier lot des échantillons est prélevé au mois de juin 2023 sur la matière organique pré-compostée dans les tentes. Le deuxième lot est prélevé dans les bacs pendant le processus du vermicompostage de juillet à novembre 2023. Chaque type de ces matières collectées devrait être échantillonné. Nous

devions bien mélanger les matières de chaque type pour au moins favoriser la distribution homogène des microorganismes dans la quantité à analyser. Les échantillons sont emballés dans des sachets (**figure 15A**) et directement acheminés au laboratoire de microbiologie, soit au campus Mutanga, ou au Laboratoire National de Santé Animale situé au quartier asiatique à côté de l'ODECA selon la disponibilité du matériel de laboratoire. Les analyses effectués au Laboratoire National de Santé Animale concernaient la cultures et l'isolement des bactéries tandisque les analyses fongiques ont été effectuées au laboratoire de microbiologie de la faculté des sciences, campus Mutanga.

Si par faute de contre temps, les échantillons ne sont pas analysés le même jour du prélevement, ils sont conservés dans un réfrigirateur à 4^0C.

Ensuite, les échantillons du vermicompost ou le pré-compost, déposés sur du papier journal, sont séchés à l'étuve à une température légèrement inférieure à 40^0C pendant une durée de deux heures pour éviter de détruire certains microorganismes. Cela est fait dans l'optique de déterminer la mtière sèche à analyser. Après séchage, les échantillons sont conservés dans des tubes pour des analyses ultérieures (**figure 15B**). Lors de l'analyse, une quantité de matière sèche est prélevée pour la dilution (**figure 15C**).

Pour la dilution, 5g de compost sont mélangés, dans des béchers ou tubes avec un volume de 100 ml d'eau distillée. Le mélange est doucement agité manuellement pour une éventuelle homogénéisation.

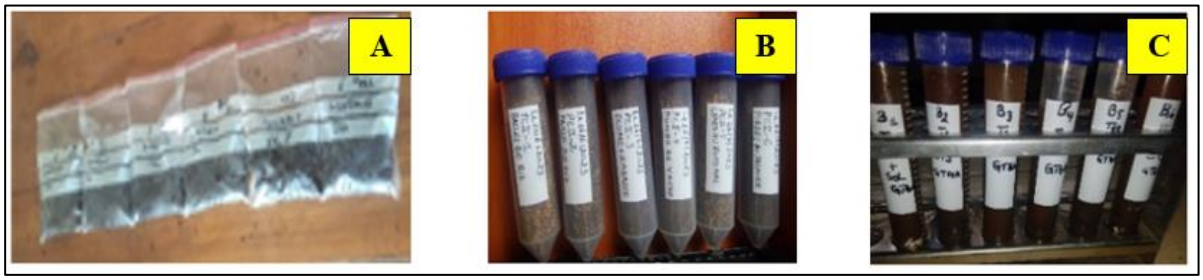


Figure 15. Echantillon de vermicompost humide (A), séché (B) et en solution (C)

(Photo de l'auteur, 2023)

Plusieurs dilutions successives sont nécessaires pour arriver à séparer les colonies (**figure 16)**. La dilution en série est tout simplement une dilution répétée d'une solution originale afin d'amplifier rapidement le facteur de dilution. Ce genre de dilution est souvent réalisé au cours d'expériences nécessitant des solutions hautement diluées et une grande précision. Dans cette recherche, 10 dilutions successives ont été effectuées durant les trois premières phases des analyses. Dans les phases suivantes, avec une diminution de concentration en microorganismes, le nombre de dilution variait entre 10 et 9 selon la nature des composts.

D'une manière générale, il faut disposer de 11 tubes à essais pour chaque type de compost auxquels il faut ajouter le bécher ou gros tube de 250 ml contenant le mélange de 5g de matière sèche et 95 ml d'eau distillée . Dans le premier tube à essais parmi les 11, on y verse 10 ml de solution mère provenant du premier mélange. On agite doucement pour plus d'homogénéisation. Pour la série des 10 tubes qui restent, on y verse dans chacun 9 ml d'eau distillée. Après homogénéisation du tube contenant 10ml de solution mère, on prélève 1 ml que l'on verse dans le premier tube contenant 9 ml d'eau distillée et on agite encore. Après agitation, on prélève 1 ml dans ce dernier que l'on met dans le deuxième tube et on agite. On prélève 1 ml dans le deuxième et on le met dans le troisième tube à essai et ainsi de suite jusqu'au dernier tube à essais avec la même procédure. Pour les étapes qui suivent, on va prélever 0,1ml dans chaque tube parmi les cinq derniers tubes à essai comptés à partir du sixième facteur de dilution c'est-à-dire 10^{-6} pour l'ensemencement. Pour chaque facteur de dilution, on fait l'ensemencement au minimum dans 3 boîtes de pétri en parallèle, soit un total de 15 boîtes de pétri pour chaque échantillon et pour chaque analyse. Une seule analyse au cours de cette recherche devrait s'effectuer dans 90 boîtes de pétri, soit un total de 540 boîtes de pétri qui ont été utilisées durant la recherche pour les six types de matières organiques.



Figure 16. Technique de dilution selon Imache (1997) (en bas) et Photo de l'auteur (en haut).

II.2.4. Analyse des échantillons

L'analyse des échantillons a consisté en trois étapes à savoir : ensemencement, incubation et dénombrement pour en dégager les unités formatrices de colonies (**UFC**).

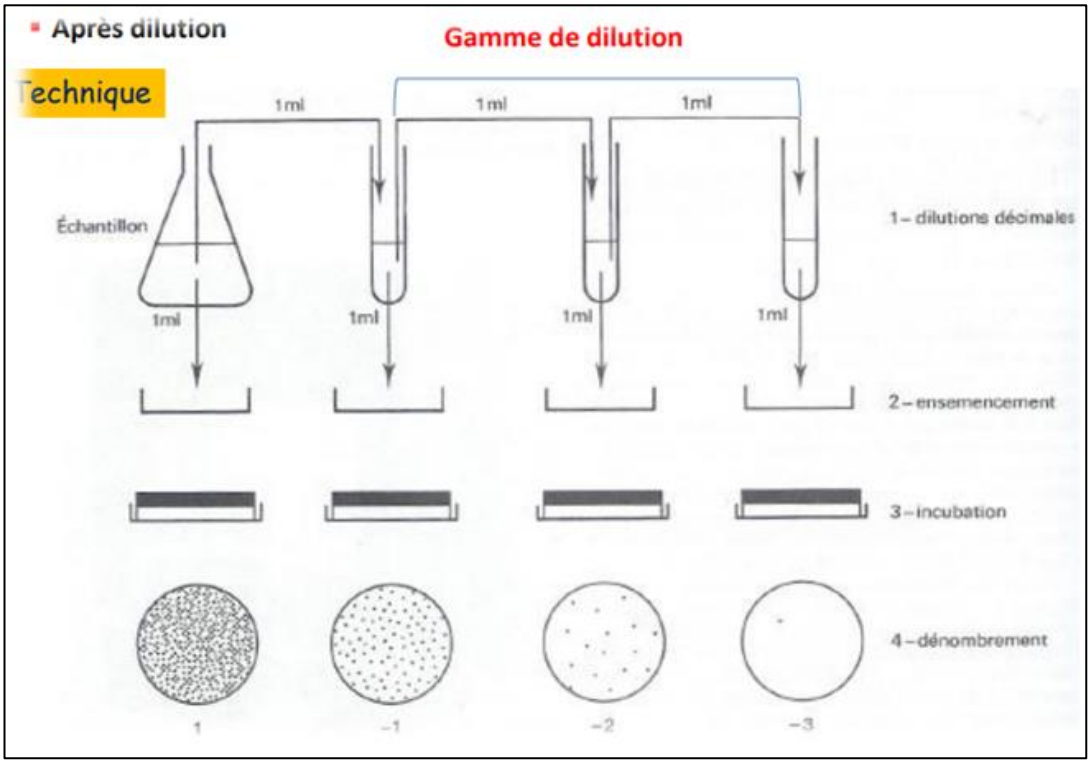


Figure 17 : Protocole générale d'analyse (Caldwel, 2012)

II.2.4.1.Ensemencement

C'est la technique qui consiste à disperser les microorganismes à la surface d'un milieu solide afin d'obtenir des colonies séparées, ce qui permet de retrouver tous les microorganismes du mélange, mais aussi de vérifier la pureté d'une souche bactérienne. Sur boîte de pétri préalablement séchée. 100 µl de suspension du germe ont été déposés à la surface du milieu de culture coulé et solidifié à l'aide de la pipette, on a ensuite étalé l'échantillon par l'étaleur en L puis on a incubé le milieu de culture à des températures variées selon la nature du paramètre recherché. Notons que ce processus se passe après avoir stérilisé la zone de travail (**figure 18**).

La figure en dessous montre le processus d'ensemencement après avoir stérilisé la zone de travail.



Figure 18. Stérilisation pendant l'ensemencement (Photo de l'auteur, 2023)

II.2.4.2. Incubation

Nous avons placé les boîtes de pétri dans une étuve qui va réguler et maintenir la température à la valeur favorable à leur croissance durant toute la période d'incubation nécessaire. La température optimale pour les bactéries a été de 37°C pour Escherichia coli et plusieurs autres bactéries et 25°C pour les champignons. Le temps d'incubation est variable d'un germe à l'autre. Il varie de 18h à 72h pour la majorité des bactéries et lévures. A noter que même avant 18h d'incubation, on peut déjà assister à des colonies visibles dans les boîtes de pétri pour certaines des bactéries.

II.2.4.3. Protocole pour le comptage des colonies

Après la période d'incubation nécessaire, on a procédé au comptage des colonies. Pour chaque boîte, on devais vérifier si le comptage de colonie est possible c'est-à-dire là où il n'y a pas fusion de colonies ou un nombre élevé de colonies. On devais partager la boîte de pétri en 4 quadrants à l'aide des lignes du compteur de colonies pour faciliter le comptage (**figure 19**) et devais par après multiplier par 4 le nombre de colonies trouvé dans le quadrant de la boîte de pétri. Dans le cas des dénombrements avec répétition, on devrait faire la moyenne des colononies des boîtes dénombrées **(Imache, 1997)**.

Le calcul standard de la concentration en micro-organismes [N] présents dans l'échantillon essai est une moyenne pondérée à partir des résultats de 2 dilutions successives. Pour que le calcul soit valable, il est nécessaire de compter sur au moins une boîte contenant au moins 15 colonies.

$$[N] = \frac{\sum c}{(n_1 + 0{,}1\, n_2)\, dV}$$ **(Imache,1997)**

- Soit Σc la somme de toutes les colonies comptées sur toutes les boîtes retenues (et tel que au moins une des boîtes comptées contenait au moins 15 colonies).
- Soit V le volume inoculum appliqué à chaque boîte (en général exprimé en mL).
- Soit n_1 le nombre de boites retenues à la première dilution (en général 2).
- Soit n_2 le nombre de boites retenues à la deuxième dilution (en général 2).
- Soit d le taux de dilution de la première dilution retenue pour les comptages sur boîte.

Le calcul d'UFC après dénombrement sur milieu solide sans répétition se fait selon l'équation suivante:

$$\mathbf{UFC} = \frac{\mathbf{N \times F}}{\mathbf{V}}$$

Où UFC = Unité formatrice de colonies : (UFC/ml) ou (germes/ml) ou (bactérie/ml)

N = nombres de colonies

V = volume de dilution (ml)

F = facteur de dilution

Pour le dénombrement sur milieu solide avec répétitions, on utilise la formule

Suivante : $\boldsymbol{N} = \frac{\sum \boldsymbol{C}}{\boldsymbol{V} \times (\boldsymbol{n_1} + \mathbf{0,1}\boldsymbol{n_2})} \times \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{d}}$ avec 1/d = F

Où N = nombres de colonies

∑C : somme totale de colonies comptées sur les boites retenues

V = volume de dilution

1/d = F = Plus fort facteur de dilution comptable

n_1 : nombre de boîtes à la plus faible dilution comptable

n_2 : nombre de boîtes à la plus forte dilution comptable

Si aucune boîte ne contient au moins 15 colonies, il faut faire la moyenne arithmétique des colonies comptées sur les 2 boîtes de la plus petite dilution et tenir compte de cette dilution. **(Caldwell, 2012).**

Au cours de notre recherche, certains des milieux de culture contenaient plus de 400 germes alors que les moins germés contenaient autour de 100 germes. Ce qui prouve une richesse microbiologique des composts comme le montre la **figure 19**.

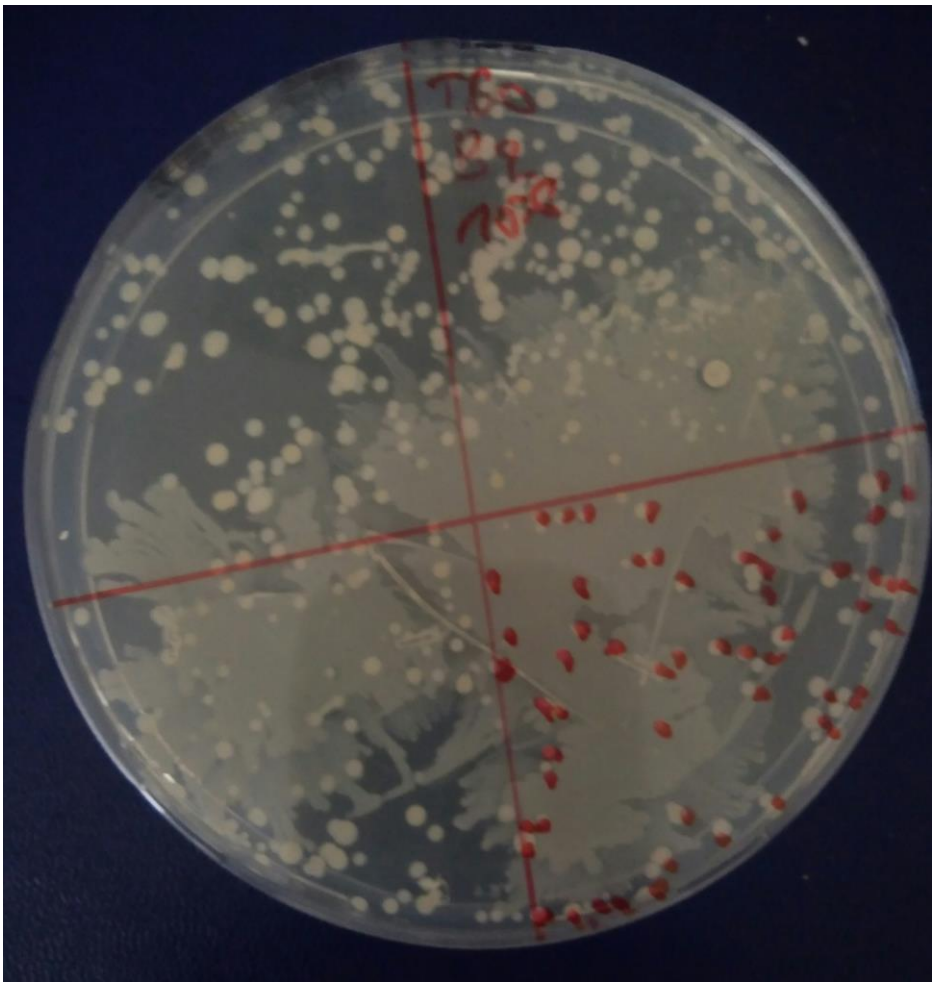


Figure 19. Boîte de pétri divisée en 4 quadrants lors du comptage du nombre de colonies (Photo de l'auteur, 2023)

Cette figure montre des colonies de bactéries ensemencées dans une boîte de pétri. Les lignes en rouge partagent la boîte de pétri en quatre quadrants afin de faciliter le comptage des colonies.

CHAPITRE III. PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. Présentation et analyse des résultats

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux et dans le cas des germes totaux un graphique a été ajouté. Pour le stade de précompostage, on a un seul tableau des germes totaux alors que pour le stade de vermicompostage, on a 5 tableaux. Les germes du compost, les pathogènes et d'intérêts sont regroupés dans 2 tableaux. La combinaison des germes pathogènes et d'intérêts est justifiée par le fait qu'un même germe peut être à la fois pathogène et d'intérêts.

III.1.1. Les germes totaux

Comme on l'a déjà souligné en haut **(III.1),** les germes totaux ont été présentés sous forme de tableaux et graphique.

L'analyse du **tableau1** montre que le compost à base de PR contient plus de microrganismes (**3,28**. **10^{12})** que les autres types de compost alors que le compost à base d'écume et bagasse de canne à sucre (**1,36. 10^{12}**) contient moins de germes par rapport aux autres. Cela est expliqué par la nature de la matière organique facilement ou difficilement biodégradable.

Tableau 1. Dénombrement des colonies à T_0, le 26 juin 2023

Type de compost / Paramètres	BR	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	35	34	39	40	35	38
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC×10^{12})	2,68	3,28	1,36	2,44	2,04	3,04

Le **tableau 2** montre que la paille de riz contient plus de microorganismes que les autres types de matière organique **(3,42.10^{12})**, l'EBCS contient moins **(1,57. 10^{12})** par rapport aux autres types de compost.

Comparé au tableau à T_0, le tableau à T_{15} montre un acroissement général des microorganismes dans tous les types de compost.

Tableau 2. Dénombrement des colonies à T_{15}, le 11 juillet 2023

Type de compost / Paramètre	B R	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	31	30	35	37	32	34
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC×10^{12})	2,96	3,42	1,57	2,51	2,15	3,21

Au bout de 30 jours après inoculation des vers de terre, **(Tableau 3)** la population microbienne a augmenté, les nutriments sont encore abondants pour ces microorganismes.

Tableau 3. Dénombrement des colonies à T_{30}, le 27 juillet 2023

Type de compost / Paramètre	B R	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	29	28	30	31	30	31
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC$\times 10^{12}$)	3,76	4,12	3,92	3,28	2,32	4,24

A 60 jours, **(Tableau 4)** la population microbienne commence à diminuer, la cause principale susceptible de conduire à ces résultats est la diminution des nutriments.

Tableau 4. Dénombrement des colonies à T_{60}, le 28 Août 2023

Type de compost / Paramètre	B R	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	28	28	29	32	30	30
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC$\times 10^{12}$)	3,60	4,02	3,32	3,22	2,20	4,03

A 90 jours **(Tableau 5),** la diminution de la population microbienne continue d'une manière générale dans presque tous les types de substrats.

Tableau 5. Dénombrement des colonies à T_{90}, le 30 Septembre 2023

Type de compost / Paramètre	B R	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	28	29	28	30	29	28
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC$\times 10^{12}$)	2,88	3,34	1,52.	2,54	1,90	3,21

A la période de 4 mois (**Tableau 6**), la chute des germes totaux continue. Les microorganismes s'adaptent mal aux mauvaises conditions du milieu sauf dans le cas des **CR** et **FENPH**.

Tableau 6. Dénombrement des colonies à T_{120}, le 2 novembre 2023

Type de compost / Paramètre	B R	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Température (en ^{0}C)	28	29	28	30	29	28
Masse échantillon (en g)	5	5	5	5	5	5
Volume ensemencé (en µL)	100	100	100	100	100	100
Germes totaux (en UFC$\times 10^{12}$)	2,5	3	1,4	2,44	1,95	3,3

De façon générale, le **tableau 7** montre que la population microbienne a suivi une évolution selon la nature de la matière organique.

Tableau 7. Présentation condensée des UFC.10^{12} des six types de MO

Période / Type de Compost	T_0	T_{15}	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
BR	2,68	2,96	3,76	3,60	2,88	2,5
PR	3,28	3,42	4,12	4,02	3,34	3
EBCS	1,36	1,57	3,92	3,32	1,52	1,4
FV	2,44	2,51	3,28	3,22	2,54	2,44
CR	2,04	2,15	2,32	2,20	1,90	1,95
FENPH	3,04	3,21	4,24	4,03	3,21	3,3

Le graphique (**figure 20**) montre l'évolution des microorganismes dans les différents types de compost en fonction du temps. Ici, chaque type de compost contient des bactéries dont le nombre est proportionnel à sa nature et le degré de sa pré- décomposition.

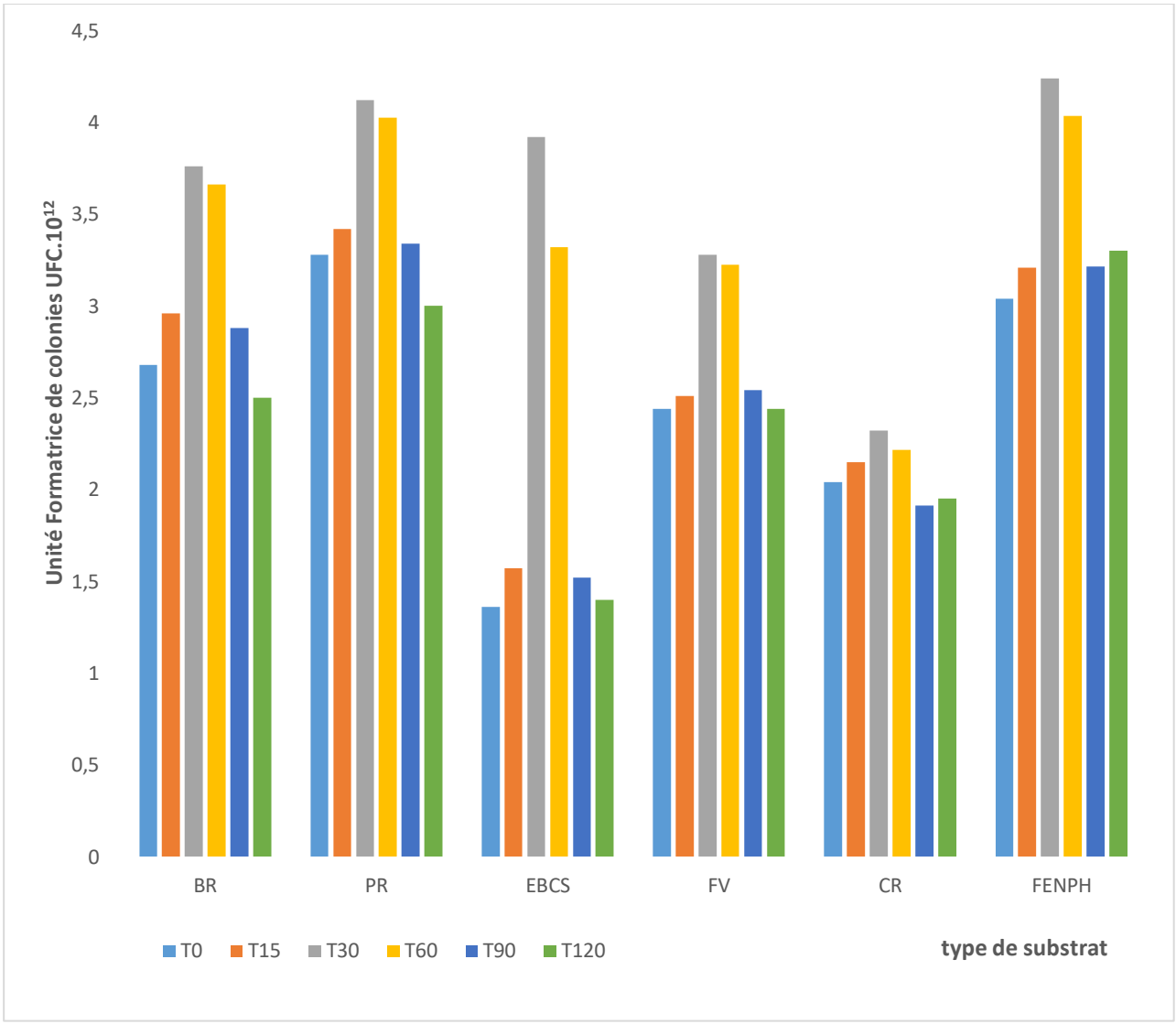


Figure 20 : Evolution du microbiote dans les six types de composts

III.1.2. Microorganismes pathogènes et d'intérêts

Sur les figures 21 et 22, la distinction entre champignons et bactéries sur milieu de culture est difficile. Néanmoins, les champignons se présent sous forme de colonies en masse et les bactéries sous forme de points s'il n'y a pas fusion de colonies proches.

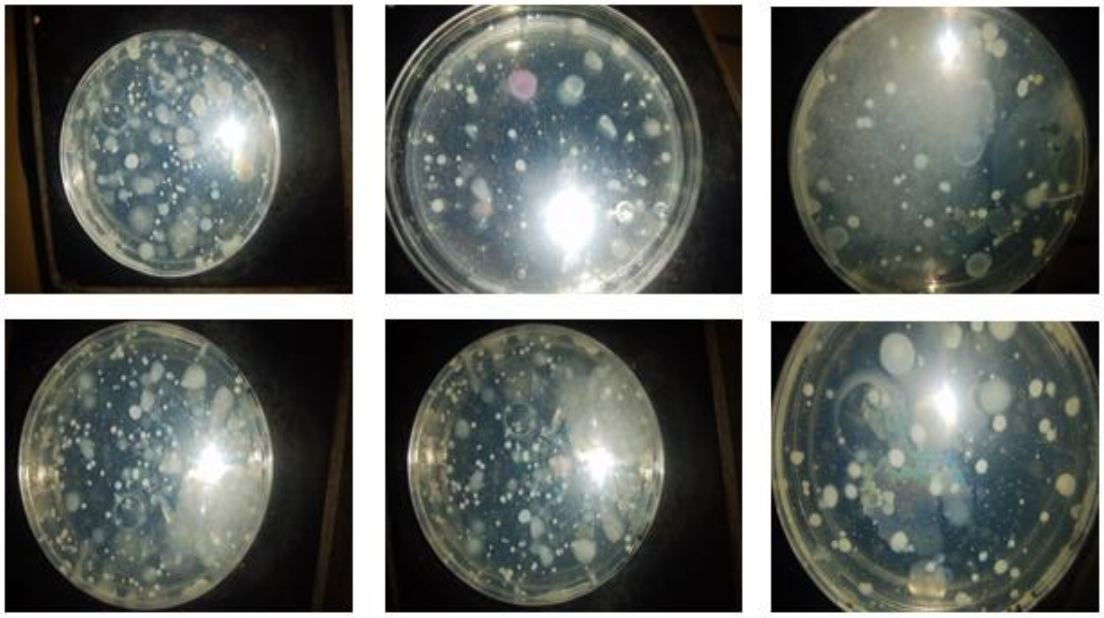


Figure 21: Boîtes de pétri contenant des champignons (Photo de l'auteur, 2023)

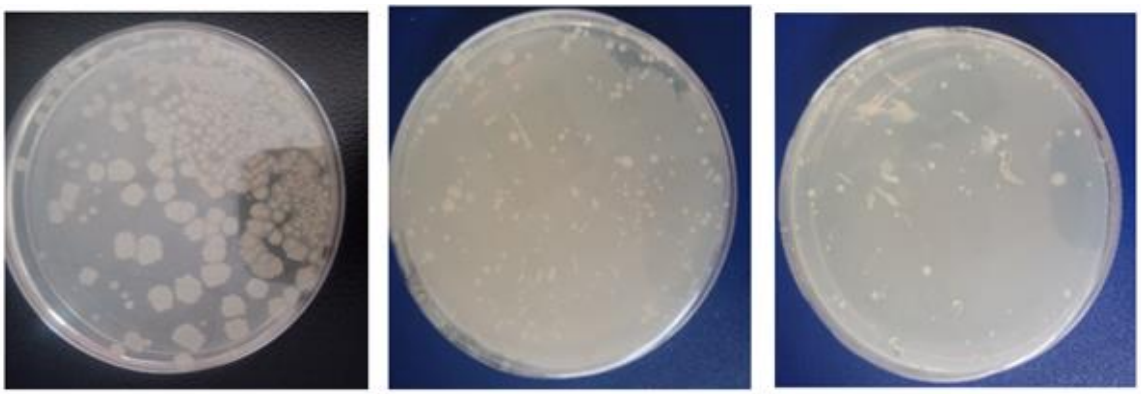


Figure 22: Boîtes de pétri contenant des bactéries (Photo de l'auteur, 2023)

III.1.2.1. Bactéries.

Le **tableau 8** montre certaines bactéries trouvées dans les différents types de compost. Les espèces comme *Escherchia coli* et *Salmonnella* ont été trouvées avec un nombre supérieur aux autres bactéries pathogènes et d'intérêts. Ce tableau montre l'énumération de bactéries en UFC.10^{2}/g de compost sec en comparaison avec la flore totale au T_{120}.

Tableau 8. Germes pathogènes et d'intérêts d'origine bactérienne

Flore totale / Germes pathogènes	BR	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
	$2{,}5.10^{12}$	3.10^{12}	$1{,}4.10^{12}$	$2{,}44.10^{12}$	$1{,}95.10^{12}$	$3{,}3.10^{12}$
Escherchia coli	$2{,}1.10^{2}$	$2{,}8.10^{2}$	$2{,}6.10^{2}$	$1{,}68.10^{2}$	$2{,}72.10^{2}$	7.10^{2}
Salmonnella	$1.9.10^{2}$	$2{,}08.10^{2}$	$0{,}7.10^{2}$	$2{,}4.10^{2}$	$1{,}6.10^{2}$	$1{,}68.10^{2}$
Staphylococcus	0	0	0	+	+	0
Streptococcus	+	0	0	0	+	0
Enterobacteries	+	0	+	+	+	+
Bacillus	+	+	+	+	+	+
Coccidies	0	0	0	0	0	0
Clostridium	0	0	0	0	0	0
Klebsiella	0	0	0	0	0	0
Listeria	0	0	0	+	+	+

+ : Présence irrégulière de germes dans les boîtes de cultures et en nombre négligeable d'UFC

0 : Absence de germes

III.1.2.2. Champignons

L'énumération de champignons pathogènes et d'intérêts (**Tableu 9**) en nombre d'UFC.10^{4}/g de substrat sec a montré que les champignons sont, comme les autres microorganismes, présents dans le compost. Cependant, ils sont moins nombreux par rapport aux bactéries.

Tableau 9. Germes pathogènes et d'intérêt d'origine fongique

Typs de germes fongiques	BR	PR	EBCS	FV	CR	FENPH
Germes totaux	$5{,}4.10^{4}$	8.10^{4}	10.10^{4}	4.10^{4}	$4{,}5.10^{4}$	$3{,}2.10^{4}$
Mucor sp.	+	0	+	+	0	0
Aspergillus sp.	2.10^{1}	+	0	0	0	0
Trichoderma sp.	0	0	0	+	0	+
Fusarium sp.	3.10^{1}	$0{,}6.10^{1}$	$2{,}5.10^{1}$	$2{,}5.10^{1}$	4.10^{1}	0
Rhizomucor sp.	+	+	+	0	0	0
Rhizopus sp.	+	0	0	+	+	0
Geotrichum sp.	0	0	+	+	+	+
Penicilium sp.	0	0	$4{,}5.10^{1}$	$1{,}4.10^{1}$	$0{,}6.10^{1}$	$2{,}8.10^{1}$
Aureobasidium sp.	+	0	+	+	+	+
Macrophomina sp.	+	+	0	+	+	+
Cladosporium sp.	0	0	+	+	+	+
Scopulariopsis sp.	0	0	+	0	+	0

+ : Présence irrégulière de germes dans les boîtes de cultures et en nombre négligeable d'UFC

0 : Absence de germes

III.2. Discussion des Résultats

III.2.1. Germes totaux.

Sur le graphique **(figure 20)**, l'évolution de la population bactérienne totale varie en fonction du type de substrat. Jusqu'à 30 jours, il y accroissement de la population bactérienne totale. Au bout de deux mois de vermicompostage, on remarque une diminution de l'effectif de la population bactérienne. Ces résultats corrèlent avec ceux d'**Imache (1997)** qui a dit que l'évolution microbienne suit une phase de latence, de croissance, phase stationnaire et phase de declin. La croissance microbienne suit une courbe logarithmique.

La diminution est justifiée par l'abondance de vers de terre dans le substrat et la prédation de ces derniers exercée sur les microorganismes. Les vers de terre multiplient certains types de bactéries qui se chargent en nutriments grâce au mucus sécrété par ces vers de terre. Une fois les bactéries chargées en nutriments, la plante les capture pour s'en nourrir. Les vers de terre mangent les bactéries pathogènes et favorisent le développement des bactéries d'intérêts. Cela corrèle avec les travaux de **Brown (1995)** qui stipule que le vers de terre élimine les microorganismes pathogènes tout en favorisant la multiplication des microorganismes utiles.

Les vers de terre ingèrent la matière organique en même temps que les microorganismes. Ils rejettent sous forme de turricules riches en humus. La dispersion des microorganismes se fait soit au contact du corps des vers soit par le passage dans leur tube digestif (**Brown, 1995)**. Cela traduit non seulement la production du compost mais aussi la régulation de la population microbienne.

Certaines bactéries vivent en association avec le vers de terre et sont symbiotiques aux plantes. Elles ont été identifiées comme étant le groupe des **PGPR** ou Plant Growth Promoting Rhizobacteria. Ces bactéries appartiennent aux genres *Bacillus, Azospirillum, Enterobacter, Klebsiella, Pseudomonas, Rhizobium, Bradyrhizobium, Azorhizobium, Allorhizobium, Sinorhizobium* et *Mesorhizobium* **(Hayat et al, 2010).** Un bon nombre de bactéries qui vivent dans le tube digestif des vers de terre aident ces derniers à dégrader les substances cellulosiques **(Brown, 1995)**. Les genres *Bacillus, Enterobacter* et *Listeria* ont été trouvés lors de notre recherche. Cela témoigne l'association de symbiose avec ces vers.t'

III.2.1.1. Compost à base de balle de riz (BR)

Les germes totaux trouvés au cours de notre recherche sur les matières organiques à base de balle de riz, ont été representés sous forme de graphique. La variation de la population des bactéries se situe en général entre $2{,}5.10^{12}$ et $3{,}75.10^{12}$ de germes dans 5 grammes de compost, soit une moyenne de $6{,}25.10^{11}$ bactéries par gramme de vermicompost. En effet, cette recherche qui a porté sur la dégradation de balle de riz comme produit résiduaire

organique (PRO) a montré que beaucoup de microorganismes utiles sont présents dans cette matière organique (MO).

1 ,7206.10^{12} bactéries plus d'autres faunes par gramme de matière sèche sont retrouvées dans le compost à base de PR selon **Kouakou Konan, (2020)** dans sa recherche qui a porté sur l'activation du compostage de la balle de riz par effet du calcium. Comparativement aux valeurs que nous avons trouvées (6,25.10^{11} bactéries par g de compost à BR) , la différence va résider dans le fait que la balle de riz a été activée par le calcium dans le cas de ce chercheur d'où un nombre élevé de bactéries.

III.2.1.2. Compost à base de Paille de riz (PR)

Les phénomènes observés au cours des analyses faites sur ce produit résiduaire agricole dans le processus de vermicompostage ont montré une grande différence car ici, le produit à base de paille de riz devrait être activé pour contenir plus de bactéries par gramme de compost. Les valeurs varient aussi de manière proche de celles de balle de riz c'est-à-dire 7,12.10^{11}. germes par gramme de matière sèche. Sur les six bacs, seuls les bacs à base des résidus de riz ont connu une dégradation lente malgré son amendement avec d'autres matières organiques. Cette matière contient, d'après **Traoré Moctar (2019)** dans sa recherche sur l'activation de paille de riz par effet du phosphore, 1,9206.10^{12} bactéries par gramme de compost**.**

L'activation de la paille de riz par le phosphore peut justifier la différence entre nos résultats et ceux de Traoré Moctar.

III.2.1.3. Compost à base d'écume et bagasse de canne à sucre

Les résultats trouvés au cours de cette recherche montrent que le vermicompost renferme des microrganismes utiles variant entre 1,36.10^{12} et 3,92.10^{12} dans 5 grammes de matière organique sèche de ce produit résiduaire organique, soit 5,28.10^{11} microorganismes par g de compost. Les études faites ont montré que dans un gramme de compost, on peut y trouver entre 1000 et 10.000 millions de microorganismes c'est-à-dire entre 10^{9} et 10^{10} UFC. **(Mayer, 2018).** Ici, nous avons trouvé un nombre supérieur car les matières organiques dans nos recherches ont été amendées favorisant ainsi la multiplication des bactéries.

III.2.1.4. Compost à base de Fumier de vache.

Les résultats trouvés au cours de notre recherche montrent que cette matière contient beaucoup de microorganismes facilitant la dégradation de la matière. Dans 5 grammes de matière de fumier de vache, on remarque que le nombre de microorganismes au cours du vermicompostage varie entre 2,44.10^{12}et 3,28.10^{12} soit une moyenne de 5,72.10^{11}

microorganismes par gramme de matière sèche. Le vermicompostage à base de fumier de vache est une alternative durable de valorisation des déchets organiques des ovins et bovins au Burundi. Ce processus permet , à la fin , d'obtenir un compost très riche en milliers de milliards de microorganismes et nutrif pour les sols qui sont pour une grande partie pauvres en matières organiques et par conséquent moins fertiles. **(Liegui, Ginette et Sandrine, 2019).** Le fumier de vache contient lui aussi un nombre important de microrganismes comme nous l'avons constaté dans nos recherches et signalé par les auteurs cités dans le paragraphe précédent.

III.2.1.5. Compost à base du contenu ruminal

Les ovins et bovins et bien d'autres ruminants contiennent dans leur panse, de la matière organique provenant de la digestion des aliments . Les résultats que j'ai trouvé au cours du dénombrément des germes totaux ont montré les valeurs de $1{,}90.10^{12}$ pour le minimum et le maximum de $2{,}32.\ 10^{12}$ de microorganismes soit une moyene de $4{,}22.\ 10^{11}$ de microorganismes par gramme de matière sèche. Ce nombre de bactéries avoisine aussi au nombre de bactéries trouvées dans un gramme de compost comme déjà souligné (**III.2.1.3**).

III.2.1.6. Compost à base des fibres et épis de noix de palmier à huile

D'après les analyses faites au laboratoire, les épis et noix de palmier à huile enregistrent un maximun de $4{,}24.\ 10^{12}$ contre un minimum de $3{,}04.\ 10^{12}$ de microorganismes par 5 grammmes de MO sèche, soit une moyenne de $7{,}28.\ 10^{11}$ de microorganismes par gramme de matière organique. Ce type de compost est par conséquent le premier à contenir un nombre plus élevé de microorganismes par rapport aux autres types de compost. Les résultats en terme de bactéries par gramme de matière sèche avoisinent ceux des autres recherches (voir **III.2.1.3**)

III.2.2. Germes pathogènes et d'intérêts

III.2.2.1. Bactéries

Un agent pathogène est un organisme qui présente des mécanismes favorisant la colonisation directe ou indirecte d'un hôte pour se multiplier en son sein. Cette colonisation conduit à l'altération graduelle de certains organes, à la fragilisation de certaines barrières, la conséquence étant le développement d'une infection qui peut conduire à la mort de l'hôte. Les germes d'intérêts ne sont pas généralement pathogènes à l'homme **(Baudart, 2014).**

L'obtention des germes pathogènes nécessite une culture sur des milieux sélectifs tout comme les microorganismes efficaces ou d'intérêts d'origine naturelle sans manipulation

génétique et qui sont physiologiquement compatibles les uns avec les autres **(Dorain, 2015).**

Au cours de nos analyses, les bactéries les plus trouvés dans le compost sont *Escherchia coli* et *Salmonella*. Les autres germes bactériens sont absents ou s'y rencontrent sous forme de trace **(tableau 8).** Parmi les bactéries du compost, notre recherche a révélé un groupe formé par les genres suivants : *Escherchia coli, Salmonnella, Staphylococcus, Streptococcus* et *Listeria* et un autre formé par *Enterobacter* et *Bacillus.* Nos recherches sont conformes aux résultats de deux chercheurs, **Bouskraoui et al (2017)** qui classent le premier groupe en bactéries pathogènes et **Hayat et al** (**2010)** qui classent le deuxième groupe en bactéries d'intérêt capital dans le processus de compostage. La phase de maturation intervient en général dans l'inactivation de *Listeria monocytogenes* et non *Salmonella* persistants et mettent en évidence le rôle clé de la fraction biotique du compost dans l'inactivation du pathogène (**Mélanie,2006)**.

Les analyses microbiologiques faites au cours de notre travail de recherche révèle que l'abondance des bactéries pathogènes utilisée pour juger l'innocuité microbiologique des composts était très faible dans la majorité des composts analysés. Elle varie de 7.10^1 à $2{,}4.10^2$ UFC pour *Salmonella* et 7.10^2 et $2{,}8.10^2$ UFC pour *Escherichia coli*. Les *Escherichia coli* et *Salmonella* sont généralement des bactéries acceptées comme des bioindicateurs de qualité hygiénique du compost mais que les valeurs limites peuvent varier d'un Pays à un autre et en fonction des types de MO.

Les valeurs trouvées sont comprises entre les valeurs limites prévues dans les normes **AFNOR NFU 44-051** qui fixent les limites de 1000 UFC par gramme de matière sèche pour la qualité hygiénique concernant les bioindicateurs. Certains des composts s'écartent de ces valeurs pour des raisons peut être des lieux de conception du vermicompostage suscetibles d'une éventuelle contamination. Les autres bactéries pathogènes étaient absentes ou présents sous forme de trace. L'innocuité microbiologique des vermicpomsts produits, est en générale confirmée.

III.2.2.2. Champignons

L'analyse de la microflore à partir des différents types de matière organique compostée a révélé la présence des différentes espèces fongiques dans le compost qui en résultait, ce sont notamment *Aspergillus, Cladosporium, Fusarium, Mucor, Rhizomucor, Rhizopus, Trichoderma, Aureobasidium, Penicillium* et *Geotrichum*. Les mêmes résultats furent

trouvés par **Doumbouya et al (2021).** Les genres *Aspergillus, Penicillium, Mucor, Rhizomucor* sont des champignons d'intérêt capital dans la dégradation de la MO. Les genres *Trichoderma* et *Fusarium* sont connus pour protection des plantes contre les agents pathogènes. Néanmoins, les genres *Aspergillus* et *Fusarium* peuvent aussi jouer le rôle de pathogènes (**Doumbouya et al, 2021).**

L'évaluation de la charge fongique des différents composts analysés au cours de notre étude a montré une dominance du genre *Fusarium* sauf dans le compost à base de fibres et épis de noix de palmier à huile. Les genres *Aspergillus* et *Penicillium* sont également trouvés dans la majorité des composts analysés. Ainsi, les valeurs des germes totaux varient d'un compost à l'autre. $5{,}4.10^4$ germes par g de matière sèche pour le compost à BR, 8.10^4 germes pour PR, 10.10^4 germes pour EBCS, 4.10^4 germes pour FV, $4{,}5.10^4$ pour CR et $3{,}2.10^4$ germes pour EFNPH.

Les valeurs trouvées au cours de la recherche corrèlent avec celles trouvées par **Anastasi et al (2005)**, dans leur étude portant sur l'isolement et l'identification de la flore fongique de compost et de vermicompost. Ces auteurs ont trouvé des valeurs de charge fongique totale fluctuant entre 5.10^4 et $8{,}2.10^4$ UFC par gramme de matière sèche.

CHAPITRE IV. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

IV.1. Conclusion

Bien que les microorganismes soient invisibles à l'œil nu, ils jouent un rôle capital dans la vie. C'est dans cette optique que la connaissance de leur fluctuation dans certains processus s'avère très important. Leur absence ou présence n'est pas gratuite dans un processus de transformation.

Les domaines d'application sont diversifiés pour ces microorganismes. En agriculture, Le rendement agricole est fonction du vermicompost, du sol et de l'interaction entre le vermicompost et le sol. L'amendement d'un sol ne se limite pas uniquement à lui fournir de la matière organique. Le sol a également besoins de microorganismes efficaces. Cela contribue à l'amérioration de la santé du sol et des plantes en particulier.

Elle permet de caractériser les microorganismes de chaque type de matière organique. Ainsi, les balle et paille de riz ; écume et bagasse de canne à sucre ; fumier de vache ; contenu ruminal et fibres et épis de noix de palmier à huile vermicompostés renfermaient des milliers de milliards de microorganismes. Ainsi, nous avons trouvé une moyenne de $6{,}25.10^{11}$ bactéries par gramme de vermicompost sec pour la BR ; $7{,}12.10^{11}$ bactéries dans le cas de PR ; $5{,}28.10^{11}$ microorganismes par g de compost sec à base d'EBCS ; $5{,}72.10^{11}$ microorganismes par gramme de matière sèche de FV; $4{,}22.\ 10^{11}$ de microorganismes par gramme de matière sèche du CR et $7{,}28.\ 10^{11}$ de microorganismes par gramme de matière organique à base de FENPH.

Etant donné que les vers de terre, avec assez de nourriture, se reproduisent et se multiplient, leur augmentation en biomasse entraine la diminution des bactéries car ces dernières constituent une nourriture pour ces vers de terre. Cela traduit le phénomène de régulation de la population microbienne. Les bactéries déclinent suite non seulement à la diminution des nutriments mais aussi à la régulation opérée par les vers de terre.

Vers la maturation du compost, les bactéries sont moins nombreuses qu'avant la maturation. Ce stade semble correler aux deux premières phases d'analyse. Un compost mature contient de bactéries et des champignons parmi lesquels on peut distinguer ceux d'intérêts dans le processus du vermicompostage. Les germes pathogènes rencontrés dans le compost mature ne dépassent les normes fixées en amendement organique sans engrais chimique.

IV.2. Recommandations

La santé du sol et par conséquent sa fertilté sont conditionnées par sa richesse en matière organique . Le rendemend d'une terre donnée en terme de production dépend non seulement de cette richesse humique mais aussi de sa capacité d'échange cationique (CEC) qui dépend à son tour de la contenance du sol en microorganismes efficaces (EM).

La présente étude aimerait recommander ce qui suit :

- **Aux autorités et structures compétentes en agroécologie et agriculture biologique**
  - La création des centres de collecte et de valorisation des produits résiduaires organiques ;
  - Sensibilsation la population Burundaise à recourir au vermicompost émanant de produits résiduaires organiques ;
  - Sensibiliser la population à l'utilisation beaucoup plus d'un compost organique à la place de l'engrais chimique ;
  - Lancer et favoriser la culture des EM qui seront utilisés à des faits appropriés ;
  - Multiplier les centres de recherche en matière de la microbiologie ;
  - Fournir des équipements adéquats et modernes aux laboratoires de recherche en macriobiolgie appliquée ;
- **A la population burundaise**
  - Utilisation du compost à base de la matière organique à la place des engrais chimiques ;
  - Se soucier du rôle des produits résiduaires organiques locaux dans le vermicompostage et la nutrition du sol ;
  - Conserver les produits résiduaires organiques et les transformer en un compost au lieu de les brûler ;
  - Protéger et nourrir écologiquement les sols par un vermicompost et
  - Pratiquer l'élevage des vers de terre composteurs
- **Aux chercheurs**
  - D'effectuer des recherches sur les microorganismes efficaces (EM)
  - De cultuver et favoriser le développer des microorganismes efficaces
  - Elaborer des Plans stratégiques de protection des microorganismes efficaces

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ADEME, ASPESA et OLENTICA. Microorganisme et risques sanitaires. Quelques précautions simples pour composter in *Impacts sanitaires et environnementaux du compostage domestique*. BIO intelligence Service. Fiche technique n°5, 2015. 126 p.
2. Adhikary, S. *Vermicompost, the story of organic gold*, 2012. 136 p.
3. Afnor B., *Amendements Organiques, Dénominations, Spécifications et Marquages*, 2006. NFU 44 – 051, p. 32
4. Ahmed, F., Ahmed, L., Khan, M. S. *Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities, Microb. Res.,* 2008. 163, p.173-181.
5. Alfred, G. et Vincent M. *Compost: avantages et inconvénients.* Autriche, 2020, 2p.
6. Anastasi A., Varese G. C. et Marchisio,V. F. Isolation and identification of fungal communities in *compost and vermicompost. Mycol.* 2005. 97 (1), p. 33–44
7. Ansari, A. A., & Ismail, S. A. Earthworms and Vermiculture Biotechnology. In *Management of Organic Waste* 2012, INTECH, p. 11.
8. Appelhof, M., Webster, K., et Buckerfield, J. *Vermicomposting in Australia and New Zealand*, 1996. 179 p.
9. ATLAS, R.,M, G. SAYLER, R.S, BURLAGE, et A.K, BEJ. *Molecular approaches for environmental monitoring of microorganisms*, Biotechniques 12,1992. P. 706-718
10. Barles, S. History of waste management and the social and cultural representations of waste. *The basic environmental history.* Spring, 2014. 236 p.
11. Bedon, P. *Lombriculture : Destinée et perspectives d'utilisation des produits obtenus*., 1986. 257 p, Thèse de Doctorat
12. Béguin, M. *L'histoire des ordures : de la préhistoire à la fin du 19e siècle*, 2013.79 p,
13. Bouskraoui, M. , Zouhair, S. , Soraa, N. , Benaouda, A. , Zerouali, K. et Mahmoud, M. *Guide pratique des bactéries pathogènes.*, 2017. 412 p. SOMIPEV Edition
14. Brown, G.G., Barois, I. et Lavelle, P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactionswith other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 36, 2000. p. 177-198
15. Brown, G.G. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? In *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity*: Springer, 1995 pp. 247-269.
16. Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., et Brussaard, L. Soil quality – *A critical review*. 2018. 16 p.

17. Card, A.B., J.V. Anderson et J.G. Davis. *Vermicomposting Horse Manure*. Colorado State University Cooperative Extension, N° 1224. 2000, p.122

18. CEFREPADE. *Compostage des déchets ménagers dans les pays en développement : Modalités de mise en place et suivi d'installations décentralisées pérennes*,2012. 57 p.

19. Chaoui, H. *Urban Farms Organic*, 2022. 46 p.

20. Chowdhury, R.B., Moore, G.A., Weatherley, A.J., et Arora, M. *Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation*, 2017. 138 p.

21. Collaert, J-P. *Lombricompost pour tous*, 2009. 15 p.

22. Curry, J.P. et Schmidt, O. The feeding ecology of earthworms – a review. *Pedobiologia*, 50, 2007. p 463-477.

23. Debril, J. *Gestion des déchets de Jussie par le compostage*, 2005. 98 p.

24. Dorain F. *Les microorganismes efficaces en milieu paysan*, 2015. 112 p.

25. Doumbouya, M. Inventaire de la mycoflore du compost de differents types de matieres organiques et evaluation de l'efficacité de leur extrait sur trois agents phytopathogenes fongiques,*American Journal of Innovative Research and Applied Sciences,* 2021 ISSN 2429-5396 I

26. Edwards, C.A. et J.R. Lofty. *Biology of Earthworms*, Chapman and Hall Ltd. Londres, 1972, 283 p.

27. Eisenhauer, N. et Scheu, S. Earthworms as drivers of the competition between grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 2008. P 2650-2659.

28. Eisenhauer, N., Reich, P.B. et Scheu, S. Increasing plant diversity effects on productivity with time due to delayed soil biota effects on plants. *Basic and Applied Ecology*, 13, 2012. p. 571-578.

29. FAO. *Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Documents de Travail Sur Les Terres et Les Eaux*, 2005. 167 p. Rapport

30. Finstein M.S., Morris M.L. *Microbiology of municipal solid waste composting. Advances in Applied Microbiology*, 1975, p.19, 113-151.

31. Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., *A review on circular economy:* The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, 2016. 206 p.

32. Glick B.R, Todorovic B., Czarny 1., Cheng Z., Duan J., McConkey B. Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2007. 26: 227-242.

33. Golueke C.G. *Principes of Composting*, 1991. 7 p. Fiche technique

34. Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., Ahmed, L. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: *A review. Ann. MicrobioL*, 2010. 60. p. 579-598

35. Hicintuka,C. et Mulungula Masilya P. *Gestion optimale et intégrée de la fertilité des sols acides du Burundi*, 2013. p. 74-84

36. Houot, S., Pierre, P., Decoopman, B., Trochard, R., Gennen, J., et Luxen, P. *Minéralisation de produits résiduaires organiques : des sources d'azote variées*, 2015. 107 p.

37. Igué A. M., Agossou V. et Ogouvidé F. T. Influence des systèmes d'exploitation agricoles sur l'intensité de la dégradation des terres dans le département des collines au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin* Nº 61. 2008, p. 39-47

38. Imache, A. EL. *Microbiologie générale*, volume 2, 1997. 59 p

39. JIRCAS (Japan International Research Center for Agricultural Sciences). Service du Développement Rural. *Guide pour la gestion et la Conservation des Ressources Naturelles Manuel technique* , 2012. 15 p

40. John,S., Caldwell. *Technique du compostage*, 2012. 14 p

41. Julia Baudart, J. et Paniel N. *Sources et devenir des micro-organismes pathogènes dans les environnements aquatiques*, 2014. 252 p.

42. Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J.,. Soil health in agricultural systems. Philosophical Transactions Of The Royal Society B-Biological Sciences, 2008 p. 363, 685-701.

43. Killham, K. Soil Microbial Ecology. *Applications in Agricultural and Environmental Management*, 1993. 132 p.

44. Kouakou Konan,P. *Activation du compostage de la paille de riz par effet du calcium*, 2020. 49 p.

45. Lauriane, G. *Caractérisation de rhizobactéries du groupe des bacillus bénéfiques à la croissance de la tomate*, 2015. 141 p.

46. Leroux, B. *L'émergence de l'agriculture biologique en France*, 2015. 57 p

47. Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., Ménassieu, J., Agronomy for sustainable agriculture. *A review Agron* Sustain, 2009. springer, New York p. 1-17

48. Liegui, Ginette et Sandrine. *Vermicompostage* : *Une alternative durable de valorisation des déchets organiques ménagers en maraîchage périurbain à Yaoundé*, 2019. p. 64-71

49. Lohri, C.R., Diener, S., Zabaleta, I., Mertenat, A., Zurbrugg, C. *Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products,* 2017.

50. Lores, M., Gómez-Brandón, M., Pérez-Díaz, D., et Domínguez, J. Using FAME profiles for the characterization of animal wastes and vermicomposts, *Soil Biology and Biochemistry*, *38* (9), 2006. P. 2993–2996.

51. Loveland, P., Webb, J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions*: a review. Soil Tillage,* 2003.

52. Mayer, N. *Bactéries et champignons sont en constante compétition pour les nutriments*, 2018. Dossier d'actualité

53. Mélanie, L. *Microbiologie, Sciences de l'alimentation*, 2006. Journaliste. 6 p

54. MEMENTO DE L'AGRONOME. Palmier à huile. *Collection Techniques Rurales en Afrique*. 4ème édition, Ministère de la coopération. France, 1993. P. 898- 912

55. Milliet, J. Le lombricomposteur d'appartement, les déchets et la terre urbaine. Le cas de la Suisse romande, *Villes vivrières*, 2015.

56. Morgane Deneuville. *Le compost, une solution formidable pour réduire nos déchets et nourrir nos sols,* 2022.

57. Morin, D. *Reproducing position of earthworms*, 2004. 42 p

58. Munroe, G. *Guide du lombricompostage et de la lombriculture à la ferme Centre d'agriculture biologique du Canada*, 2004. Agri-Réseau (CRAAQ), p. 37

59. Nihorimbere v., Ongena M., Smargiassi M., Thonart P. *BeneficiaI effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. BiotechnoL Agron. Soc. Environ.*, 2011. 15: p. 327-333.

60. Norme Iso 657-1. *Microbiologie de la chaîne alimentaire*, 2001. Fiche 2 : Seuils réglementaires des normes.

61. Norme ISO 6579-1. *Microbiologie de la chaîne alimentaire* , 2017. seuils réglementaires des normes.

62. Oudart, D. *Modélisation de la stabilisation de la matière organique et des émissions gazeuses au cours du compostage d'effluents d'élevage*, 2013. 123 p.

63. Ousmane, G. *Valorisation de glume de mil et balle de riz par compostage : caractérisations physico-chimiques des composts*, 2020. p. 29-38

64. Philippe, Leclerc. *Caractérisation microbiologique des composts à base de résidus chitineux, 1997.* 73 p.

65. Rayfuse, R. et Weisfelt, N. *The Challenge of Food Security*, 2012 . 209 p

66. Rostami, R. *Vermicomposting. Integrated Waste Management*, 2011. 89 p

67. Rouelle, J. *La lombriculture, élevage miracle ou affaire commerciale ? Son rôle par rapport au sol et au compostage*, 1984. 122 p

68. Sharma, K.D., Jain, S. *Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario. Soc. Responsib*, 2020. 115 p

69. Shuster, W. D., Subler, S., & Mccoy, E. L. *Foraging by deep-burrowing earthworms degrades surface soil structure of a fuventic Hapludoll in Ohio*, 2000. 147 p

70. Sierra, J., Desfontaines, L., Faverial, J., et Boval, M. Composting and vermicomposting of cattle manure and green wastes under tropical conditions : carbon and nutrient balances and endproduct quality. *Soil Research* 2013. p.1-10

71. Singh, S., Khwairakpam, M., et Tripathi, C. N. A comparative study between composting andvermicomposting for recycling food wastes. *International Journal of Environment and WasteManagement*, 2013. *12*(3), p. 231

72. Strom, P.F. *Effect of bacterial diversity in thermophilic solid waste composting*, microbial 5, 1985. p. 899-905

73. Surre C. et R. Ziller. *Le palmier. Techniques agricoles et productions tropicales*, 1963. 173 p.

74. Tatiana Windékpè, K. *Fiche technique "Production et utilisation des composts à base des déchets solides des huileries de palme*, 2020. 12 p.

75. Traoré, M. *Activation du compostage de paille de riz par effet du phosphore* , 2019. p. 19-25

76. Van den Berghe, C., P.Sota et A. MUJAWAYEZU. *Etude de la fertilisation intégrée en milieu paysan dans la région naturelle du Mugamba au Burundi*, 1992. pp. 61-87

77. Vessey, J.K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, 2003. p. 255: 571–586.

78. Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais, A., Schwartz, C. *Les services écosystémiques des sols,* 2015. 312 p.

79. Wilson, D., UNEP, ISWA. *Global waste management outlook*, 2015 Session 11 through Session 20, 6830-6847

80. Zegels, A. *Composter les déchets organiques*, 2012, 86 p.

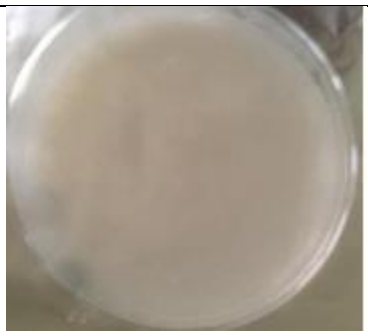
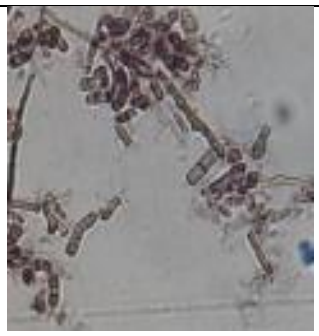
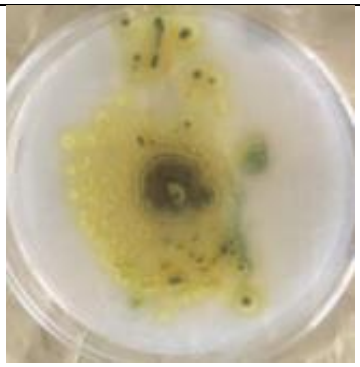
81. Ziegler D., Héduit M. *Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion et environnement.* 1991. *ITCF, ITP* et *ITEB.*

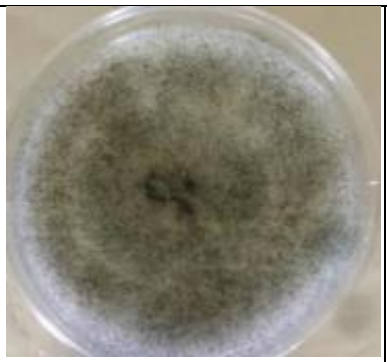
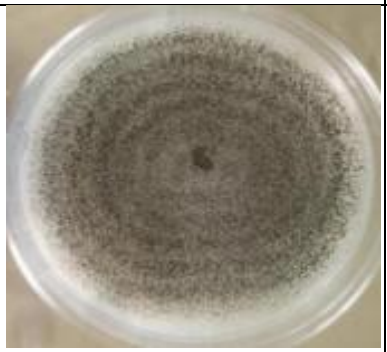
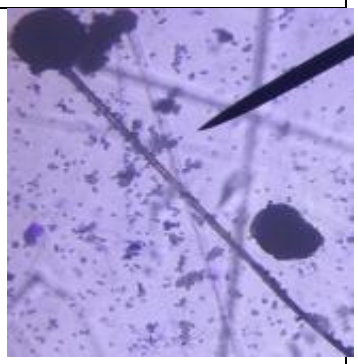
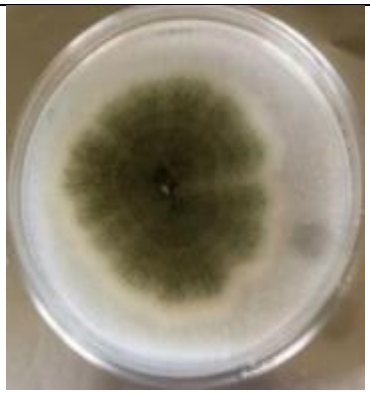
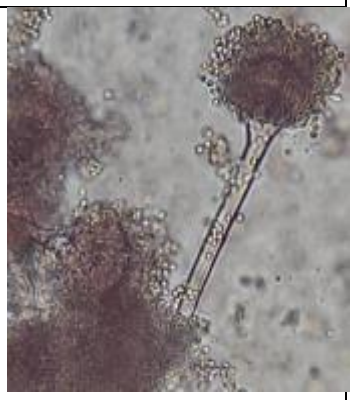
ANNEXES

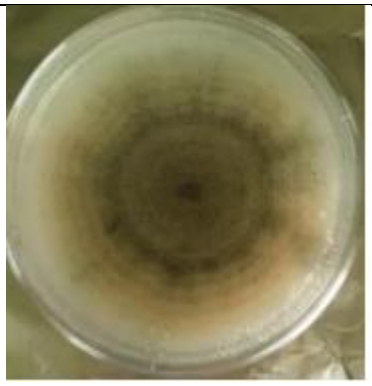
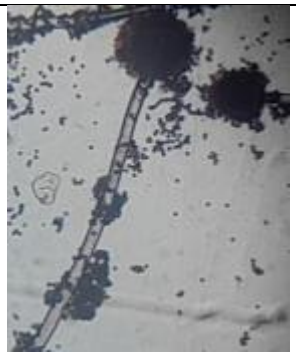
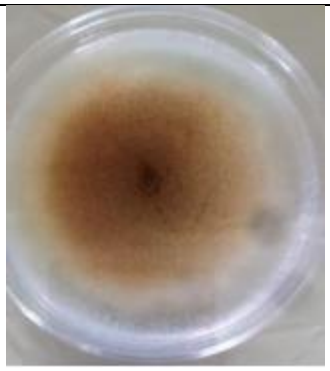
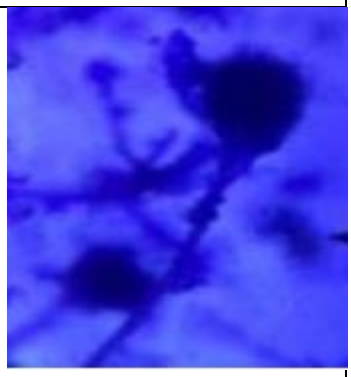
A. Niveau de température et temps néessaire pour détruire certains pathogènes (Golueke, 1991)

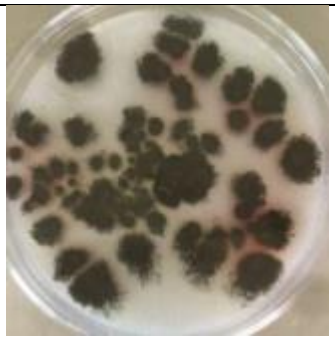
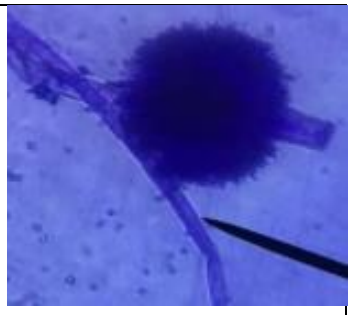
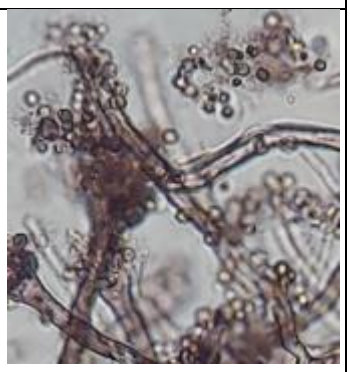
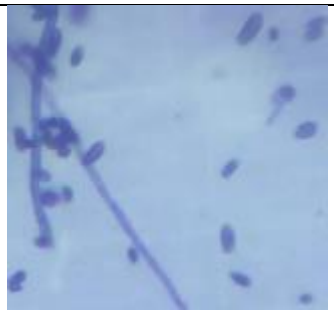
Bactéries pathogènes	T°C létale	**Parasites**	T°C létale
Escherichia coli	15-20 mn à 60 °C ; 1h à 55 °C	*Entamoeba hystolitica*	68 °C, temps inconnu
Salmonella spp	15-20 mn à 60 °C ; 1h à 55 °C	*Taenia saginata*	5 mn à 71 °C
Shigella spp	1h à 55 °C	*Necator americanus*	50 mn à 45 °C

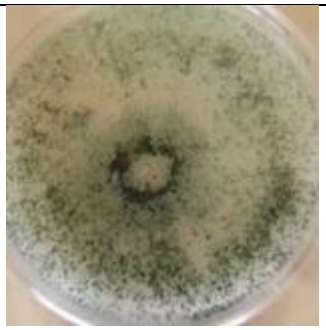
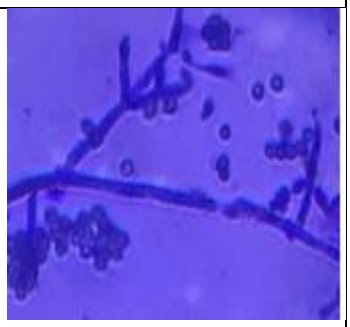
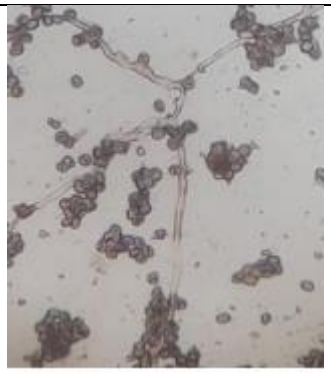
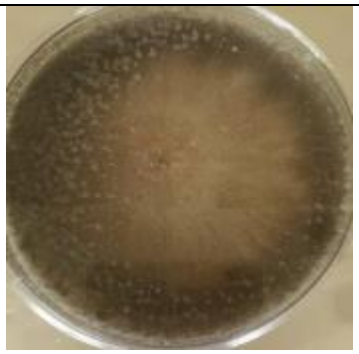
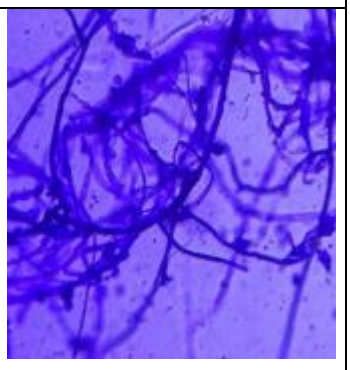
B. Quelques champignons du compost (Doumbouya, 2021)

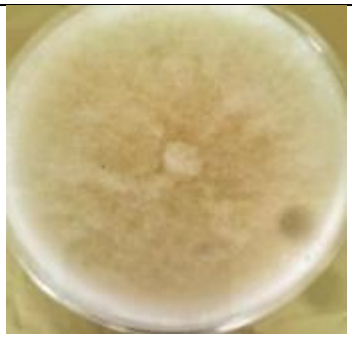
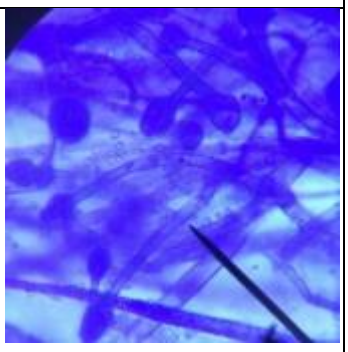
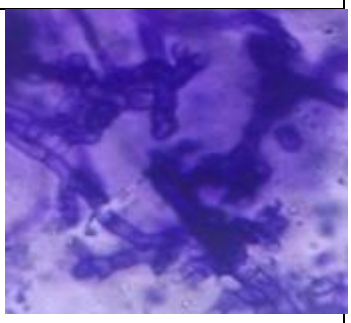
Espèce	**Description**	**Aspect macroscopique**	**Aspect microscopque**
Geotrichum candidum	Colonies blanches. Mycélium hyalin, cloisonné qui se désarticule en de nombreuses arthrospores unicellulaires à paroi lisse, rectangulaire puis à angles qui s'arrondissent.		
Penicilium sp.	Colonie jaune verdâtre d'aspect velouté. Revers jaune brunâtre. Filaments mycéliens septés et hyalin. Conidiophores septés et portant des phialides en verticilles qui donnent des conidies disposées en longues chaînes.		

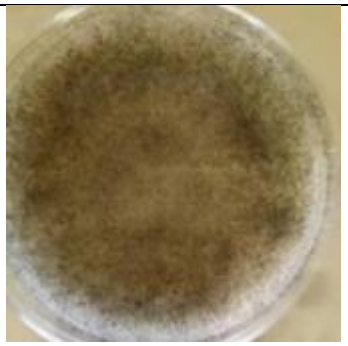
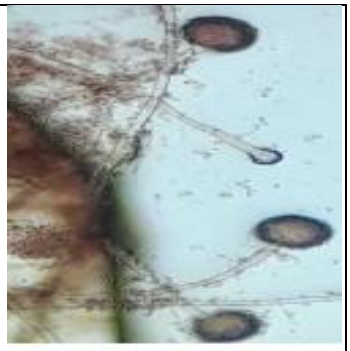
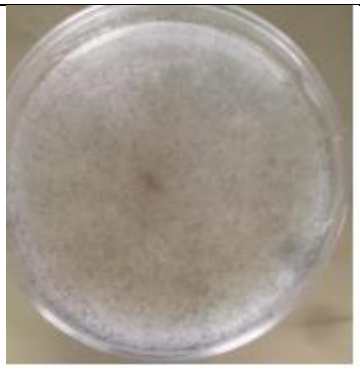
Mucor racemosus Bulliard, J.B.F. (1791)	Colonie grise d'aspect cotonneux. Mycélium constitué d'hyphes siphonneux (sans cloisons). Présence de sporocystophore se terminant en une vésicule (columelle) remarquable à l'intérieur d'un sporocyste globuleux		
Aspergillus niger van Tieghem (1867)	Colonies granuleuses noires à revers pâle. Conidiophore long et hyalin à vésicule globuleuse. Phialides insérées sur vésicule par l'intermédiaire de métules. Conidies brunes globuleuses. Têtes aspergillaires bisériées radiées		
Aspergillus fumigatus Fresen (1863)	Colonie à croissance rapide d'aspect granuleux, vert jaune à gris noirâtre et revers jaune pâle. Conidiophore élargi au sommet en vésicule		

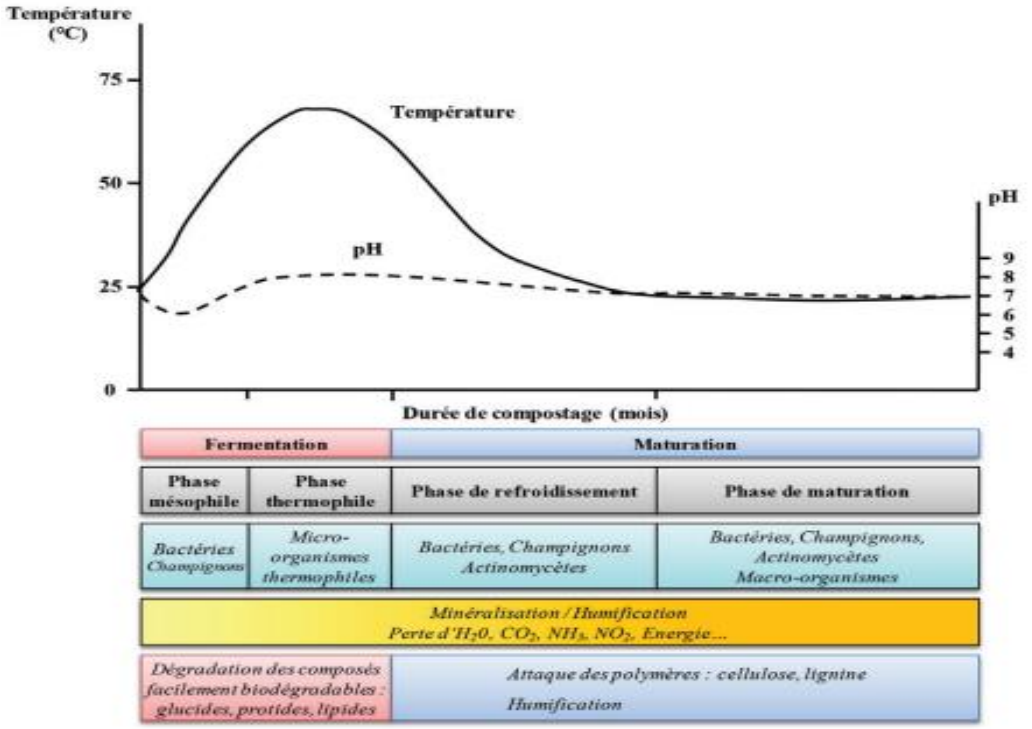
	hémisphérique avec phialides directement insérées. Têtes aspergillaires compactes unisériée		
Aspergillus flavus Link (1809	Colonie à croissance rapide d'aspect poudreux, vert jaune et revers pâle à rosâtre. Conidiophore long et hyalin. Phialides directement insérées à la vésicule sphérique ou portées par des métules. Têtes aspergillaires unisériées ou biseriées		
Aspergillus terreus G. Charles Thom (1918	Colonie poudreuse marron beige. Revers brun pâle orangé. Phialides portées par des métules insérées sur vésicule globuleuse. Conidies globuleuses de petite taille. Tête aspergillaire bisériée, évasée en colonne		

Aspergillus japonicus Saito (1906)	Colonies granuleuses, gris noirâtre. Revers pâle. Conidiophore long et hyalin à vésicule globuleuse. Phialides densément groupées et directement portées par la vésicule. Têtes aspergillaires unisériées compacte et grande		
Aspergillus nidulans G. Winter (1884)	Colonie poudreuse à coloration verdâtre. Revers pourpre. Phialides portées par des métules insérées sur la partie supérieure d'une vésicule sphérique. Conidiophore petit et sinueux. Têtes aspergillaires bisériées, en colonne		
Cladosporium cladosporioides (Fresen.) G.A. de Vries, (1952)	Colonie à croissance lente d'aspect noirâtre. Revers noire. Conidies abondantes, généralement de forme elliptique, unicellulaire et		

	produites en chaîne ramifiée qui se désarticule		
Trichoderma harzianum Rifai (1969)	Thalle vert d'aspect floconneux. Revers incolore. Conidiophore en touffe plus ou moins compact avec des phialides courts sous forme de bouteille portant à leur bout des spores		
Trichoderma sp.	Talle vert foncé, croissant en bande concentrique (zoné). Aspect poudreux. Revers pâle. Phialides incurvés et disposées aux extrémités du conidiophore. Production en grande quantité de spores globuleuses.		
Macrophomina phaseoli (Tassi) Goid. (1947)	Colonie plus ou moins dense. Champignon à mycélium cloisonné. Thalle gris noirâtre. Pigmentation noire avec présence de microsclérotes.		

Fusarium graminearum Schwabe (1839)	Mycélien abondant, aérien, blanc jaunâtre. Revers jaune ocre. Macroconidies en forme de faucille, à une face plus courbée que l'autre.		
Rhizomucor miehi (Cooney & R. Emers.) Schipper (1978	Colonie brun pâle à brun sombre et à texture laineuse. Revers de la même coloration. Présence de rhizoïdes et de stolons. Columelle ovoïde ou légèrement piriforme, sans apophyse. Spores globuleuses et hyalines		
Aureobasidium pullulans (de Bary) G. Arnaud (1918)	Colonie levuriforme, de coloration rose pâle au début puis brun noirâtre. Revers brunâtre. Filaments épais et arthrosporés. Spores uni ou bicellulaires généralement disposées en chaînes.		

Rhizopus stolonifer (Ehrenb.) Vuill. (1902	Colonie filamenteuse blanche au début puis noirâtre et à revers brun. Sporocystophores bruns, réunis au niveau d'un rhizoïde et se terminant par un sporocyste, au centre duquel, une zone sphérique claire, la columelle contenant des spores et surmontée d'un amas noire de spores.		
Rhizopus microsporus Tiegh. (1875)	Colonie filamenteuse blanche au début puis brunâtre et à revers brun. Mycélium différencié en stolons, rhizoïdes et sporangiophores isolés ou en bouquets. Sporocystes sphériques et bruns avec une courte apophyse et une columelle globuleuse et large		



C. Relation entre paramètres physicochimiques (tempéature, pH, humification / minéralisation), phases de compostage et dynamique microbienne.

D. Liste de Matériel utilisé au laboratoire

- Les micropipettes,
- Pointe de micropipette,
- Porte micropipette,
- Pipette stand,
- Conical tube,
- Papier de pesée,
- Agitateur vortex
- Plaque chauffante et chauffe ballons
- Boîtes de pétri en verre ou en plastique,
- Barre magnétique,
- Hottes de sécurité ,
- Homogénéisateur,
- Préparateur de milieu de culture,
- Réfrigérateur ,
- Bain thermostaté
- Four à stériliser,
- Four à micro-ondes, Lave verrerie ,
- Microscope optique,
- Brûleur à gaz ou incinérateur
- Répartiteur de milieu de culture et de réactifs
- Dispositif de comptage des colonies
- Ensemenceur en spiral ou tige en L.
- Ecouvillon,
- Agitateur magnétique ,
- Balances et diluteurs gravimétriques ,
- Autoclave,
- Etuve,
- Congélateur ou Surgélateur.