



Université Mohamed Khider de Biskra

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des sciences de la nature et de la vie
Département des sciences de la nature et de la vie
Département des sciences de la nature et de la vie

Filière : Sciences biologiques
Filière : Sciences biologiques
Filière : Sciences biologiques

Référence / 2025

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Microbiologie Fondamentale et Appliquée

Présenté et soutenu par :
Karima Djimaoui et Nesrine Kalfali

Le:mercredi 18 juin 2025

Essai de vermicompostage d'un mélange de fientes de pigeons et de déchets de papier

Jury :

Pr.	RADEDOUEN Salah Sara	Pr	Univ Mohamed Khider de Biskra	Président
Dr.	GHITI Hassina	MCB	Univ Mohamed Khider de Biskra	Encadrante
Dr.	ZEKRI Ouisssem	Pr	Univ Mohamed Khider de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024.2025

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à **Allah**, le Très-Haut, le Très-Sage,
Qui m'a accordé la santé, la patience et la force de mener à bien ce travail

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Mme Ghiti Hassina**,
Notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils pertinents, son accompagnement bienveillant,
Et sa confiance tout au long de ce projet.

Merci pour votre encadrement rigoureux et votre soutien constant.

Mes remerciements vont également aux membres du jury,
Pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives
Qui ne manqueront pas d'enrichir davantage notre réflexion.

Je remercie chaleureusement les ingénieurs du laboratoire
Pour leur aide technique, leur accueil, leur patience et leur précieuse assistance
Durant les différentes étapes pratiques de notre travail expérimental.

Toute notre reconnaissance va aussi à l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne
(ITDAS),

Pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ce projet.

Je n'oublie pas mes amies et collègues à la faculté,
Celles qui ont partagé avec moi les salles de cours, les moments de fatigue, de stress, mais aussi les fous rires et
les souvenirs précieux.

Votre présence a rendu ce parcours plus doux et plus humain.

Enfin, je remercie nos parents,
Pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont consentis,
Pour leur amour inconditionnel,
Leurs prières et leurs encouragements constants.

Dédicace

De mon chère père Balkacem

Même si ton souffle a quitté ce monde, ta présence reste vivante dans chaque silence,

Dans chaque pas que j'ai fait sur ce chemin.

Tu es la première graine de tout cela, l'origine de cette soif d'apprendre, la voix calme et forte qui résonne encore dans ma mémoire.

Je te dois cette ténacité, ce respect du savoir, ce rêve devenu réalité.

Ce mémoire t'appartient autant qu'à moi, car il porte en filigrane les valeurs que tu as gravées en moi.

Sois fier, là où tu es, car ton absence est douloureuse,

Mais ton empreinte est éternelle.

À ma mère, ma lumière inépuisable

Tu es ce phare inébranlable qui m'a guidée depuis les premières lueurs du baccalauréat,

Ce diplôme que tu as porté en ton cœur bien avant que je ne le décroche.

Ce master, lui aussi, est né de ta foi en moi

Toi qui y as cru quand moi-même j'hésitais.

Merci pour tes sacrifices silencieux,

Tes bras ouverts les soirs de doute,

Tes prières qui ont pavé mon chemin,

Et ta tendresse infinie, qui a toujours été mon refuge et ma force.

Je t'aime d'un amour que les mots ne peuvent contenir.

Que Dieu te garde, te comble de santé, et t'enveloppe de Sa lumière.

Tu es la fleur de mon cœur,

Et l'éternelle bénédiction de ma vie.

À ma famille, mes sœurs et mes frères

Merci pour votre présence, vos mots, vos silences,

Vos encouragements constants même à distance.

Votre amour m'a tenue debout dans les moments de fatigue et de doute.

Ce travail porte aussi un peu de vous.

À ma binôme Karima

Je t'aime énormément.

Dédicace

À ma mère... à mon paradis sur Terre,
À toi, dont chaque détail respire la miséricorde,
À toi, dont chaque pas déborde de générosité.
Maman, battement de mon cœur,
source inépuisable de tendresse,

À chaque instant de désespoir, tu as été la lumière qui dissipe les ténèbres,
la main qui apaise mon cœur sans le toucher, l'âme qui m'habite lorsque la solitude m'envahit.

Tu m'as offert une prière sincère, éternelle.
Pour toi seule, mes mots s'inclinent avec pudeur, et mon âme t'écrit mille remerciements.

Ce succès... est le tien avant d'être le mien.
Et ce moment... je te le dédie, à toi, noble dame de tous les sacrifices.

À mon cher père,
homme courageux, véritable pilier, source de sagesse et de sérénité.
Tu m'as appris à affronter la vie avec confiance, à rester fort face aux épreuves.

Merci pour ton soutien inconditionnel, et pour tous ces sacrifices innombrables
qui ont fait de moi une personne
qui ne connaît pas l'impossible.

À mes frères et sœurs bien-aimés,
vous êtes une partie de mon cœur, mes compagnons de route,
et l'un des secrets de ma force.

En votre présence, je trouve la sécurité, dans vos mots, le réconfort, et dans vos rires, la motivation pour continuer.

Vous avez toujours été, comme je vous ai connus :
un appui inébranlable, et une douce compagnie qui ne s'éteint jamais.

À vous tous, je dédie ce modeste travail,
en signe de reconnaissance, de fidélité à ma promesse,
et en hommage à un amour inestimable.

À ma binôme Nesrine

I love you

Table de matière	
Liste des Tableaux.....	I
Liste des Figures.....	II
Liste des abréviations	III
Introduction.....	1

Chapitre 1 :

Généralités sur les déchets

1.1. Définition des déchets	4
1.2. Classification des déchets	4

Chapitre 02 : Traitement et valorisation

2.3. Vers de terre (lombrics)	7
2.3.1. Espèces de vers de terre utilisées en lombricompostage	7

Chapitre 03 : Qualité du vermicompost

3.1. Évolution de la maturité du lombricompost	10
3.2. Indicateurs physico-chimiques	10
3.2.1. Température (T °C)	10
3.2.2. Potentiel hydrogène (pH)	11
3.2.3. Aération	11
3.2.4. Rapport C/N	11
3.3. Indicateurs biologiques	12

Chapitre 04 :

Matériel et Méthodes

4.2. Sélection et caractérisation des déchets utilisés	14
4.2.1. La fiente de pigeons	14
4.2.2. Papier	14
3.2.3. Les vers de terre	15
3.2.4. Préparation des vermicomposteurs	15
3.4. Matériels utilisés	16

3.5. Les paramètres mesurés	17
3.5.1. Les paramètres physico-chimiques analysés	17
1.5.3. Dénombrement des bactéries	20
1.5.4. Mycoflore	21
1.5.5. Test de phytotoxicité	22
1.5.6. Test statistiques utilisés	23

Chapitre 05 :

Résultats et discussion

3. Humidité relative (H%)	28
4.Solide total	31
5. Matière Organique	32
6. Les cendres	34
7. Identification des micro-organismes pathogènes	36
7.1. Caractéristiques phénotypiques et identification des agents pathogènes présents dans le compost	36
8. Dénombrement de la Flore microbienne	48
9. Test de phytotoxicité.....	50
Conclusion	50
Références bibliographiques	50
Annexes	

Liste des Tableaux

Tableau 1. Les appareils, les matériels et les réactifs utilisés.....	16
Tableau 2. Analyse microbiologique du compost.....	20
Tableau 3. statistiques descriptifs de la variable pH en fonction du temps	25
Tableau 4. Analyse ANOVA de la variable pH en fonction du temps de compostage.....	25
Tableau 5. Statistiques descriptifs de la variable CE en fonction du temps	27
Tableau 6. Les statistiques descriptives des valeurs de H% en fonction du temps.....	29
Tableau 7. Analyse ANOVA de la variable H% en fonction du temps de compostage.....	29
Tableau 8. les statistiques descriptives des valeurs de solide total	31
Tableau 9. L'analyse ANOVA montre que la variation de ST%.....	31
Tableau 10. les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique MO.....	33
Tableau 11. L'analyse ANOVA montre que la variation de MO	33
Tableau 12. les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique cendre %.....	34
Tableau 13. L'analyse ANOVA montre que la variation de ST% aux cours du traitement.....	35
Tableau 14. Etude Macroscopique des souches fongiques isolées à partir de la phase de vermicompostage (Chabasse et al.,2002)	42
Tableau 15. Etude Microscopique des souches fongiques isolées à partir de la phase de vermicompostage (David M.,1997).....	44
Tableau 16. Résultats de dénombrement dès la flore microbienne sur les milieux sélectifs	48

Liste des Figures

Figure 1. Aspect général des vers utilisés en vermicompostage (Desbois, 2013) : (a) <i>Lumbricus rubellus</i> ; (b) <i>Eisenia fetida</i>	8
Figure 2. Domaine de température optimal pour l'activité des vers de terre (Munroe, 2004).	11
Figure 3. Fiente de pigeons utilisée dans l'expérience de vermicompostage (Photo personnelle)	14
Figure 4. Papier utilisée dans l'expérience de vermicompostage (Photo personnelle)	15
Figure 5. Lombrics (vers de terre) (photo personnelle)	15
Figure 6. Boîtes (Réacteurs) du vermicompost (Photo personnelle, 2025)	16
Figure 7. Schéma présentant la préparation de la suspension et les dilutions pour la mesure des paramètres microbiologiques.	20
Figure 8. Evolution du pH au cours de compostage.	26
Figure 9. Evolution du pH en présence et en absence des lombrics.	26
Figure 10. Évolution de la CE (ms/cm) en fonction du temps.	27
Figure 11. Analyse ANOVA de la variable CE en fonction du temps de compostage	28
Figure 12. Évolution de la conductivité électrique (CE) en présence et en absence des lombrics.	28
Figure 13. Évolution de la H% en fonction du temps	30
Figure 14. Évolution de l'humidité relative (H %) en présence et en absence des lombrics	30
Figure 15. pourcentage de solides totaux (ST%) au fil du temps, sur une période de 45 jours.	31
Figure 16. ST% (solide totale) par types de traitement	32
Figure 17. matière organique fil du temps, sur une période de 45 jours.	33
Figure 18. des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de matière organique (MO%)	34
Figure 19. pourcentage des cendres de la au fil du temps	35
Figure 20. Des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de des cendres pour trois types	36
Figure 21. Aspect des colonies des Entérobactéries sur milieu MacConkey.	37
Figure 22. Aspect des colonies de Salmonella sur milieu SS (Lombric 2.10^{-1}).	37
Figure 23. Observation microscopique des colonies bacille à Gram négatif (GR x1000).	38
Les tests de catalase se sont révélés positifs pour les bactéries à Gram négatif (Figure 24) :	38
Figure 25. Test de Catalase.	38
Figure 26. Aspect des colonies de Staphylocoque sur milieu GN (control 1.10^{-5}).	39
Figure 27. Observation microscopique des colonies Cocci à Gram positif (GR x1000).	39
Figure 28. La production de catalase par les Cocci à Gram positif (catalase +)	40
Figure 29. Histogramme des % de la flore microbienne isolés au cours de l'étude.	49
Figure 31. Impact du vermicompostage des déchets de papier et de fiente de pigeon sur l'indice de germination (IG) du cresson alénois (<i>Lepidium sativum</i>)	50

Liste des abréviations

P0 :	est le poids du creuset.
Pt f :	est le poids frais de l'échantillon après dessiccation.
Pti :	est le poids total initial de l'échantillon (10 g + Po).
MO :	la matière organique
N :	Nombre de bactéries/g ou par L.
Ec :	la somme des colonies comptées dans les boîtes retenues.
N1 :	le nombre de boîtes de la dilution la plus faible (première dilution).
N2 :	le nombre de boîtes de la seconde dilution.
D :	facteur de dilution de la première dilution.
V :	volume de l'échantillon testé.
Vsm :	volume de la solution mère.
Vpr :	volume de l'échantillon du produit.
RSG :	La germination relative des graines

INTRODUCTION

Introduction

Les déchets organiques représentent une part importante des déchets solides produits à l'échelle mondiale. Composés principalement de restes alimentaires, de matières végétales, de déchets agricoles, de papiers (journaux, cartons, emballages) et de déjections animales, ils sont souvent perçus comme inoffensifs en raison de leur origine naturelle. Toutefois, une mauvaise gestion de ces déchets peut entraîner de graves conséquences environnementales (FAO, 2017 ; Singh, 2021).

En effet, leur décomposition en décharge génère du méthane (CH_4), un puissant gaz à effet de serre. De plus, la formation de lixiviats, liquides issus de la dégradation des matières organiques, peut contaminer les sols et les nappes phréatiques. Par ailleurs, les déchets organiques non traités attirent des animaux nuisibles (rats, insectes) et perturbent les écosystèmes locaux.

Les conséquences de la mauvaise gestion des déchets organiques ne se limitent pas à l'environnement : elles affectent également la santé publique et l'économie. En effet, les tas de déchets organiques mal gérés favorisent la prolifération de bactéries, de parasites et de maladies infectieuses. Par ailleurs, les coûts élevés de collecte et de traitement de ces déchets représentent une charge financière importante pour les municipalités, en particulier dans les pays en développement (Ghiti, 2017).

Plutôt que de considérer les déchets organiques comme un simple problème, ils peuvent être valorisés et transformés en ressources utiles grâce à différentes techniques. Par exemple, la méthanisation permet de convertir ces déchets en biogaz, une source d'énergie renouvelable, et en digestat, un fertilisant organique. Le compostage constitue une autre méthode efficace de transformation des déchets organiques en compost, un engrais naturel.

Pour accélérer ce processus, il est possible d'introduire des vers épigés tels que *Eiseniafetida* ou *Eiseniaandrei*. On parle alors de vermicompostage, un procédé qui permet de produire un vermicompost : un amendement organique stabilisé, riche en nutriments, qui améliore la fertilité des sols. Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, en contribuant à la réduction des déchets tout en valorisant des ressources souvent négligées (Edwards et al., 2015 ; Yadav et Garg, 2016).

Cependant, cette transformation dépend de plusieurs paramètres physico-chimiques tels que l'humidité, la température, le pH, ainsi que de l'activité microbiologique (Gómez-Brandón, 2019 ; Negi&Suthar, 2023). Le vermicompostage se présente comme une solution écologique prometteuse. Les recherches actuelles visent à perfectionner cette technique, notamment par l'optimisation des mélanges de substrats. Le mélange de déchets de papier (riches en cellulose) avec des fientes de pigeons (riches en azote) constitue une combinaison particulièrement intéressante. Le papier agit comme source de

carbone et améliore l'aération du substrat, tandis que les fientes apportent des éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium (Mulhauser, 2008).

Dans la présente étude, l'objectif principal est d'analyser l'efficacité du vermicompostage d'un mélange de déchets de papier et de fientes de pigeons, en tenant compte de l'interaction entre les vers de terre et les micro-organismes (bactéries et champignons), dans le but d'obtenir un amendement organique stable et de qualité. Nous avons également suivi l'évolution des paramètres physico-chimiques et microbiologiques tout au long du processus, et réalisé un test de phytotoxicité afin d'évaluer la qualité finale du compost produit.

Pour atteindre cet objectif, la démarche suivante a été adoptée :

Partie bibliographique :

- Chapitre 1 : Généralités sur les déchets
- Chapitre 2 : Traitement et valorisation des déchets organiques
- Chapitre 3 : Qualité du vermicompost

Partie expérimentale :

- Chapitre 4 : Matériel et méthodes
- Chapitre 5 : Résultats et discussion

Conclusion

Chapitre 1 :

Généralités sur les déchets

1.1. Définition des déchets

La notion de déchet peut être appréhendée de différentes façons, selon les contextes juridiques, environnementaux ou économiques. Plusieurs définitions existent, en fonction des approches adoptées :

- Selon Chouvel (2024), les déchets sont définis comme toute substance ou tout objet — voire tout bien — dont le détenteur se débarrasse ou souhaite se débarrasser. Pour Damien (2004), un déchet est tout matériau, substance ou produit abandonné en raison de l'absence d'utilité clairement identifiée.
- D'un point de vue légal, la loi algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001 (Journal Officiel n° 77) définit un déchet comme :
« tout résidu provenant d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ainsi que toute substance ou tout produit dont le propriétaire se défait, envisage de se défaire ou est obligé de le faire ».

1.2. Classification des déchets

1.2.1. Selon leur nature

Les déchets peuvent être classés selon leur nature en différentes catégories, en fonction de leur composition physique, chimique ou biologique. Cette classification permet une meilleure gestion, valorisation et traitement des déchets. On distingue principalement (Belmerhnia, L. 2017)

- **Déchets organiques** : issus de matières vivantes (végétales ou animales), ces déchets sont biodégradables. Ils comprennent les restes alimentaires, les déchets verts (feuilles, branches), les boues d'épuration, etc. Ils peuvent être valorisés par compostage ou méthanisation.
- **Déchets inorganiques** : non biodégradables, ils sont composés de matières minérales. Cela inclut les métaux, les plastiques, le verre, les céramiques, etc. Certains peuvent être recyclés ou réutilisés après traitement.
- **Déchets dangereux** : contenant des substances toxiques, corrosives, inflammables ou réactives, ils nécessitent un traitement spécifique. Exemples : solvants, piles, peintures, déchets hospitaliers.
- **Déchets non dangereux** : n'engendrant pas de risque immédiat pour la santé humaine ou l'environnement, ils comprennent les déchets ménagers, les déchets industriels banals (DIB), etc.
- **Déchets radioactifs** : émettent des rayonnements ionisants et nécessitent un confinement strict. Ils proviennent principalement des activités nucléaires.

Chapitre 02 :

Traitement et valorisation

2.1. Traitement et valorisation des déchets

La décomposition des déchets solides, en particulier des matières organiques, sous l'effet de facteurs environnementaux tels que l'eau, l'air et la chaleur, peut entraîner des impacts immédiats ou à long terme sur l'environnement humain. Ces impacts incluent notamment diverses pollutions, des nuisances olfactives et d'autres risques environnementaux. Ce problème devient d'autant plus préoccupant en cas de gestion inadéquate des déchets, qui peuvent inclure des matériaux fermentescibles, recyclables, dangereux, inertes ou plastiques.

Les déchets solides représentent ainsi l'une des principales menaces pour l'environnement, en raison de leur capacité à polluer l'eau, les sols et l'air (Diabaté, 2010). Pour y remédier, la valorisation des déchets constitue un pilier essentiel du Code de l'Environnement. Elle vise à exploiter les composants et matières premières contenus dans les déchets à travers des pratiques telles que le réemploi, la réutilisation, le recyclage ou encore la valorisation matière (Addou, 2009).

2.2. Traitement des déchets par vermicompostage

2.2.1. Le vermicompostage

Selon Jorge Sierra *et al.* (2023), le vermicompostage, aussi appelé lombricompostage, connaît un engouement croissant en raison de ses nombreux avantages. Ce procédé utilise des vers de terre pour transformer les déchets organiques en un produit stabilisé connu sous le nom de vermicompost. Il s'agit d'un processus de décomposition aérobie, accompagné de biooxydation et de stabilisation des matières organiques, qui ne requiert pas de températures élevées.

Les vers jouent un rôle clé en fragmentant les matières, en les mélangeant et en stimulant l'activité microbienne (Pathma&Sakthivel, 2012). Le vermicompost possède des propriétés comparables à celles de la tourbe : forte porosité, excellente aération, drainage optimal, grande capacité de rétention d'eau, et activité microbienne particulièrement élevée (Atiyeh *et al.*, 2002 ; Rakkiniet *et al.*, 2017).

D'après Mausam (2024), le lombricompostage permet de décomposer des matières organiques telles que les restes alimentaires, les déchets agricoles et le fumier, grâce à l'action de vers de terre spécifiques tels que *Eiseniafetida* ou *Eiseniaandrei*.

2.2.2. Le vermicompost

Le vermicompost, aussi appelé lombricompost, est un amendement organique produit par les vers de terre et les micro-organismes lors de la décomposition de la matière organique. Il ressemble à de la

tourbe, possède une texture agréable et contient des nutriments facilement absorbables par les plantes. Ce produit améliore la structure du sol, augmente la rétention d'eau et revitalise la terre (Voung, 2022).



Figure 1. Turricules des vers de terre (Sierra et *al.*, 2011).

2.2.3. Types de déchets utilisés dans le vermicompostage

De nombreux déchets organiques peuvent être décomposés par les vers de terre, comme le fumier d'animaux (bovins, chevaux), les déchets alimentaires, les résidus de jardinage ou encore le papier. Toutefois, certains nécessitent un prétraitement pour être adaptés à leur consommation, et tous ne favorisent pas une croissance optimale des vers (Ghiti, 2017). Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur les fientes et le papier.

2.2.3.1. Fientes

Les fientes sont composées de fèces, d'urines, de plumes, de fragments d'œufs ou de coquilles, ainsi que de litière, formant un mélange hétérogène (Boughaba, 2012). D'après Fourmont (1982), l'apparence des fientes varie selon leur taux d'humidité : lorsqu'elles contiennent entre 15 et 20 % d'humidité, elles sont sèches, poussiéreuses et de couleur gris clair ; à 70 % d'humidité, elles deviennent visqueuses, plus sombres, et sont classées comme fientes de poules pondeuses.

2.2.3.2. Papier

Selon la classification de Rynket *al.* (1992), le papier est constitué de fibres cellulosiques d'origine végétale et présente une faible humidité. C'est l'un des matériaux les plus fréquemment jetés et il représente une part importante des déchets ménagers ou industriels.

2.2.4. Phases du vermicompostage

Le vermicompostage se déroule en deux phases distinctes selon l'activité des vers : une phase active et une phase de maturation.

- **Phase active** : les vers transforment le substrat organique, modifiant son état physique et sa composition microbienne (Loreset *al.*, 2006).
- **Phase de maturation** : les vers migrent vers des couches de substrat plus fraîches et non digérées. Les micro-organismes prennent alors le relais pour décomposer la matière partiellement digérée (Aira *et al.*, 2007 ; Gómez-Brandón *et al.*, 2011). La durée de cette phase dépend de l'efficacité de la phase active, elle-même influencée par l'espèce de vers utilisée et leur densité dans le compost (Domínguez *et al.*, 2010).

2.3. Vers de terre (lombrics)

Les vers de terre jouent un rôle essentiel dans de nombreux écosystèmes terrestres, notamment dans les sols non acides, où ils constituent généralement la principale biomasse des invertébrés. En tant qu'ingénieurs d'écosystèmes, ils modifient leur environnement et influencent la communauté de décomposeurs, contribuant à la dynamique de la matière organique et au cycle des éléments nutritifs. Appartenant à l'embranchement des Annélides, ces animaux présentent une grande diversité d'habitats et de modes de vie : aquatiques, dulçaquicoles, parasites (comme les sangsues), ou terrestres (comme les lombrics) (Ghiti, 2017).

De nombreuses études ont classé les vers de terre en **trois groupes écologiques** et **cinq familles** à l'échelle mondiale. Les trois groupes sont :

- **Vers épigés** : ils vivent à la surface du sol dans les couches riches en matière organique et creusent peu ou pas de galeries. Exemple : *Eudriluseugeniae* (Pérès *et al.*, 2011).
- **Vers anéciques** : comme le lombric commun (*Lumbricusterrestris*), ils sont de grande taille (parfois plus d'un mètre) et vivent plusieurs années (4 à 8 ans). Ils sortent la nuit pour transporter de la matière organique dans leurs galeries profondes (Ducasse, 2017).
- **Vers endogés** : ils vivent dans les couches plus profondes du sol et creusent des galeries horizontales. Exemple : *Octolasiontyrtaeum* (Pérès *et al.*, 2011).

2.3.1. Espèces de vers de terre utilisées en lombricompostage

Les espèces de vers de terre les plus couramment utilisées pour le vermicompostage sont *Eiseniafetida* (ver à fumier) et *Lumbricusrubellus* (ver rouge) (Gershuny, 2011) (voir Fig. 2).

- **Eiseniafetida** : petit ver de couleur rosée, avec des anneaux clairs, presque jaunes. C'est l'espèce la plus utilisée en lombricompostage grâce à sa capacité à consommer de grandes quantités de matière organique, à sa reproduction rapide et à sa tolérance aux fortes densités (Desbois, 2013) (Fig. 2a).

- **Lumbricusrubellus** : également de petite taille, ce ver est capable de digérer efficacement des matières organiques variées. Il est parfois appelé "véritable ver du fumier" (Desbois, 2013) (Fig. 2b).



Figure 1. Aspect général des vers utilisés en vermicompostage (Desbois, 2013) :

(a) *Lumbricusrubellus*;

(b) *Eiseniafetida*.

Chapitre 03 : Qualité du vermicompost

Un vermicompost de qualité peut aider les agriculteurs à améliorer la fertilité du sol et à stimuler la croissance des plantes. Cependant, une mauvaise réalisation peut avoir des effets néfastes sur les cultures (GCP, 2008 dans Lingui, 2019). Pour optimiser l'utilisation du vermicompost en agriculture, il est essentiel de connaître sa composition en éléments nutritifs, incluant les macro- et micronutriments (N, P, K, Ca, Mg, Fe...). Il est tout aussi crucial d'évaluer la présence d'éléments indésirables tels que les métaux lourds toxiques (Cd, As, Hg, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr) (Jemaliet *al.*, 1996), ainsi que les pathogènes (salmonelles, entérocoques, *Escherichia coli*, œufs d'helminthes...).

3.1. Évolution de la maturité du lombricompost

La stabilité et la maturité du compost sont des critères fondamentaux pour son application au sol, car un compost immature peut nuire à la croissance des plantes et perturber l'écosystème édaphique. La maturité est liée au potentiel de stimulation de la croissance des plantes et à la phytotoxicité, tandis que la stabilité est en relation avec l'activité microbienne. En général, ces deux paramètres sont interdépendants, puisque les microorganismes produisent des composés phytotoxiques dans les composts instables (Gajalakshmiet *al.*, 2008 dans Lingui, 2019).

3.2. Indicateurs physico-chimiques

3.2.1. Température (T °C)

Comme la plupart des organismes vivants, les vers de terre possèdent une plage de température optimale pour leur activité. Un écart significatif par rapport à cette plage peut leur être nuisible, voire mortel. Au cours du processus de vermicompostage, la température influence fortement l'activité des vers, notamment leur métabolisme, leur croissance, leur respiration et leur reproduction (Reineckeet *al.*, 1992 ; Domínguez, 2004 ; Rostami, 2011, cités par Ginette *et al.*, 2019).

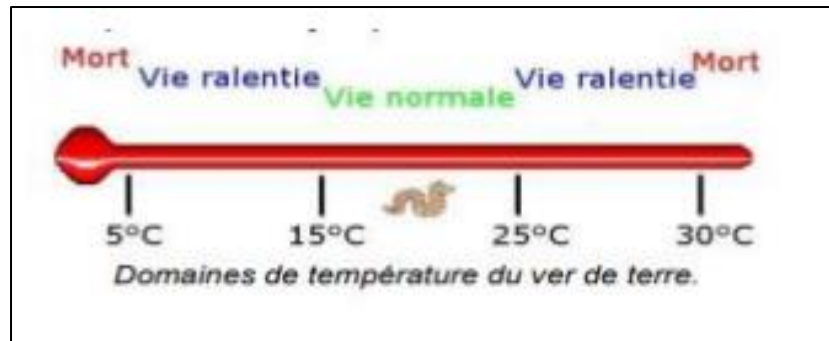


Figure 2. Domaine de température optimal pour l'activité des vers de terre (Munroe, 2004).

3.2.2. Potentiel hydrogène (pH)

Les vers de terre sont sensibles aux variations de pH. Ainsi, le pH du sol ou des déchets peut constituer un facteur limitant influençant leur répartition, leur abondance, la diversité des espèces présentes, ainsi que leur activité (Singh *et al.*, 2005). Toutefois, des études ont montré que davantage d'espèces de lombrics préfèrent vivre dans des milieux à pH neutre (Rostami, 2011). Les légères acidifications causées par l'ajout de déchets frais au lit de vermicompostage peuvent être atténuées par les sécrétions intestinales riches en calcium et l'ammoniac excrété par les vers. Une autre méthode couramment utilisée pour neutraliser l'acidité consiste à ajouter de la chaux ou des coquilles d'œufs au substrat (Domínguez, 2004).

3.2.3. Aération

Les lombrics ne disposent pas d'organes respiratoires spécialisés ; l'oxygène est absorbé et le dioxyde de carbone est expulsé par diffusion à travers la paroi corporelle. Ils sont particulièrement sensibles aux environnements anaérobies, et leur fréquence respiratoire diminue considérablement lorsque la concentration en oxygène chute (entre 55 et 65 %) (Domínguez, 2004). De telles conditions altèrent également leur activité d'alimentation. Ainsi, un bon apport en oxygène est essentiel au processus de dégradation de la matière organique. Un échange d'air efficace entre l'intérieur et l'extérieur de la compostière est donc indispensable (Morin, 2004).

3.2.4. Rapport C/N

Le rapport C/N représente le rapport entre le carbone et l'azote dans la matière organique. Ce paramètre, lié à la composition des matières premières, est crucial pour le bon déroulement du processus de compostage. Un rapport C/N élevé, en raison d'un excès de matières carbonées,

incite les micro-organismes à consommer tout l'azote disponible pour leurs besoins métaboliques. En général, ces organismes consomment 15 à 30 fois plus de carbone que d'azote. À l'inverse, un rapport trop faible (excès d'azote) entraîne des pertes d'azote par volatilisation sous forme d'ammoniac (Graves & Hattemer, 2000 ; Aboulam, 2005).

3.3. Indicateurs biologiques

D'un point de vue biologique, certaines méthodes permettent d'évaluer le degré de maturité du compost à travers des tests de phytotoxicité. Le test de germination est particulièrement cité dans la littérature comme méthode de référence, car il fournit une évaluation immédiate de la toxicité potentielle du compost pour les plantes (Bernalet *al.*, 2009). Une diminution du taux de germination est généralement interprétée comme un signe de présence de composés phytotoxiques dans les déchets en cours de compostage, tandis qu'une augmentation indique leur dégradation et l'innocuité du compost (Antilet *al.*, 2013). Zucconi (1981) a ainsi établi qu'un taux de germination supérieur à 80 % est indicatif d'un compost exempt de phytotoxines et considéré comme mature (Sellamiet *al.*, 2008).

Chapitre 04 :

Matériel et Méthodes

4.1. Présentation du site d'étude

L'étude a été réalisée au niveau de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie ainsi que des Sciences de la Terre et de l'Univers, située à El-Hadjeb (Université de Biskra).

L'échantillonnage a consisté à prélever les déchets organiques destinés au compostage disponibles dans la région étudiée (El-Hadjeb). Les vers de terre utilisés pour le processus de vermicompostage ont été fournis par l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS).

4.2. Sélection et caractérisation des déchets utilisés

4.2.1. La fiente de pigeons

La fiente de pigeons constitue une matière organique précieuse qui, une fois transformée, peut servir de fertilisant en agriculture. Utilisée de manière adéquate, elle contribue au maintien de la fertilité du sol et à son enrichissement en matières organiques et en éléments nutritifs, notamment en azote (Lecheheb, 2016).

Ce fumier se compose d'un mélange hétérogène comprenant des fèces, de l'urine, des plumes, des fragments d'œufs ou de coquilles, ainsi que de la litière (Boughaba, 2012).



Figure 3.Fiente de pigeons utilisée dans l'expérience de vermicompostage (Photo personnelle)

4.2.2. Papier

Le papier est un produit complexe, fabriqué à partir de cellulose issue de diverses ressources lignocellulosiques, généralement des fibres de bois, et soumis à plusieurs étapes de transformation. En tenant compte des anciennes techniques de fabrication artisanale du papier (Hubbe et Bowden, 2009), on comprend

aisément son importance et sa valeur, comparables à celles de l'or, en tant qu'élément du patrimoine culturel de l'humanité (Teacă, 2023).

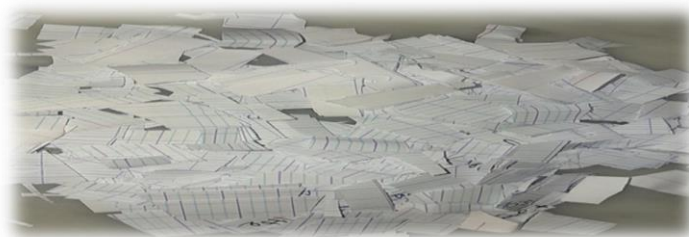


Figure 4. Papier utilisée dans l'expérience de vermicompostage (Photo personnelle)

3.2.3. Les vers de terre

Les vers de terre, souvent désignés sous le terme de « lombriciens », constituent une part essentielle de la macrofaune du sol dans de nombreux écosystèmes terrestres (Stork et Eggleton, 1992 ; Lavelle et al., 1997).



Figure 5. Lombrics (vers de terre) (photo personnelle)

3.2.4. Préparation des vermicomposteurs

Les vermicomposteurs sont des boîtes en plastique mesurant 25 cm de long et 15,5 cm de large. Elles ont été préalablement percées afin d'assurer une bonne aération et munies de couvercles amovibles. Deux de ces boîtes ont été remplies avec 200 g de sol (provenant de la même source que les vers), 40 g de fiente de pigeon et 60 g de papier (deux boîtes pour chaque essai) (Figure 4).

Nous avons introduit 10 g de lombrics dans deux vermicomposteurs servant à l'essai, tandis que deux autres boîtes sans vers ont été utilisées comme témoins, placées dans les mêmes conditions expérimentales. Une quantité équivalente de déchets à composter a également été conservée comme échantillon brut pour des analyses ultérieures.

Avant le démarrage des essais, le papier a été découpé manuellement en morceaux de moins de 3 cm et humidifié avec de l'eau afin d'assurer une bonne hydratation (Figure 4). Pour homogénéiser les substrats (matières organiques et sol), les composants ont été mélangés sur une bâche plastique.

Après cette homogénéisation, la masse totale a été répartie dans les réacteurs. À la base des vermicomposteurs, un collecteur a été installé pour récupérer d'éventuels lixiviats.

Durant les essais, un brassage manuel est réalisé chaque semaine pour améliorer l'aération du mélange. Après chaque brassage, l'humidité est vérifiée, et un arrosage est effectué si le mélange est trop sec.



Figure 6. Boîtes (Réacteurs) du vermicompost (Photo personnelle, 2025)



3.4. Matériels utilisés

Tableau 1. Les appareils, les matériels et les réactifs utilisés

Appareils	Matériels	Réactifs
<ul style="list-style-type: none"> • Etuve dessiccation 105°C • Congélateur à -20°C • Four à moufle à 500°C • Ph mètre • Conductimètre • Agitateur magnétique • Thermomètre • Balance • Microscope optique 	<ul style="list-style-type: none"> • Béchers • Erlen • Entonnoir • Barreau • Papier filtre • Papier aluminium • Creusets de céramique • Micropipette • Boîtes de pétri • Flacons • Les tubes • Micropipette • Lames et lamelles • Spatule • Pipette Pasteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Eau distillé • Eau physiologique • Graines de cresson • Cristal Violet • Lugol • Alcool • Fuch sine • Bleu de méthylène • H₂O₂ • Huile d'immersion • Éthanol • Milieu gélosé : • Milieu GN • Milieu Mac Conkey • Milieu Sabord • Milieu SS

3.5. Les paramètres mesurés

3.5.1. Les paramètres physico-chimiques analysés

3.5.1.1. La température

Ce processus favorise l'hygiénisation naturelle du compost (Larbi, 2006). La température des quatre réacteurs a été relevée tout au long du processus de compostage, tous les quatre jours, à l'aide d'un thermomètre. Le pH, la conductivité, l'humidité et la matière organique ont été mesurés tous les 15 jours.

Préparation de l'échantillon à analyser :

- Dans un bécher, 10 g d'échantillons (sol, fientes, mélange) ont été combinés avec 100 ml d'eau distillée.

- Après une agitation de 30 minutes avec un agitateur magnétique et un repos de 5 minutes, le mélange a été filtré pour obtenir 40 ml de filtrat.
- Enfin, nous avons mesuré les valeurs de chaque paramètre (pH/conductivité) pour chacun des réacteurs (Annexe 2).

3.5.1.2. Potentiel hydrique (pH)

Pendant le compostage, les déchets organiques subissent des variations de pH, passant par des phases d'acidification, de neutralisation et d'alcalinisation (Bayard *et al.*, 2001).

Le pH tend à augmenter durant le compostage, les composts immatures étant considérés comme ayant un pH acide, tandis que les composts matures se situent dans une fourchette allant de 7 à 9 (Faverial, 2016). Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre (HANNA) (Annexe 3).

3.5.1.3. Conductivité électrique (Ce)

La variation de la conductivité, c'est-à-dire l'évolution de la concentration des sels, atteint 3 mS.cm⁻¹ dans le cas d'un compost bien aéré, tandis qu'elle dépasse 7 mS.cm⁻¹ pour le même déchet sous une aération limitée (Francou, 2003).

Cette mesure a été effectuée avec un conductimètre, exprimée en mS/cm (Annexe 4).

3.5.1.4. Humidité Relative (H%)

L'humidité relative (H%) doit être mesurée rapidement pour réduire les pertes par évaporation. Juste après l'échantillonnage, 10 g de chaque échantillon sont pesés et séchés dans un four à 105 °C pendant 24 heures (Ben Ayed *et al.*, 2005) (Annexe 5).

La teneur en matière sèche de l'échantillon est calculée selon la formule suivante, avec trois répétitions effectuées :

$$\text{Total des solides (\%)} = (\text{Pt f} - \text{P0}) / (\text{Pti} - \text{P0}) \times 100$$

Où :

P0 : est le poids du creuset.

Pt f : est le poids frais de l'échantillon après dessiccation.

Pti : est le poids total initial (10 g de sol, fiente ou compost + P0).

$$\text{Humidité (\%)} = 100\% - \text{Total des solides}$$

3.5.1.5. Matière Organique (MO%)

Le pourcentage de cendres est déterminé après une calcination à sec à 550 °C pendant 16 heures (Ramdani, 2015).

- Pour ce faire, 10 g d'échantillons (sol, fiente, mélange) sont pesés et placés dans un creuset en porcelaine.
- Ils sont ensuite incubés dans un four à moufle à 550 °C pendant 16 heures (Annexe 5).

Le pourcentage de cendres est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Cendres (\%)} = (\text{Pt f} - \text{Po}) / (\text{Pti} - \text{P0}) \times 100$$

Où :

P0 : est le poids du creuset.

Pt f : est le poids total final de l'échantillon après incinération.

Pti : est le poids total initial de l'échantillon (10 g + Po).

$$\text{Matière organique (\%)} = 100\% - \text{cendres (\%)}$$

1.5.2. Analyse des paramètres biologiques

1.5.2.1. Mesure des paramètres microbiologiques

1.5.2.1.1. Bactéries

Les analyses microbiologiques sont effectuées à partir d'une suspension de 10 g de compost mélangée avec 90 ml d'eau saline (NaCl : 9 %) (Annexe 6).

Cette suspension est ensuite homogénéisée à l'aide d'un agitateur et laissée reposer pendant 10 minutes. Les échantillons préparés sont dilués de 10^{-1} (solution mère) à 10^{-4} , puis ensemencés sur des milieux synthétiques standards dans des boîtes de Pétri (Figure 3).

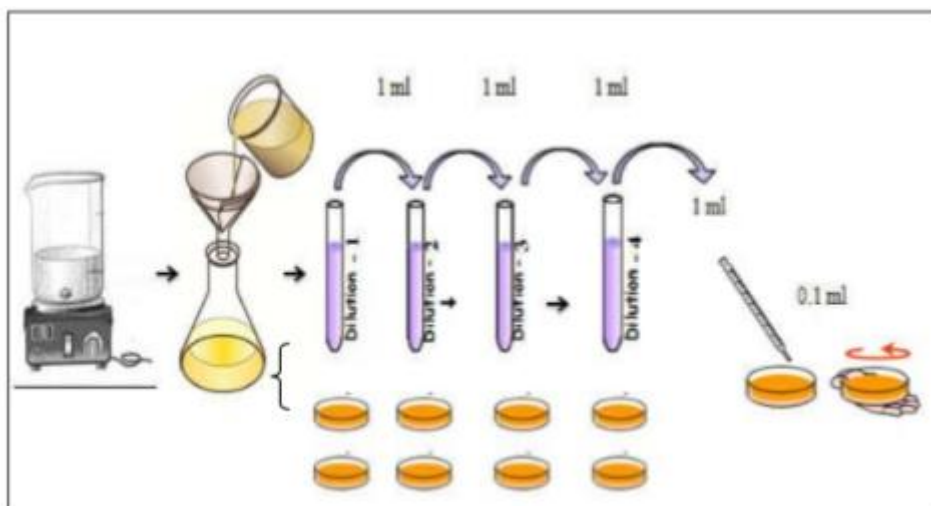


Figure 7. Schéma présentant la préparation de la suspension et les dilutions pour la mesure des paramètres microbiologiques.

Les germes à dénombrer et à rechercher sont résumés dans le tableau 2 :

Tableau 2. Analyse microbiologique du compost.

Micro-organismes	Milieux utilisés	Durée et température d'incubation
<i>Entérobactéries</i>	Mac Conkey	24 heures à 37°C
<i>Salmonella et Shigella</i>	SS	24 heures à 37°C
<i>Flore totale</i>	GN	48 à 72 heures à 30°C
<i>Champignons</i>	Sabourau	22°C pendant 7 jours

1.5.3. Dénombrement des bactéries

Nous avons évalué le nombre de colonies bactériennes (UFC). Seules les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies ont été prises en compte.

Le nombre de micro-organismes par gramme de produit est déterminé à partir des boîtes sélectionnées à deux dilutions successives, selon la formule de la norme *ISO 7218*.

$$N = \sum c / (N1 + (0.1 N2) \times (1/V) \times (V_{sm} / V_{pr}))$$

N : Nombre de bactéries/g ou par L.

Ec : la somme des colonies comptées dans les boîtes retenues.

N1 : le nombre de boîtes de la dilution la plus faible (première dilution).

N2 : le nombre de boîtes de la seconde dilution.

D : facteur de dilution de la première dilution.

V : volume de l'échantillon testé.

Vsm : volume de la solution mère.

Vpr : volume de l'échantillon du produit.

1.5.3.1. Caractéristiques macroscopiques

Analyse des traits visibles à l'œil nu, tels que les formes, les tailles, les couleurs et l'aspect général.

1.5.3.2. Caractéristiques microscopiques

Cette section est dédiée à l'étude de la coloration de Gram. Cette méthode d'examen direct est essentielle pour évaluer la présence et la morphologie des bactéries, les classant en deux catégories principales : *Gram* + et *Gram* - (Annexe 12).

1.5.3.3. Test de catalase

Pour le test de catalase, une goutte de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est ajoutée sur une lame en verre.

À l'aide d'une anse de platine, des bactéries sont prélevées puis dispersées dans le H_2O_2 . L'apparition immédiate de bulles d'oxygène indique une réaction positive (Garnier et Denis, 2007).

1.5.4. Mycoflore

Nous avons examiné la présence ou l'absence de champignons (dans le cadre d'une étude complémentaire) au début et à la fin de notre recherche.

1.5.4.1. Échantillonnage et dénombrement

L'échantillonnage et le comptage ont été effectués selon la même méthode que celle utilisée pour les bactéries, comme décrit précédemment.

1.5.4.2. Observations microscopiques

Pour cette étape, un petit morceau de ruban adhésif (scotch) est appliqué sur la surface de la culture fongique, puis transféré sur une lame contenant deux gouttes de bleu de méthylène. Les observations sont réalisées au microscope optique à différents grossissements.

1.5.4.3. Identification

L'identification est fondée sur deux dimensions : macroscopique et microscopique. L'examen des cultures est réalisé à l'œil nu et avec une loupe binoculaire. Les éléments notés sont :

- La couleur des colonies.
- Le diamètre de chaque colonie.
- La forme (régulière, irrégulière, lobée, dentelée, filamenteuse).
- La consistance (duveteuse, laineuse, cotonneuse, floconneuse, poudreuse, etc.).

L'examen microscopique se base sur les caractéristiques morphologiques, incluant l'observation des organes de fructification, des types de spores, ainsi que l'apparence, la taille, la couleur et la disposition des spores.

1.5.5. Test de phytotoxicité

La phytotoxicité est un indicateur clé pour différencier un compost mature d'un compost immature (Mustin, 1987 ; Epstein, 1997). Pour évaluer la maturité des composts, nous avons analysé l'effet de l'extrait aqueux du compost sur la germination des graines de cresson (*Lepidium sativum*).

Le test du cresson, réalisé sur 5 jours (Annexe 14), a suivi le protocole de Zucconi et Bertoldi (1987) :

1. Préparation de l'extrait aqueux des échantillons à un rapport 1:5 (5 g d'échantillon dans 25 ml d'eau distillée).
2. Agitation pendant 1 heure, puis transfert dans des tubes de centrifugation de 13 ml.
3. Centrifugation à 4500 rpm pendant 30 minutes à l'aide d'une centrifugeuse SIGMA.
4. Filtration du surnageant avec un papier filtre, puis dilution à 30 % pour l'utiliser comme milieu de germination.
5. Préparation de 10 boîtes de Pétri stériles par échantillon, chacune contenant un papier Whatman n°1 imbibé de 2 ml de l'extrait dilué.
6. Placement de 10 graines de cresson dans chaque boîte. 10 autres boîtes témoin sont préparées avec 2 ml d'eau distillée.

7. Incubation des boîtes à 20–25 °C, 60 % d’humidité, dans l’obscurité pendant 48 heures dans un incubateur (Memmert IN55).
8. Ajout de 1 ml d’éthanol pour arrêter la germination après 48 heures.
9. Seules les graines ayant développé une radicule d’au moins 1 cm sont comptabilisées (Annexe 14).

Les résultats permettent de calculer:

- a. La germination relative des graines (%RSG) (Hoekstra *et al.*, 2002).

$$\text{RSG} = \frac{\text{Nombre total de graines germées de l'échantillon}}{\text{Nombre total de graines germées du témoin}}$$

- b. La croissance relative des racines (%RRG) (Hoekstra *et al.*, 2002):

$$\text{RRG} = \left(\frac{\text{Moyenne de la longueur des racines de l'échantillon}}{\text{Moyenne de la longueur des racines du témoin}} \right) \times 100$$

- c. L'indice de germination (%IG) (Zucconi *et Bertoldi*, 1987):

$$\text{IG} = \frac{\text{Moyenne des graines éch} \times \text{Moyenne de la longueur des racines échantillon}}{\text{Moyenne des graines témoin} \times \text{Moyenne de la longueur des racines témoin}} \times 100$$

1.5.6. Test statistiques utilisés

Nous avons utilisé L'SPSS 2023, pour réaliser test et tables statistiques adéquats à nos résultats obtenus.

Chapitre 05 :

Résultats et discussion

5.1. Paramètres physico-chimiques

5.1.1. PH

Le Tableau 3 présente les statistiques descriptives des valeurs de pH mesurées à chaque quinzaine (0, 7, 15, 30 et 45 jours). On observe une diminution initiale du pH, atteignant une valeur moyenne minimale de $6,16 \pm 0,8$ au 15^e jour, suivie d'une augmentation progressive vers un état plus neutre à 45 jours ($7,06 \pm 0,16$).

Tableau 3.statistiques descriptifs de la variable pH en fonction du temps

		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
pH	0 jours	12	7.56	0.06	7.48	7.66
	7 jours	12	6.91	0.55	6.22	7.54
	15 jours	12	6.61	0.38	5.86	6.99
	30 jours	12	6.75	0.38	6.05	7.09
	45 jours	12	7.06	0.16	6.72	7.29

L’analyse ANOVA montre que la variation du pH aux cours du traitement est significative avec $p < 0.01$

Tableau 4.Analyse ANOVA de la variable pH en fonction du temps de compostage

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	6.53	4	1.63	13.24	<.001
Residual	6.78	55	0.12		
Total	13.31	59			

L'évolution du pH durant le compostage, illustre les processus microbiens et biochimiques liés à la dégradation de la matière organique (Fig. 9). Le pH initial est légèrement alcalin ($\sim 7,5$), ce qui est habituel pour les substrats riches en résidus végétaux ou alimentaires(GANKAM, F. 2024).

Cette diminution initiale peut être expliquée par la production d'acides organiques volatils résultant de la décomposition des matières fermentescibles. La remontée du pH à la fin du processus peut être liée à la dégradation des acides organiques, à l’ammonification et à une meilleure aération

qui favorise la nitrification. Ces processus sont affectés par les conditions du compost, telles que l'aération, l'humidité et la température (UstaetGuyen, 2024).

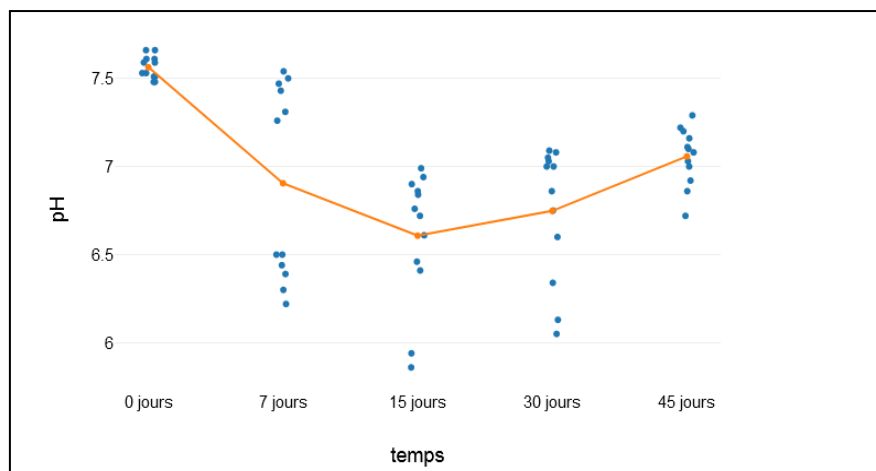


Figure 8. Evolution du pH au cours de compostage

La figure 9 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant les valeurs de pH pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control", et "Avec Lombric". L'axe des ordonnées représente le pH, et l'axe des abscisses représente les types de traitement. En présence de vers de terre (Lombrics) a un effet sur la diminution du pH observée ($\text{pH}=6.82\pm0.28$), dans le groupe témoin bien que le pH tende toujours à être plus bas ($\text{pH}=6.87\pm0.53$) que l'état initial "avant traitement" ($\text{pH}=7.57\pm0.07$), il présente Moins d'acidité par rapport au celui avec lombrics. Cette acidification indique une activité enzymatique et microbienne due à la présence de lombrics, qui fragmentent la matière organique, augmentant ainsi la surface d'action pour les microorganismes.

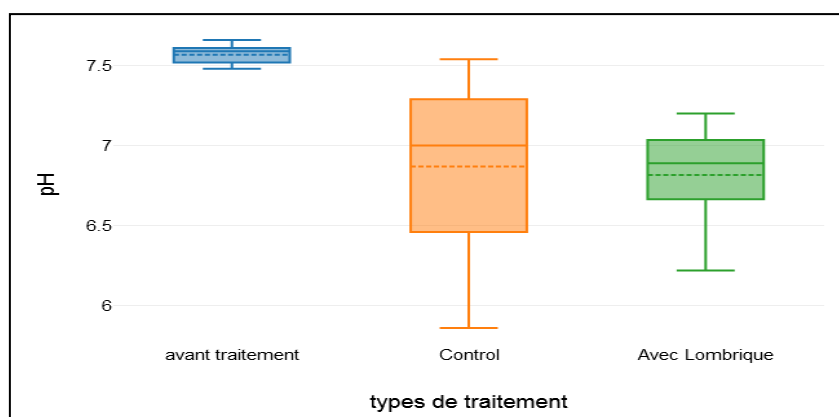


Figure 9. Evolution du pH en présence et en absence des lombrics

Cette dynamique du pH révèle que la présence de lombrics a un impact significatif sur le processus de compostage. D'une part, elle entraîne une acidification rapide du substrat en phase initiale, attribuée à une forte activité biologique (Majlessiet *al.* 2012). D'autre part, elle permet une stabilisation plus rapide du pH, suggérant une maturation accélérée du compost.

2. Conductivité électrique (CE ms/cm)

Le tableau 9 représente les statistiques descriptives des valeurs de CE mesurées à différents moments (0, 7, 15, 30 et 45 jours). La diminution, atteignant sa moyenne la plus basse ($\text{pH}=2.25\pm0.18$) à 45 jours.

Tableau 5. Statistiques descriptifs de la variable CE en fonction du temps

		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
CE (Conductivité électrique ms/cm)	0 jours	12	3.77	0.08	3.63	3.86
	7 jours	12	2.95	1.13	1.74	4.52
	15 jours	12	3.69	0.34	3.27	4.35
	30 jours	12	2.68	0.27	2.32	3.12
	45 jours	12	2.25	0.18	1.95	2.5

La figure 11 présente l'évolution de la conductivité électrique (CE) en millisiemens par centimètre (ms/cm) en fonction du temps. On observe une baisse initiale notable de la CE entre 0 et 7 jours. Après 15 jours, la conductivité électrique présente une tendance générale à la diminution progressive et continue jusqu'à 45 jours, atteignant ses valeurs les plus basses à la fin ($2,25\pm0.18\text{ms/cm}$) de l'expérimentation.

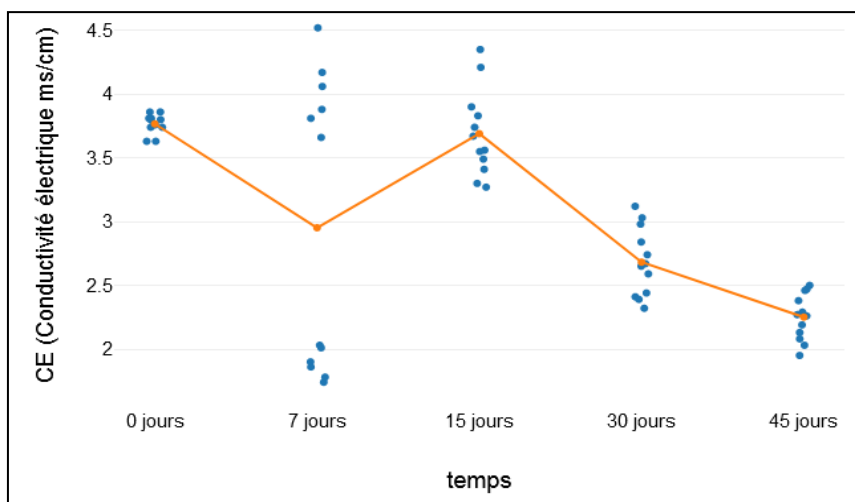


Figure 10. Évolution de la CE (ms/cm) en fonction du temps

L'analyse ANOVA montre que la variation de laCE aux cours du traitement est significative avec $p < 0.01$

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	20.47	4	5.12	16.94	<.001
Residual	16.61	55	0.3		
Total	37.08	59			

Figure 11. Analyse ANOVA de la variable CE en fonction du temps de compostage

La figure 12 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant la conductivité électrique (CE) en millisiemens par centimètre (ms/cm) pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control" (témoin), et "Avec Lombric" (avec vers de terre) nous avons observé quequelquesoit le traitement (Control ou Avec Lombric) la conductivité électrique tend à diminuer par rapport à l'état initial.

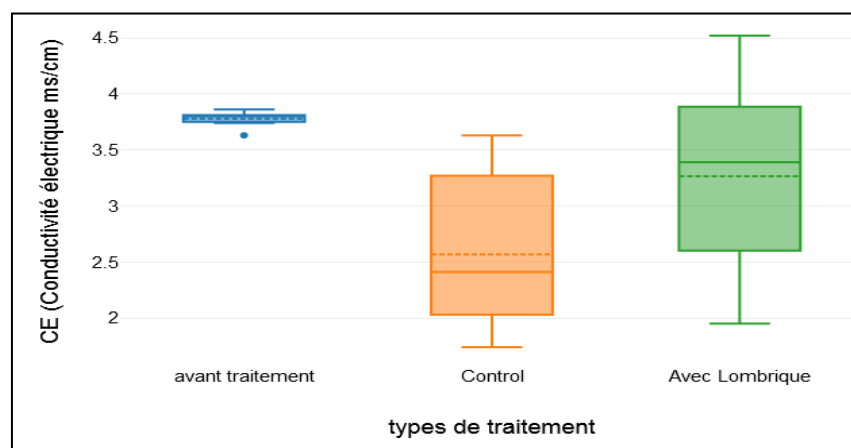


Figure 12. Évolution de la conductivité électrique (CE) en présence et en absence des lombrics

Le papier utilisé peut comporter des traces de produits chimiques (adhésifs, teintures) ainsi que de sels minéraux. La fiente de pigeon, quant à elle, est naturellement riche en nutriments, notamment en azote, phosphore et potassium, généralement présents sous forme de sels, ce qui reflète la conductivité électrique (CE) initiale (Behielsetal., 2023). La conductivité électrique tend à diminuer au cours du processus par rapport à l'état initial. Cette baisse pourrait s'expliquer par la consommation ou la transformation des ions dissous, ou encore par une lixiviation des sels solubles (Behielsetal., 2023).

3. Humidité relative (H%)

Le Tableau 6 présente les statistiques descriptives des valeurs d'humidité relative (H%) mesurées à différents moments (0, 7, 15, 30 et 45 jours). Il est à noter que la valeur la plus basse ($68,9 \pm 3,4 \%$) est enregistrée au 45^e jour, tandis que la valeur maximale ($77,56 \pm 0,86 \%$) est observée au début du processus.

Tableau 6. Les statistiques descriptives des valeurs de H% en fonction du temps

		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
H% (humidité relatives)	0 jours	12	77.56	0.86	76	78.64
	7 jours	12	74.83	2.98	69.41	78.56
	15 jours	12	68.9	3.4	63.42	74.08
	30 jours	12	57.62	7.6	41.78	67.95
	45 jours	12	47.95	5.7	37.9	55

L'analyse ANOVA montre que la variation de la CE aux cours du traitement (temps) est significative avec $p < 0.01$.

Tableau 7. Analyse ANOVA de la variable H% en fonction du temps de compostage

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	7371.73	4	1842.93	82.67	<.001
Residual	1226.03	55	22.29		
Total	8597.75	59			

La figure 14 présente l'évolution de la conductivité électrique (CE) en millisiemens par centimètre (ms/cm) en fonction du temps. On observe une baisse initiale notable de la CE entre 0 et 7 jours. Après 15 jours, la conductivité électrique présente une tendance générale à la diminution progressive et continue jusqu'à 45 jours, atteignant ses valeurs les plus basses à la fin de l'expérimentation.

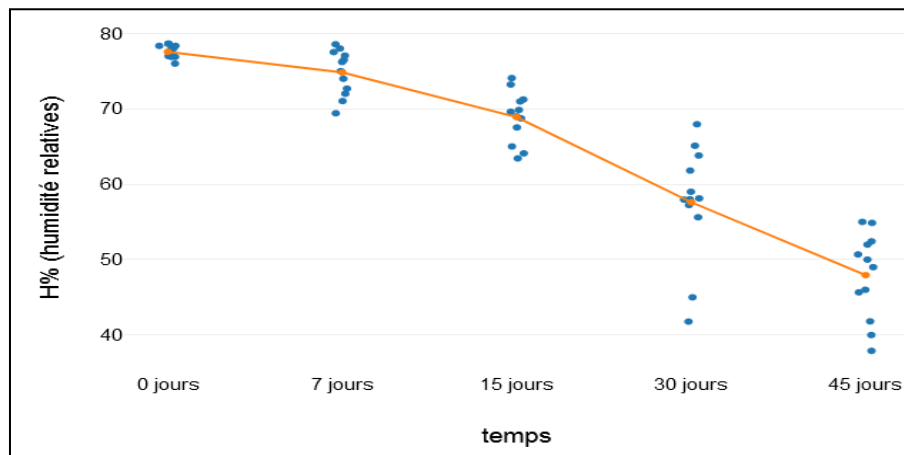


Figure 13.Évolution de la H% en fonction du temps

La figure 15 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant l'humidité relative (H%) pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control" (témoin), et "Avec Lombric" (avec vers de terre) nous avons observé quequelquesoit le traitement (Control ou Avec Lombric)l'H% tend à diminuer par rapport à l'état initial. Il est à noter que l'H% en control est $66,3 \pm 10\%$, en présence de lombric est $58,78 \pm 12,29\%$ par apport le mélange avant compostage $77,62 \pm 0,88\%$.

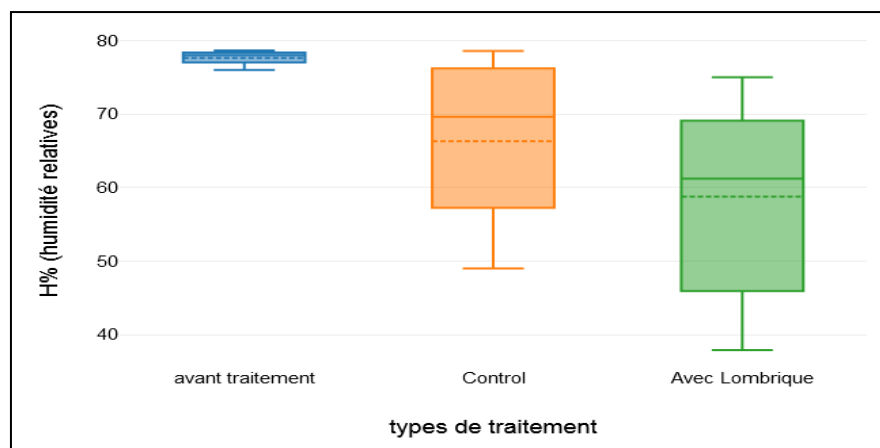


Figure 14.Évolution de l'humidité relative (H %) en présence et en absence des lombrics

Ces résultats peuvent être expliquée la nature des déjections de pigeon riches en eau, et la capacité d'absorption, de papier restent saturées au début. La diminution de l'humidité est associée à la perte d'eau par lixiviation et évaporation d'une part et d'autre part l'action de l'activité microbienne, augmentant la température, l'absence des lombrics dans le témoin entraîne moins de bioturbation, ce qui se traduit par une rétention d'eau plus variable. Les vers de terre contribuent à l'aération et à la décomposition, ce qui facilite l'évaporation, Leur activité biologique produit de la chaleur, ce qui accroît également la perte d'eau (Singh et *al.*, 2011).

Cependant, un manque d'humidité excessive peut compromettre leur survie et l'efficacité du vermicompostage (Dominguez et Edwards, 1997).

4.Solide total

Le tableau 8 représente les statistiques descriptives des valeurs de solide total (ST%) mesurées à différents moments (0, 7, 15, 30 et 45 jours). L'augmentation, atteignant sa moyenne la plus élevée (ST%=50.75± 6.95) à 45 jours.

Tableau 8.les statistiques descriptives des valeurs de solide total

		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
ST% (solide totale)	0 jours	12	18.64	8.64	0.23	24
	7 jours	12	23.11	7.79	0.25	30.59
	15 jours	12	31.1	3.4	25.92	36.58
	30 jours	12	42.39	7.6	32.05	58.22
	45 jours	12	50.75	6.95	37.9	62.1

L'analyse ANOVA montre que la variation de ST% aux cours du traitement (temps) est très significative avec $p < 0.01$.

Tableau 9.L'analyse ANOVA montre que la variation de ST%

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	8522.51	4	2130.63	42.12	<.001
Residual	2782.46	55	50.59		
Total	11304.97	59			

La figure 16 montre une augmentation constante et progressive du pourcentage de solides totaux (ST%) au fil du temps, sur une période de 45 jours.

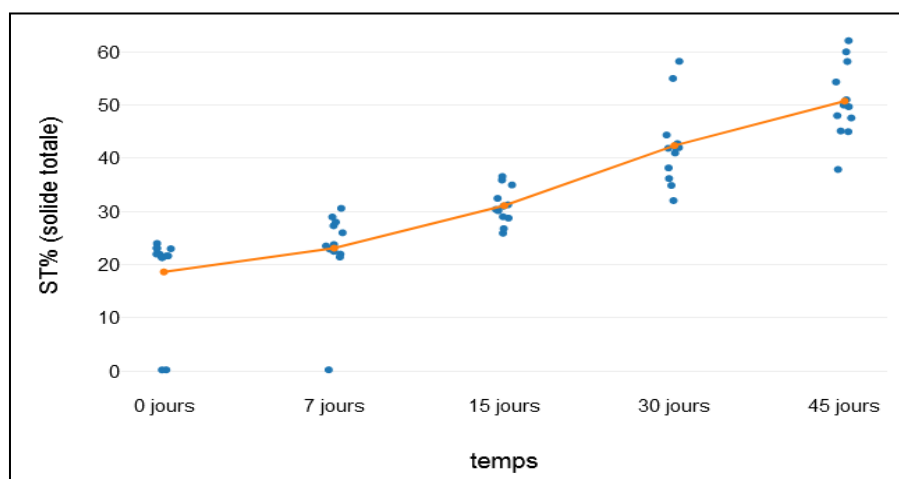


Figure 15.pourcentage de solides totaux (ST%) au fil du temps, sur une période de 45 jours.

La figure 16 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant le solide total (ST%) pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control" (témoin), et "Avec Lombric" (avec vers de terre) nous avons observé que le traitement Avec Lombric présente la plus grande valeur par rapport à l'état initial. Il est à noter que le ST% en control est $33,71 \pm 10,03\%$, en présence de lombric est $39,52 \pm 14,24\%$ par rapport le mélange avant compostage $18,24 \pm 8,98\%$. Cette augmentation des solides totaux indique probablement une dégradation de la matière organique ou un processus de séchage/concentration. Au fur et à mesure que le temps passe, la matière liquide est évaporée ou les composés organiques se transforment en formes plus solides (ex : formation d'humus), ce qui augmente la proportion de solides dans l'échantillon. L'augmentation significative de la matière sèche (ST%) est un indicateur clé de l'avancement d'un processus de compostage, de stabilisation des de la matière organique (Chergui, 2024).

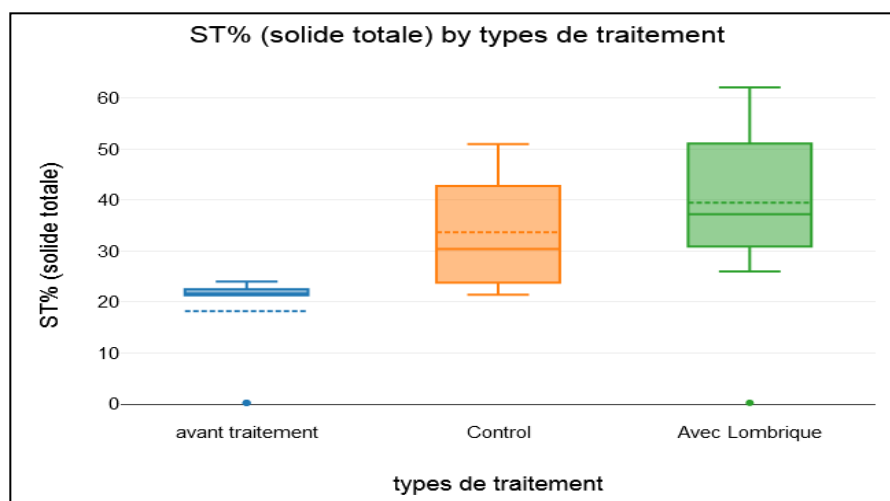


Figure 16. ST% (solide totale) par types de traitement

Selon Aira *et al.* (2020), qui ont mis en évidence que les composts dépourvus de lombrics présentent une décomposition partielle de la matière organique et une rétention accrue de substances insolubles.

5. Matière Organique

Le tableau 10 représente les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique MO% mesurées à différents moments (0, 7, 15, 30 et 45 jours) il est à noter que la valeur la plus basse ($44,82 \pm 2,48\%$) au 45^{ème} jour, alors que la valeur maximale ($76,69 \pm 1\%$) est enregistrée au début de processus.

Tableau 10.les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique MO

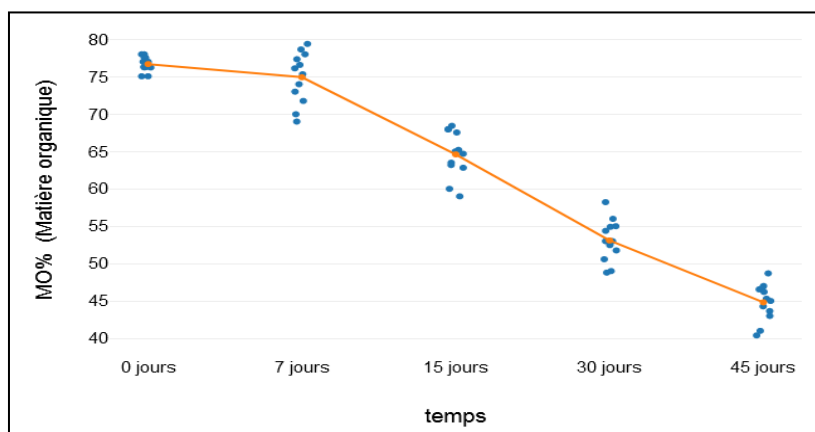
		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
MO% (Matière organique)	0 jours	12	76.69	1	75.06	78
	7 jours	12	74.93	3.41	69	79.39
	15 jours	12	64.61	3.1	59	68.43
	30 jours	12	53.09	2.81	48.79	58.22
	45 jours	12	44.82	2.48	40.39	48.69

L'analyse ANOVA montre que la variation de MO% aux cours du traitement (temps) est très significative avec $p < 0.01$.

Tableau 11.L'analyse ANOVA montre que la variation de MO

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	9132.4	4	2283.1	314.8	<.001
Residual	398.89	55	7.25		
Total	9531.29	59			

La figure18 montre une augmentation constante et progressive du pourcentage de (MO%) de la matière organique fil du temps, sur une période de 45 jours.

**Figure 17.**matière organique fil du temps, sur une période de 45 jours.

La figure 19 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de matière organique (MO%) pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control" (témoin), et "Avec Lombric" (avec vers de terre). Le teneur en MO ($76,84 \pm 0,9$) au début de l'expérience à diminuer considérablement au niveau du témoin ($59,55 \pm 12,44$) et avec les lombrics ($59,84 \pm 11,72$).

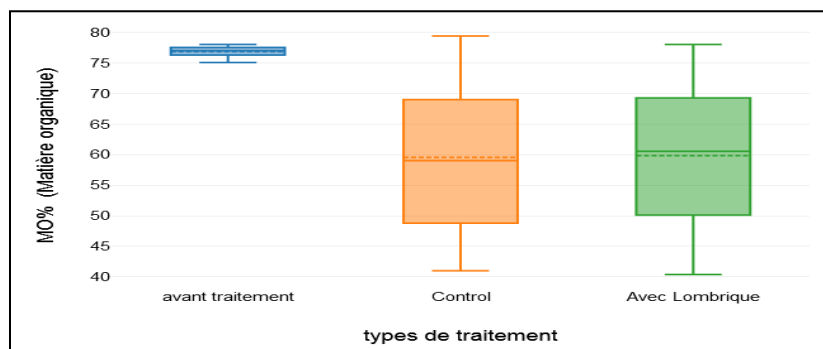


Figure 18.des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de matière organique (MO%)

Cette baisse est attendue dans un processus de décomposition ou de compostage, où la matière organique est minéralisée (décomposée en composés plus simples) par l'activité microbienne. L'impact direct des lombrics sur la MO% semble subtil. Bien que les lombrics soient connus pour accélérer la décomposition de la matière organique. (Aira, M. et al. 2020).

6. Les cendres

Le tableau 12 représente les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique cendre % mesurées chaque quinzaine (0, 7, 15, 30 et 45 jours) il est à noter que la valeur la plus basse ($23,31 \pm 1$ %) au début de processus, au 45^{ème} jour, la valeur maximale ($55,15 \pm 2.49\%$) a été enregistrée.

Tableau 12.les statistiques descriptives des valeurs de la matière organique cendre %

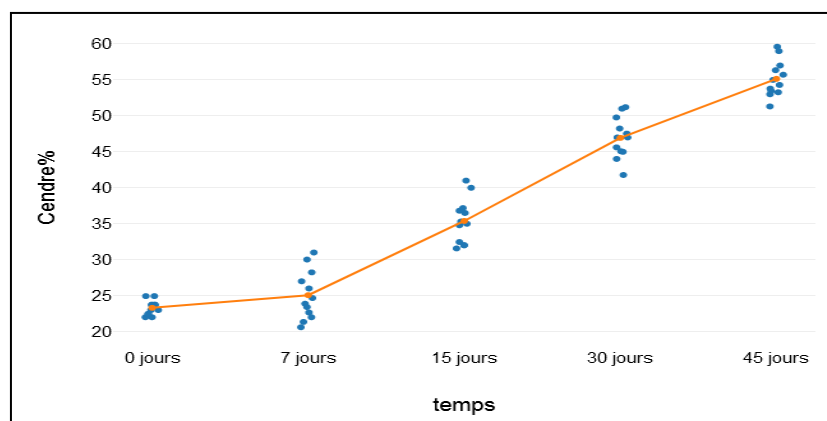
		Frequency	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
Cendre%	0 jours	12	23.31	1	22	24.94
	7 jours	12	25.07	3.41	20.61	31
	15 jours	12	35.39	3.1	31.57	41
	30 jours	12	46.94	2.84	41.78	51.21
	45 jours	12	55.15	2.49	51.31	59.61

L'analyse ANOVA montre que la variation de ST% aux cours du traitement (temps) est très significative avec $p < 0.01$. Le tableau 14

Tableau 13.L'analyse ANOVA montre que la variation de ST% aux cours du traitement

	Sum of Squares	df	Mean Squares	F	p
temps	9125.16	4	2281.29	312.41	<.001
Residual	401.62	55	7.3		
Total	9526.78	59			

La figure20 montre une augmentation constante et progressive du pourcentage des cendres de la au fil du temps, sur une période de 45 jours.

**Figure 19.**pourcentage des cendres de la au fil du temps

La figure 21 présente des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de des cendres pour trois types de traitement différents : "avant traitement", "Control" (témoin), et "Avec Lombric" (avec vers de terre). Le teneur en MO ($23,16 \pm 0,9$) au début de l'expérience à diminuer considérablement au niveau du témoin ($40,43 \pm 12,73$) et avec les lombrics ($40,2 \pm 11,74$).

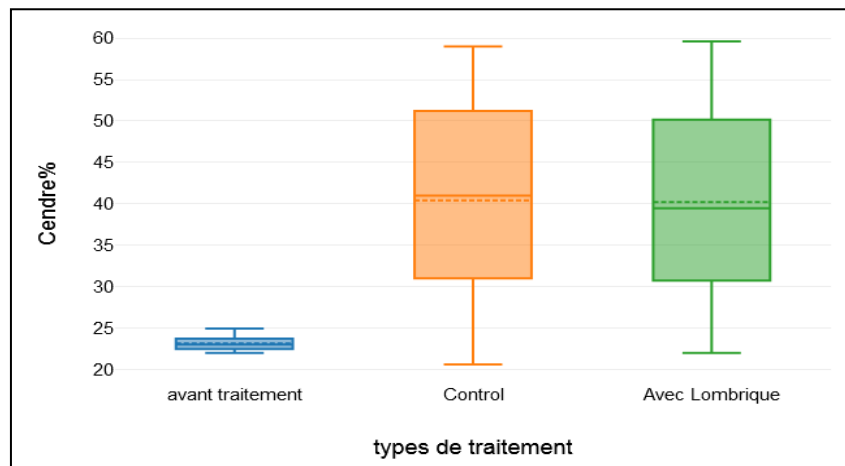


Figure 20. Des diagrammes en boîte (box plots) comparant le pourcentage de des cendres pour trois types

L'augmentation du taux de cendres est une conséquence directe de la diminution de la matière organique. En effet, lorsque cette dernière est décomposée et minéralisée, avec perte de carbone, d'hydrogène et d'oxygène sous forme gazeuse, la proportion de constituants inorganiques (minéraux, qui forment les cendres après incinération) dans la masse résiduelle augmente. Les résidus de papier sont principalement composés de cellulose, tandis que les déjections de pigeons sont riches en nutriments organiques, mais contiennent une fraction minérale relativement stable (Konéet *al.*, 2020).

La déperdition de matière organique peut être attribuée à l'activité microbienne, à la respiration aérobie et à l'évaporation de l'eau, ce qui accentue la proportion relative de la fraction minérale dans le substrat (Ducasse, 2023).

Par ailleurs, les lombrics se nourrissent de matière organique, la métabolisent et produisent un sous-produit, le vermicompost, riche en minéraux tels que le calcium, le magnésium et les phosphates (Devi et Khwairakpam, 2023). Cela contribue également à l'augmentation du taux de cendres. Le vermicompostage ne favorise pas seulement la minéralisation, mais permet aussi la libération des nutriments sous des formes plus facilement assimilables, ce qui constitue un atout majeur pour l'enrichissement des sols (Kumari *et al.*, 2024).

7. Identification des micro-organismes pathogènes

7.1. Caractéristiques phénotypiques et identification des agents pathogènes présents dans le compost

a. Les entérobactéries

a.1. Croissance sur milieu Mac Conkey

L'ensemencement sur milieu sélectif Mac Conkey a permis la mise en évidence de colonies caractéristiques des entérobactéries. Nous avons observé des colonies de tailles variables (petites à moyennes), de forme circulaire, aux bords réguliers, et de couleur rose, indiquant une fermentation du lactose (figure 23). Ces traits morphologiques sont typiques des bactéries appartenant au groupe des entérobactéries.



Figure 21.Aspect des colonies des Entérobactéries sur milieu MacConkey

A.2. Croissance sur milieu SS (Salmonella-Shigella)

Des colonies incolores à centre noir, de forme circulaire, et de taille moyenne à grande (figure 24). La coloration noire centrale est due à la production de sulfure d'hydrogène (H_2S), un marqueur typique de certaines espèces telles que *Salmonella* spp. Ce type de croissance constitue un indicateur différentiel clé permettant la distinction de *Salmonella* des autres entérobactéries non productrices de H_2S .



Figure 22.Aspect des colonies de Salmonella sur milieu SS (Lombric 2.10^{-1}).

- L'examen microscopique montre que les colonies isolées sur le milieu SS sont des bacilles à Gram négatif (figure 25).

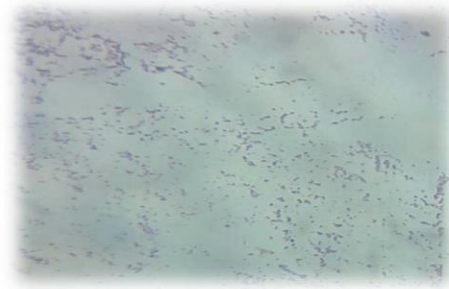


Figure 23. Observation microscopique des colonies bacille à Gram négatif (GR x1000)

b. 1. Test de Catalase

Les tests de catalase se sont révélés positifs pour les bactéries à Gram négatif (Figure 24) :

- Formation de bulles d'air.
- Émission d'O₂ suite à la dégradation de H₂O₂.



Figure 25. Test de Catalase

b. Les staphylocoques

- Après inoculation sur le milieu de GN, nous avons noté la présence de colonies distinctives, de couleur jaune, de tailles variées (petites, moyennes et grandes)(Figure 27).

- La coloration de Gram a montré des bactéries Gram positives. L'examen microscopique a confirmé que les colonies isolées sur le milieu GN étaient des coques Gram positives (Figure 29)



Figure 26.Aspect des colonies de Staphylocoque sur milieu GN (control 1.10^{-5}).

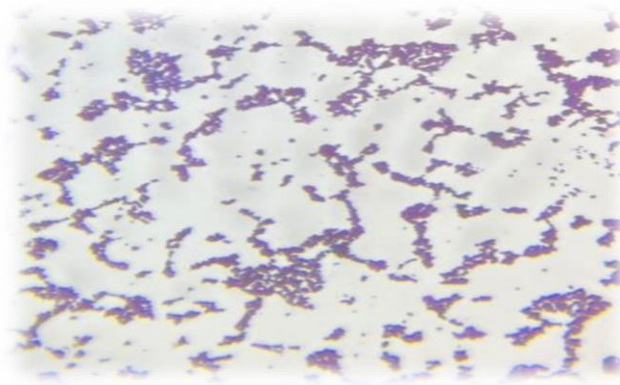


Figure 27.Observation microscopique des colonies Cocci à Gram positif (GR x1000)

b. 1. Test de Catalase

Les tests de catalase se sont révélés positifs pour les bactéries à Gram positif :

Formation de gaz

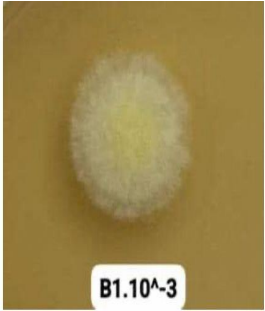

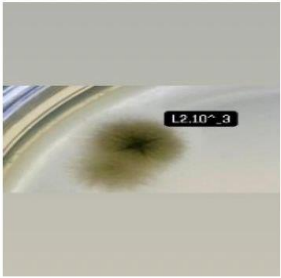

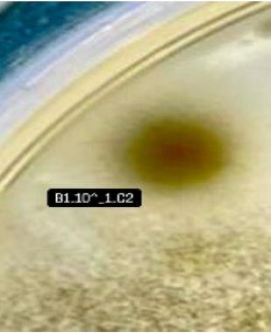
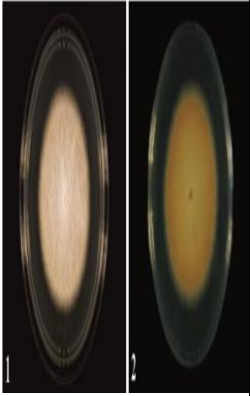
Émission d'O₂ suite à la dégradation de H₂O₂



Figure 28.La production de catalase par les Cocci à Gram positif (catalase +)

Les champignons

Tableau 14. Etude Macroscopique des souches fongiques isolées à partir de la phase de vermicompostage (Chabasse et al., 2002)

Colonie	Description	Les SP	Photo des SP
 <p>Échantillon avant compostage</p>	<p>Couleur (Mycélium jeune)</p> <p>Consistance : Laineuse</p> <p>Taille : Petite 5 mm</p> <p>Forme de contour : irrégulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface duveteuse</p>	<p>S1</p> <p>Mucur</p>	
 <p>Échantillon après compostage (lombricomposte)</p>	<p>Couleur : (brun olive à brun foncé)</p> <p>Consistance : poudreuse à veloutée</p> <p>Taille : grande 40 mm</p> <p>Forme de contour : régulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface souvent zonée</p>	<p>S2 Alternaria</p>	
 <p>Échantillon avant compostage</p>	<p>Couleur : (lavande pâle)</p> <p>Consistance : coton-neuse</p> <p>Taille : grande 40 mm</p> <p>Forme de contour : irrégulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface aérienne velouté</p>	<p>S3</p> <p>Fusarium verticillioides</p>	

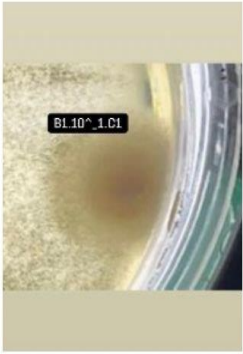
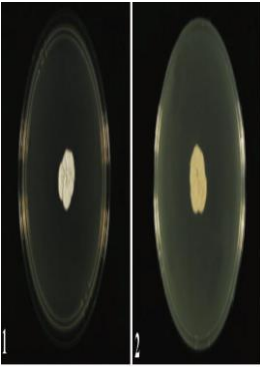

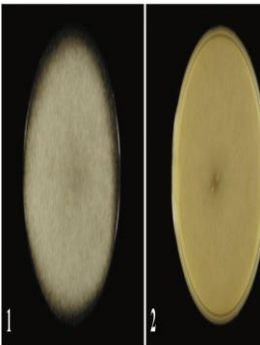
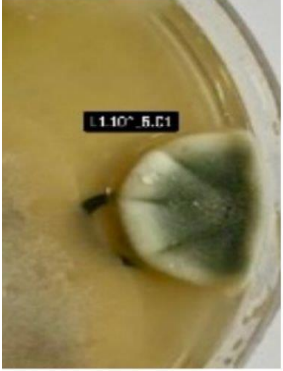
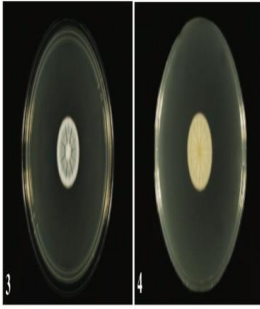
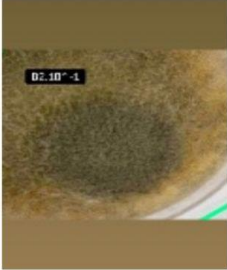
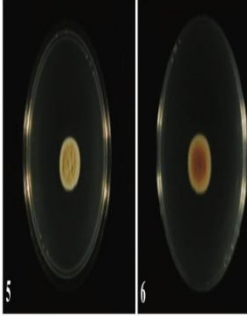
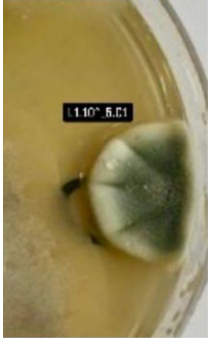

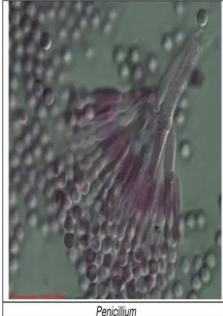

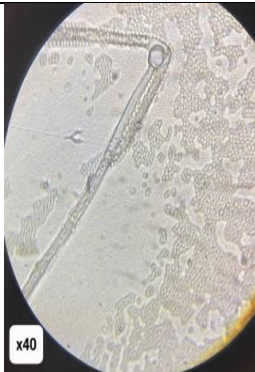
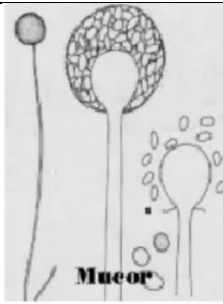
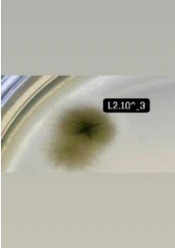









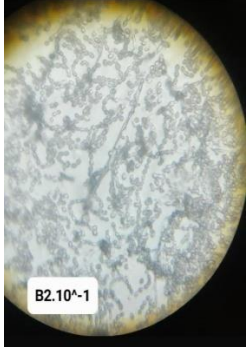

 <p>Échantillon avant compostage</p>	<p>Couleur (Couleur des colonies) :Blanc à rose orangé.</p> <p>Consistance :Parfois finement poudreuse</p> <p>Taille : petite 5 mm</p> <p>Forme de contour : régulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface souvent glabre, humide</p>	<p>S4 <i>Acremonium</i></p>	
 <p>Échantillon control (sans lombrique)</p>	<p>Couleur : blanc à grisâtre</p> <p>Consistance : laineuse, cotonneuse</p> <p>Taille : grande 40mm</p> <p>Forme de contour : irrégulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface duveteuse</p>	<p>S5 <i>Rhizopus</i></p>	
	<p>Couleur :vert olive en surface</p> <p>Consistance :poudreuse à veloutée</p> <p>Taille :grande 40 mm</p> <p>Forme de contour :régulier</p> <p>Aspect de la surface :Surface dense, poudreuse</p>	<p>S6 <i>Penicillium expansum</i></p>	
 <p>Échantillon avant compostage</p>	<p>Couleur : vert grisâtre en surface</p> <p>Consistance : poudreuse à veloutée</p> <p>Taille : grande 45 mm</p> <p>Forme de contour : régulier</p> <p>Aspect de la surface : Surface uniforme</p>	<p>S7 <i>Penicillium piccum</i></p>	

Tableau 15. Etude Microscopique des souches fongiques isolées à partir de la phase de vermicompostage (David M.,1997)

Colonie	Observation microscopique	Description	Les SP	Photos des sp
 <i>Échantillon avant compostage</i>	 x40	Thalle cloisonné Conidie Simple ou ramifiée Sporocystes Ronde ou ovoïde ,hyalines ou pigmentées,lisses ou échinulées	S1 Pénicillium expansum	 Pénicillium
 <i>Échantillon avant compostage</i>	 x40	Thalle Non cloisonné Sporocystes Sphériques Sporangiospores rondes lisses hyalines à légèrement pigmentées	S2 Mucor	 Mucor
 <i>Échantillon après compostage (lombricomposte)</i>	 x40	Thalle Cloisonné Conidiophores Bruns, dressés, simples ou peu ramifiés Conidies En forme de massue, muriformes, brunes, surface rugueuse, parfois avec rostre	S3 Alternariasp.	

 <p>Échantillon avant compostage</p>		<p>Thalle cloisonné Conidiophores Simples, avec phialides (monophialides) Microconidies Petites, ovales, hyalines, en chaînes longues Macroconidies Fusiformes, multicloisonnées, légèrement incurvées, hyalines</p>	<p>S4 Fusarium verticillioides</p>	
 <p>Échantillon control (sans lombrique)</p>		<p>Thalle Non cloisonné Sporocystes Sporanges sphériques, avec columelle Spores Sporangiospores sphériques, hyalines brunes lisses</p>	<p>S5 Rhizopus</p>	
 <p>Échantillon avant compostage</p>		<p>Thalle Cloisonné Conidies Simple ou ramifiée Sphériques, lisses Conidiophores Ramifiés en pinceau</p>	<p>S6 Penicillium piccum</p>	

8. Dénombrement de la Flore microbienne

Le tableau 14 représente les moyennes des colonies dénombrées (en UFC) avec leur déviation standard(SD) et les pourcentage des différents flores microbiennes étudiées, soit les salmonelles,shigelles,coliformes, entérobactéries, champignons et la flore mésophile.

Tableau 16.Résultats de dénombrement dès la flore microbienne sur les milieux sélectifs

traitement		salmonelles (ufc/g)	Shigelles (ufc/g)	Coliformes (ufc/g)	Entérobactéries lactose(-) (ufc/g)	Entérobactéries lactose(+) (ufc/g)	Champignon (ufc/g)	FTAM (flore totale mésophile) (ufc/g)
avant traitement	Mean	1595,00	3500,00	3000,00	9245,00	7335,00	1545,50	19750,00
	SD	63,640	1739,483	509,117	1633,417	3302,189	135,057	1343,503
	% of Total Sum	31,5%	24,8%	51,5%	60,5%	31,0%	38,7%	47,1%
Avec lombrique	Mean	660,00	8065,00	910,00	3910,00	10025,00	1355,00	10425,00
	SD	933,381	7544,829	1286,934	3082,986	813,173	403,051	7035,712
	% of Total Sum	13,0%	57,2%	15,6%	25,6%	42,4%	34,0%	24,8%
control	Mean	2815,00	2545,00	1910,00	2115,00	6275,00	1090,00	11800,00
	SD	1930,402	134,350	127,279	940,452	4631,549	127,279	848,528
	% of Total Sum	55,5%	18,0%	32,8%	13,9%	26,5%	27,3%	28,1%
Total	Mean	1690,00	4703,33	1940,00	5090,00	7878,33	1330,17	13991,67
	SD	1361,822	4353,912	1122,711	3689,753	3097,260	285,034	5538,810
	% of Total Sum	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

La figure 29 présente des histogrammes comparant les % de différentes populations microbiennes (exprimée en UFC/g, Unités Formant Colonie par gramme).

Les % de la plupart des micro-organismes pathogènes sont très élevés avant tout traitement. Les Coliformes et les Entérobactéries lac- sont particulièrement abondants, atteignant respectivement plus de 50% et 60% des UFC/g. Dans le "control", on observe une réduction significative des populations de micro-organismes indésirables inférieures à 40% (Shigelles, Coliformes, Entérobactéries lac- et lac+) sauf pour les salmonelles où on observe une augmentation de 55.52%. Tandis qu'au niveau du traitement avec le lombric nous avons observé une diminution

significative des salmonelles (13.02%) et les autres flores avec un taux inférieur à 35%, et une augmentation des shigelles (57,16%) et entérobactéries lac + (42,42%).il est à noter que la flore totales mésophyles (24,84%) est plu basse en présence de lombric par rapport aux autres traitements.

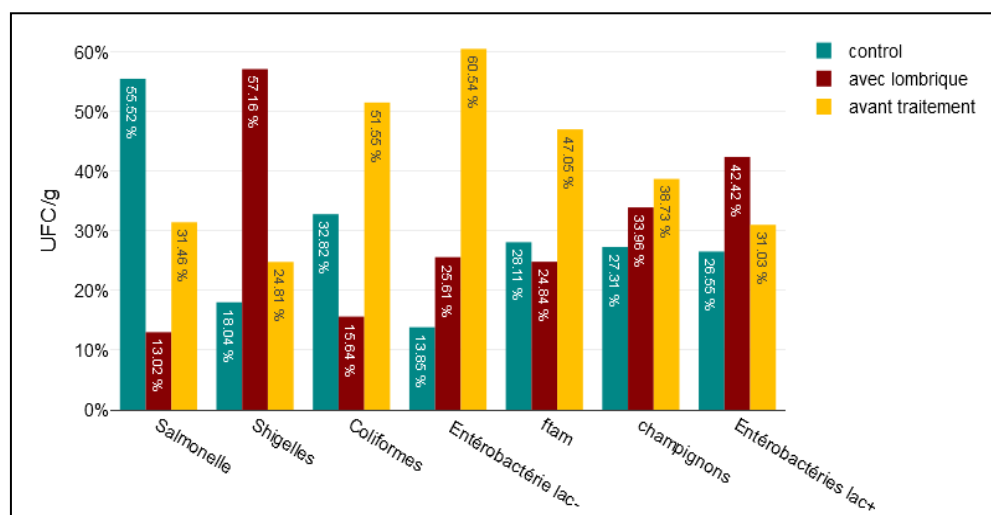


Figure 29. Histogramme des % de la flore microbienne isolés au cours de l'étude.

La diminution de la plupart de flore aux cours de processus est attribuée à l'action combinée de la digestion par les lombrics, d'une aération améliorée du substrat et de l'activation enzymatique. Dans une étude de (Mulye.*et al.*2015) a montré que le nombre de *E.coli* tendent à diminuer au cours de vermicompostage, Les coliformes et les entérobactéries lactose (-) montrent une tendance similaire (**Figure 30**), indiquant une meilleure hygiène du compost (Hanc,2022).

Cependant, le traitement avec lombrics entraîne une augmentation des *Shigelles* et des entérobactéries lactose (+), suggérant que certaines souches opportunistes profitent des conditions favorables créées par les lombrics (humidité, accessibilité du substrat). Cependant, les lombrics semblent favoriser la prolifération des *Shigelles*, et des *Enterobactéries* lac+, ou du moins ne pas les réduire autant que le groupe témoin, voire les augmenter. L'augmentation de nombre des *Shigelles* et des Entérobactéries lac+ est particulièrement préoccupante et nécessite une investigation plus approfondie. Cette situation met en avant que, bien que le vermicompostage présente des bénéfices, certaines flores peuvent se développer si les conditions ne sont pas strictement contrôlées (Fritz *et al.*, 2012).

La flore mésophile totale et les champignons diminuent dans les deux traitements, avec une réduction plus prononcée en présence de lombrics, ce qui reflète une stabilisation microbienne et une

baisse de l'activité biologique excessive, indicateurs de la maturité du compost (Cai et *al.*, 2018). En conclusion, le vermicompostage semble globalement plus efficace que le compostage traditionnel pour diminuer la charge microbienne, tout en nécessitant une vigilance pour éviter l'émergence de certains pathogènes spécifiques.

9. Test de phytotoxicité.

Les analyses phytotoxiques constituent des indicateurs cruciaux pour juger de la maturité et de la qualité agricole d'un compost. Pour ce travail, trois indicateurs ont été sélectionnés : l'Indice de Germination (IG), le RSG (relative seedgrowth) et le RRG (relative rootgrowth). L'espèce bio indicatrice choisie est le cresson alénois (*Lepidium sativum*).

2.1. IG % :

L'Indice de Germination offre une évaluation de la phytotoxicité des extraits de compost. un indice de qualité supérieur à 80 % est couramment considéré comme un critère indiquant que le compost est mature et sans toxicité pour les plantes.

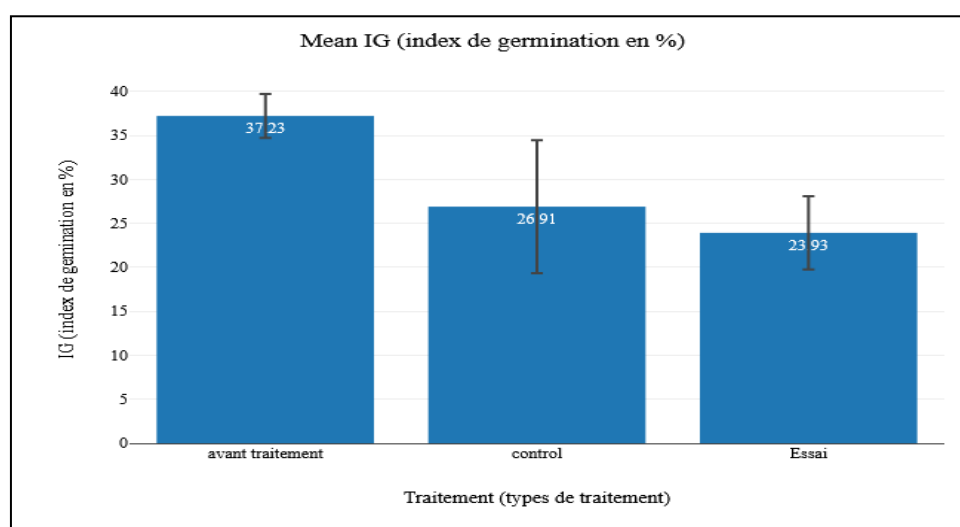


Figure 31. Impact du vermicompostage des déchets de papier et de fiente de pigeon sur l'indice de germination (IG) du cresson alénois (*Lepidium sativum*)

Les données indiquent une diminution notable de l'IG par rapport l'état initial avec 26.91% en control et 23,96 % en essai (avec lombric) ce résultats est contradictoire avec les travaux des autres auteurs. Représentant une stabilisation de la matière organique pendant le processus de vermicompostage. Des valeurs atteignant ou dépassant 100 % vers la fin du processus signalent également un effet stimulant, généralement attribué à la libération de composés humiques et de phytohormones générées par l'activité des lombrics (Edwards et Blouin, 2019). Cela peut être expliqué par la probabilité que

les graines utilisées sont de mauvaise qualité, ou bien le compost contient des substances phytotoxiques (Figure 32).

Conclusion

Les résultats de cette étude, analysés à travers divers paramètres physico-chimiques et microbiologiques, révèlent des dynamiques complexes et des effets différenciés des vers de terre (lombrics) sur la stabilisation de la matière organique au cours du processus de vermicompostage.

Dans cette expérimentation, nous avons mis en œuvre un processus de vermicompostage de 45 jours en utilisant un mélange de déchets de papier, source de carbone, et de fientes de pigeons, riches en azote.

Sur le plan physico-chimique, le pH initialement légèrement basique a connu une diminution au cours du traitement. Toutefois, la présence des lombrics a exercé un effet tampon, stabilisant le pH à des niveaux modérément plus élevés et moins fluctuants que dans le groupe témoin sans lombrics. Cela suggère que les vers de terre jouent un rôle dans la régulation de l'acidification résultant de la décomposition.

La conductivité électrique (CE) a diminué globalement après traitement, ce qui reflète une réduction des sels solubles. Cependant, les valeurs de CE sont restées plus élevées dans les substrats avec lombrics, ce qui peut s'expliquer par une minéralisation plus efficace et une libération accrue d'ions due à l'activité biologique des vers.

Le solide total (ST%) et le pourcentage de cendres ont augmenté de manière significative, en corrélation avec la diminution de la matière organique (MO%). Bien que l'activité des lombrics ait accéléré la dégradation, aucune différence significative n'a été observée dans les pourcentages finaux de MO% et de cendres entre les deux groupes. Cela peut suggérer soit une efficacité similaire à long terme entre décomposition naturelle et biologique, soit une durée expérimentale insuffisante pour révéler des écarts significatifs.

Sur le plan microbiologique, le vermicompostage s'est révélé très efficace pour réduire les populations de *Salmonella* spp., de coliformes totaux et d'entérobactéries lactose⁻, ce qui représente un avantage notable pour l'hygiénisation des déchets organiques. Toutefois, de manière inattendue, une augmentation préoccupante des populations de *Shigella* spp. et d'entérobactéries lactose⁺ a été observée dans les substrats avec lombrics. Ces groupes bactériens pouvant inclure des pathogènes opportunistes, cette prolifération soulève des interrogations importantes quant à la sécurité sanitaire du produit final. Il est donc essentiel de poursuivre les recherches pour élucider les mécanismes sous-jacents à ces observations (par exemple : création d'un micro-environnement favorable, libération de nutriments spécifiques, interactions microbiennes favorisées par les vers).

Concernant la phytotoxicité, l'indice de germination a révélé une inhibition partielle de la germination, suggérant la présence de composés intermédiaires phytotoxiques résultant d'une décomposition incomplète.

En conclusion, le vermicompostage s'affirme comme une méthode prometteuse pour la valorisation et la stabilisation de déchets organiques, tout en présentant des avantages significatifs en matière d'hygiénisation. Toutefois, les résultats obtenus soulignent également la **nécessité d'une** vigilance renforcée, notamment en ce qui concerne la sécurité microbiologique du produit final et la maturité du compost avant toute utilisation agricole ou horticole.

Perspectives

Pour améliorer l'efficacité et la sécurité du lombricompostage, plusieurs axes de recherche et de développement peuvent être envisagés :

- Prolonger la durée du compostage au-delà de 45 jours afin d'assurer une dégradation complète de la matière organique et une stabilisation microbiologique accrue.
- Étudier l'impact de différentes espèces de lombrics, car certaines espèces pourraient mieux réguler les populations microbiennes indésirables.
- Caractériser finement les communautés microbiennes afin de mieux comprendre les dynamiques microbiennes durant le processus.
- Tester des mélanges de déchets alternatifs ou enrichis (ex. : ajout de biochar, co-compostage avec d'autres résidus organiques) pour moduler les propriétés physico-chimiques et microbiologiques du compost final.
- Évaluer la phytotoxicité sur une gamme plus large de plantes et à différents stades de croissance pour valider l'innocuité du compost sur les cultures.

Ces pistes d'approfondissement sont essentielles pour garantir une utilisation sûre et durable du lombricompost dans l'agriculture urbaine, l'amendement des sols et la gestion intégrée des déchets organiques.

Références bibliographiques

1. Addou, A. (2009). *La gestion des déchets solides : cas de la commune urbaine de Mohammedia*. Université Hassan II.
2. Aira, M., Domínguez, J., & Gómez-Brandón, M. (2020). Role of earthworms in organic matter decomposition. *Biology and Fertility of Soils*, 56, 755–767.
3. Allaoui, A. (2020). *Gestion des déchets solides ménagers et assimilés*. Mémoire de master, Université de Béjaïa.
4. Antil, R. S., Raj, D., Abdalla, N., & Inubushi, K. (2013). *Composting of organic wastes: A critical review on maturity and stability parameters*. *Environmental Reviews*, 21(1), 30–48.
5. Bayard, R., Benbelkacem, H., Buffière, P., & Gourdon, R. (2001). Influence du pH sur la dégradation des déchets organiques. *Revue des sciences de l'eau*, 14(3), 345-357.
6. Belmerhnia, L. (2017). *Approches parcimonieuses pour la sélection de variables et la classification: application à la spectroscopie IR de déchets de bois* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
7. Ben Ayed, R., Ellouze, M., & Abichou, T. (2005). Évolution de la matière organique durant le compostage. *Compostage et gestion des déchets*, 45-58.
8. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.
9. Boughaba, L. (2012). *Étude des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des fientes de volaille*. Mémoire de master, Université de Batna.
10. Cai, L., Zhang, B., Zhu, L., & Hu, X. (2018). Effect of vermicomposting on microbial community and pathogen reduction. *Bioresource Technology*, 267, 158–164.
11. CHERGUI, H. (2024). *Effet d'un herbicide sulfonylurée "Oscar" chez deux espèces de vers de terre dans deux types de sols* (Doctoral dissertation, Université Echahid Chikh Larbi Tébessi-Tébessa).
12. Chouvel, R. (2024). *Environnement et déchets : définitions et enjeux contemporains*. Presses universitaires de France.
13. Damien, F. (2004). *Les déchets : classification et réglementation*. Dunod.
14. Desbois, N. (2013). *Le lombricompostage domestique : principes et mise en œuvre*. Éditions Terre vivante.
15. Devi, C., & Khwairakpam, M. (2023). Vermicomposting: A sustainable practice for managing organic wastes and enhancing soil fertility. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136942.
16. Diabaté, M. (2010). *Gestion des déchets solides urbains et valorisation organique à Abidjan*. Université de Cocody.
17. Dominguez, J. (2004). State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. In C. A. Edwards (Ed.), *Earthworm Ecology* (pp. 401–424). CRC Press.
18. Dominguez, J., & Edwards, C. A. (1997). Biological and ecological aspects of earthworm populations used in vermicomposting. *Pedobiologia*, 41, 607–616.
19. Ducasse, V. (2017). *Les vers de terre et le sol : rôles et classification écologique*. Éditions INRAE.
20. Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. (2015). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.
21. FAO. (2017). *Food loss and waste and the right to adequate food: Making the connection*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
22. Faverial, J. (2016). *Compostage des déchets organiques : état de maturité et phytotoxicité*. INRA.
23. Francou, C. (2003). *Stabilité biologique des composts urbains : mesure, maîtrise et valorisation*. Thèse de doctorat, Université Paris XII.

24. Fritz, J., Schmilewski, G., & Bertoldi, M. (2012). Pathogen reduction by composting. In Haug, R. T. (Ed.), *The Practical Handbook of Compost Engineering* (pp. 437–457). Lewis Publishers.
25. GANKAM, F. (2024). Optimisation de la méthode sous réacteur Johnson-su pour la production d'engrais biologique par compostage des déchets de manioc à Ngotto, Région de l'Est Cameroun: Contextualisation d'une approche technologique basée sur la nature. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 7(6), 1779-1793
26. Garnier, T., & Denis, M. (2007). *Microbiologie : Techniques de laboratoire*. Éditions Lavoisier.
27. Gershuny, G. (2011). *The Rodale Book of Composting: Easy Methods for Every Gardener*. Rodale Press.
28. Ghiti, H. (2017). *Apport de l'action des lombriciens-microorganismes dans la valorisation des déchets organiques par lombrotechniques* [Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri-Constantine 1]. Faculté des sciences de la Nature et de la vie, Département de biologie et écologie végétale.
29. Gómez-Brandón, M. (2019). Vermicomposting: A sustainable process for organic waste management. *Waste Management*, 85, 49–59.
30. Gómez-Brandón, M., Aira, M., & Domínguez, J. (2011). Changes in microbial community structure and function during vermicomposting. *Bioresource Technology*, 102(3), 4171–4178.
31. Graves, R. E., & Hattemer, G. (2000). *Composting and compost use for agricultural soils*. USDA.
32. Hanc, A., et al. (2022). Effect of vermicomposting on microbial communities and pathogen dynamics. *Waste and Biomass Valorization*, 13, 89–102.
33. Hubbe, M. A., & Bowden, C. (2009). Handmade paper: history and techniques. *BioResources*, 4(4), 1736–1792.
34. Jemali, M., Aloui, F., & Bousselmi, L. (1996). *Compostage et qualité des amendements organiques*. Revue des Sciences de l'Eau, 9(2), 221–240.
35. Jorge Sierra, J., et al. (2023). Earthworm activity and compost quality: A review. *Agriculture and Environmental Letters*, 8, e20082.
36. Kumari, B., et al. (2024). Nutrient dynamics and humic substance formation in vermicompost. *Journal of Environmental Management*, 335, 117692.
37. Lavelle, P., et al. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33, 159–193.
38. Lecheheb, A. (2016). *Caractérisation et valorisation des fientes de pigeons*. Mémoire de Master, Université de Mostaganem.
39. Lores, M., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2006). Biochemical changes and microbial activity during vermicomposting of waste. *Bioresource Technology*, 97, 1861–1867.
40. Majlessi, M., et al. (2012). Impact of vermicomposting on pH and microbial stability. *Journal of Environmental Research*, 4(2), 95–104.
41. Mausam. (2024). *Vermicomposting: A complete guide for sustainable waste management*. GreenEarth Publications.
42. Misra, R. V., Roy, R. N., & Hiraoka, H. (2005). *On-farm composting methods*. FAO.
43. Morin, P. (2004). *Les facteurs influençant la qualité des composts*. Éditions de l'environnement.
44. Mulhauser, B. (2008). *Compostage et lombricompostage domestiques : étude de faisabilité*. Mémoire, Université de Lausanne.
45. Mulye, P. (2015). Microbial analysis of vermicompost. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(9), 1016–1022.
46. Negi, S., & Suthar, S. (2023). Biological processes and microbial mechanisms in vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130495.

47. Pathma, J., & Sakthivel, N. (2012). Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit plant growth-promoting activity. *Microbiological Research*, **167**(10), 571–578.
48. Pérès, G., Cluzeau, D., & Menasseri, S. (2011). Earthworm functional groups and soil structure. *Applied Soil Ecology*, **47**(1), 30–36.
49. Ramdani, A. (2015). *Compostage des déchets organiques agricoles : méthodes et contrôles*. Université d'Oran.
50. Reinecke, A. J., Viljoen, S. A., & Saayman, R. J. (1992). The influence of temperature on the reproduction of the earthworm *Eisenia fetida*. *Pedobiologia*, **36**, 162–168.
51. Rostami, M. (2011). Impact of environmental factors on earthworm populations. *Journal of Soil Biology*, **3**, 56–62.
52. Rynk, R., et al. (1992). *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES-54).
53. Singh, A., Sharma, S., & Suthar, S. (2021). Role of composting in solid waste management. *Waste Management & Research*, **39**(12), 1432–1442.
54. Singh, K., et al. (2011). Effect of vermicompost on microbial and enzymatic activity in soil. *Waste Management*, **31**(5), 743–747.
55. Stork, N. E., & Eggleton, P. (1992). Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, **7**(1-2), 38–47.
56. Teacă, C.-A. (2023). The cultural and technical evolution of papermaking. *Journal of Cultural Heritage*, **61**, 182–193.
57. Usta, H. G., & Guven, E. (2024). Optimization of composting conditions and microbial activity. *Environmental Science and Pollution Research*, **31**, 11234–11246.
58. Voung, T. (2022). *Les bienfaits du lombricompost : Propriétés et applications en agriculture*. Éditions Agricoles.
59. Yadav, A., & Garg, V. K. (2016). Management of organic waste by vermicomposting: A sustainable solution. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 18213–18231.
60. Zucconi, F., & de Bertoldi, M. (1987). Compost quality standards based on maturity indices. *BioCycle*, **28**(7), 27–29.

Annexes

Annexe 1 : Mesure la température.



Annexe 2 : Agitation et filtration de la suspension



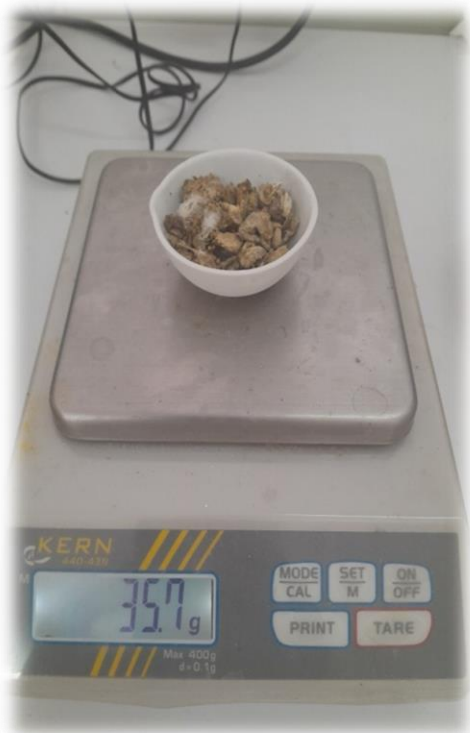
Annexe 3 : Mesure de PH

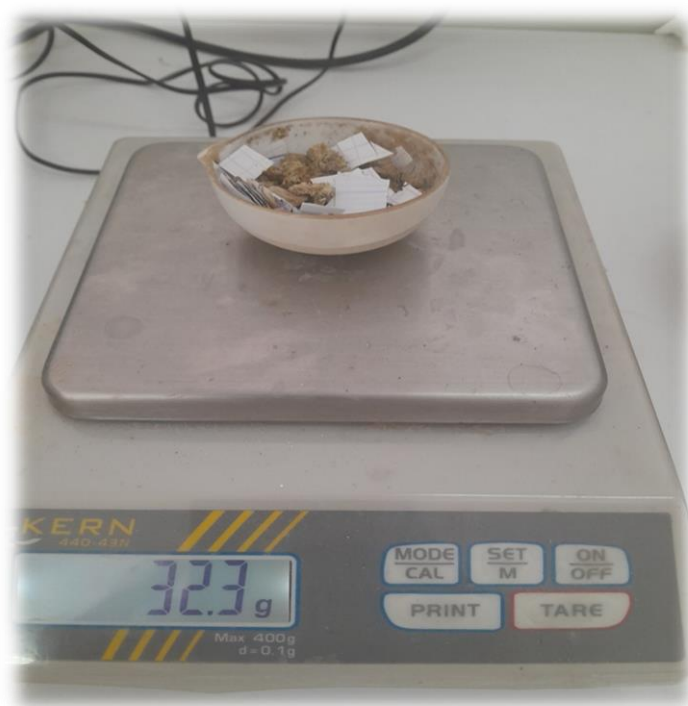


Annexe 4 : Mesure de la conductivité électrique



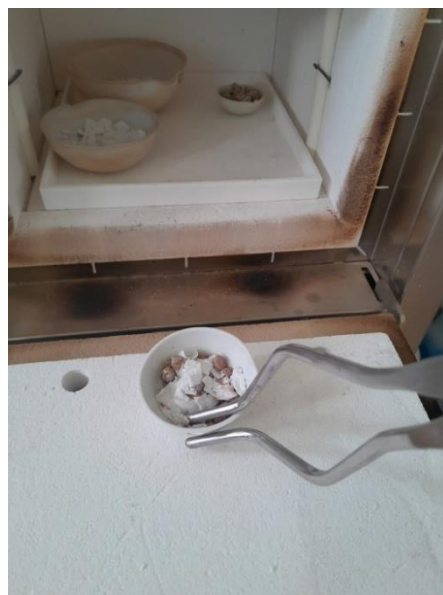
Annexe 5 : Mesure humidité relative H%





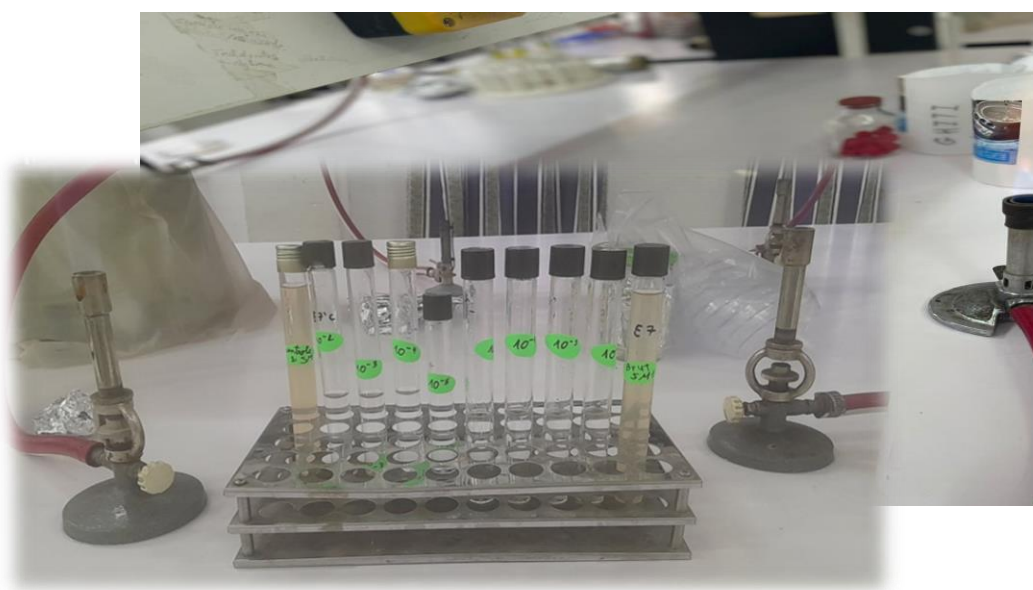
Annexe 6 : Mesure matière organique MO%



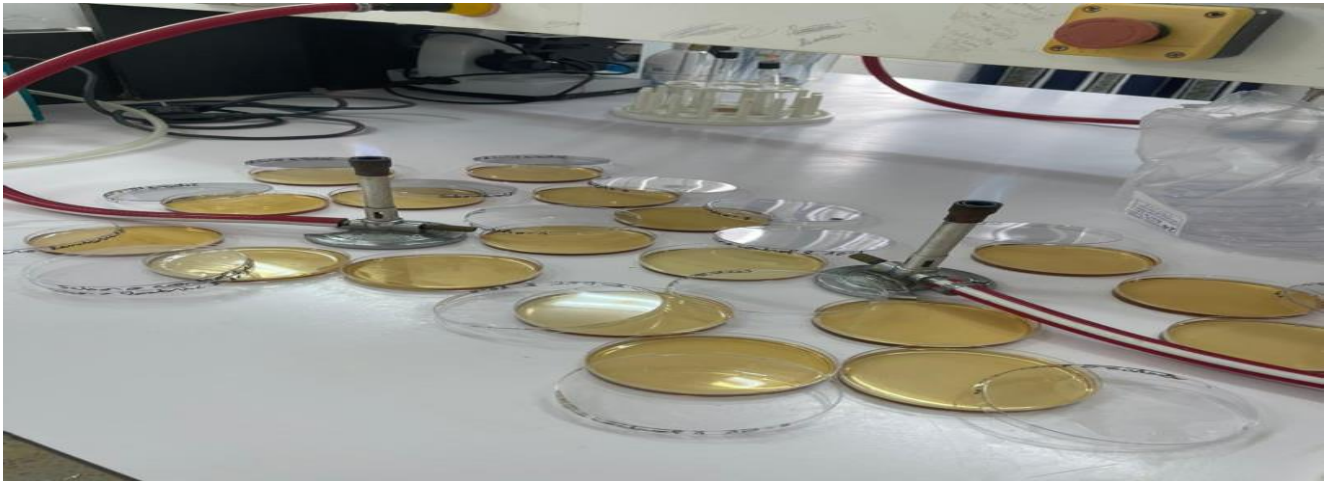


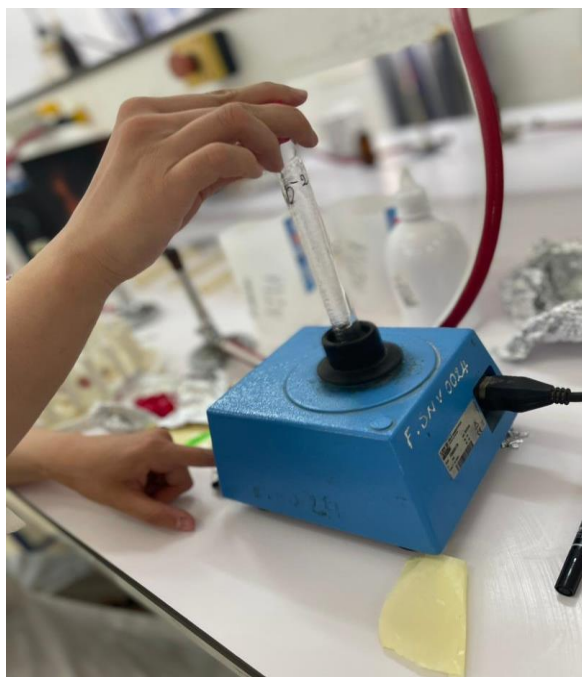
Annexe 7 : Préparer les dilutions





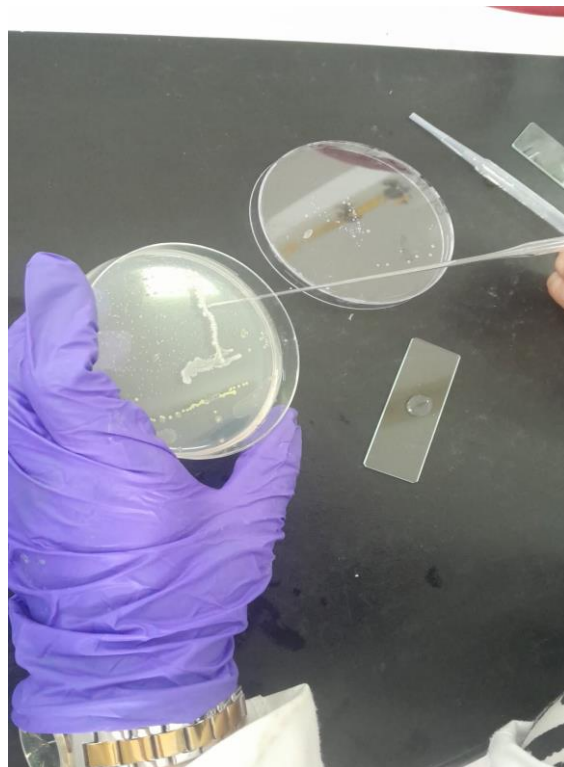
Annexe8 :Ensemence-ment sur les milieu de culture



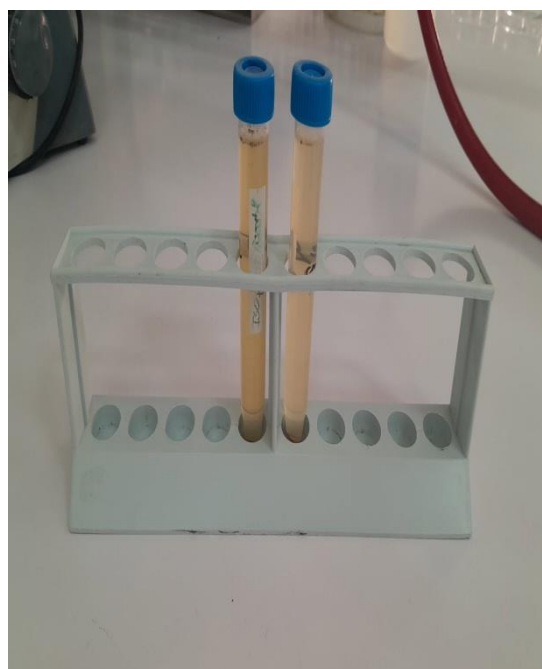




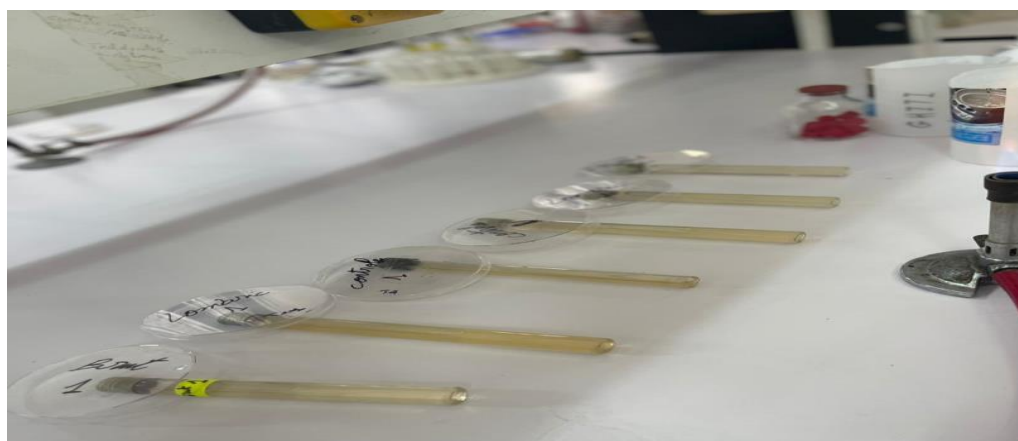
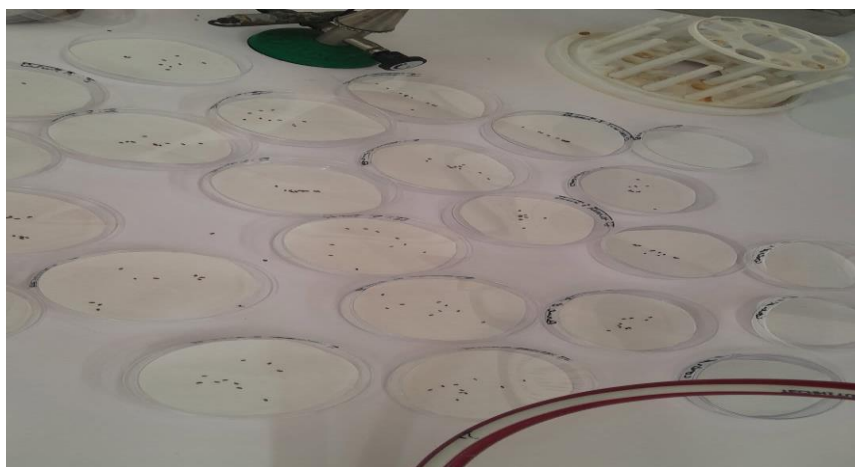
Annexe 9 : Test catalase

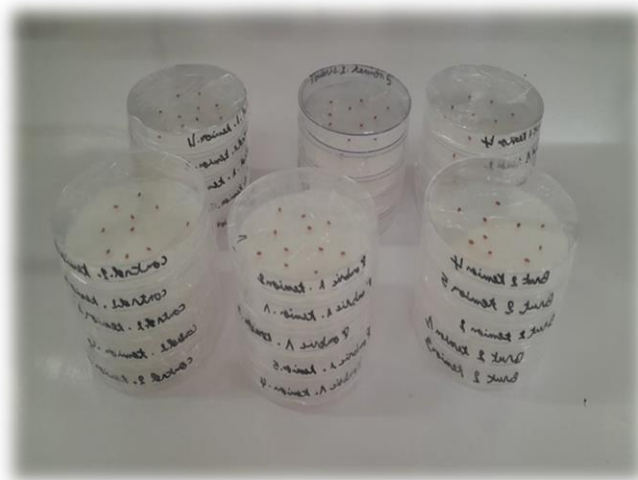


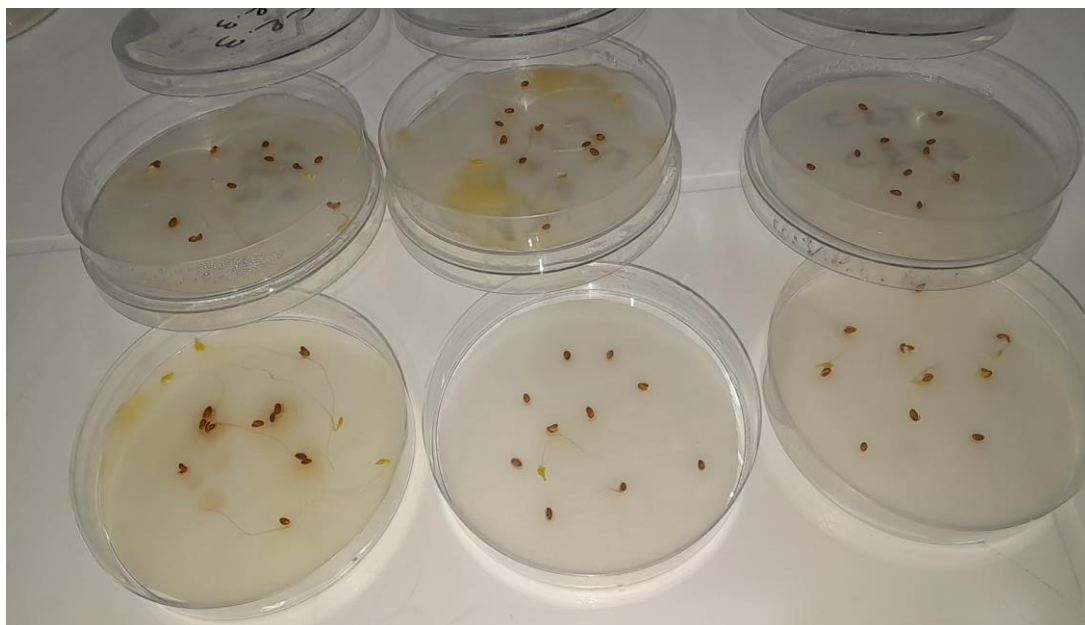
Annexe 10 : Centrifugation d'extrait



Annexe 11 : Test de germination







الملخص

تعد النفايات الناتجة عن فضلات الحمام والورق ذات تأثيرات سلبية على البيئة، لذا تُعتبر عملية التسميد بالديدان الحل الأمثل للتخلص من الفضلات العضوية وإعادة تحويلها إلى منتج جديد فعال ومفيد. من هذا المنطلق، نسعى من خلال عملنا إلى المساهمة في تقليص هذا النوع من النفايات باستخدام هذه التقنية.

في إطار دراستنا، أجرينا تحليلاً فيزيائياً وكيميائياً بالإضافة إلى تحاليل بيولوجية لتقييم فعالية عملية التسميد بالديدان. كما قمنا بإجراء اختبار إنبات باستخدام حب الرشاد لقياس تأثير السماد على نمو النبات.

استناداً إلى نتائج تجاربنا، نستنتج أن التسميد بالديدان لمزيج الورق وروث الحمام يعد وسيلة فعالة بيئياً واقتصادياً لتحويل النفايات العضوية إلى سماد ذو جودة، مما يعزز من توجه التنمية المستدامة في إدارة المخلفات البيولوجية.

الكلمات المفتاحية: السماد الدودي، فضلات الحمام، السماد، اختبار الانبات

Résumé

Les déchets provenant des excréments de pigeon et du papier représentent un risque environnemental en raison de leur accumulation et de leur décomposition lente. Le vermicompostage se présente comme une solution idéale pour éliminer ces déchets organiques et les transformer en un nouveau produit utile et efficace. Dans cette perspective, notre projet vise à contribuer à la gestion de ce type de déchets par le biais de cette méthode biologique.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons mené des analyses physico-chimiques et biologiques pour évaluer l'efficacité du processus de vermicompostage. Par ailleurs, nous avons réalisé un test de germination avec des graines de cresson afin d'analyser la toxicité du compost sur la germination de cette plante.

À l'issue de notre étude, et au regard des résultats obtenus, nous concluons que le vermicompostage du mélange papier et fiente de pigeon constitue une méthode efficace, écologique et économique pour la valorisation des déchets organiques. Cette approche permet de produire un amendement organique de qualité, s'inscrivant ainsi dans une démarche de développement durable concernant la gestion des biodéchets.

Mot clé :vermicompostage. Compostage. Déchets des fientes. Test germination

Abstract

Pigeon droppings and paperwastenegatively impact the environment due to their accumulation and slow decomposition. Therefore, vermicompostingisviewed as an effective method for disposing of and recyclingthisorganicwasteinto a valuable and functionalproduct.Our researchseeks to aid in the reduction of thiswastethroughthisbiologicalmethod.

As part of our investigation, we performed physical, chemical, and biological analyses to evaluate the effectiveness of the vermicomposting process. Additionally, weconducted a germination test withgardencresseeds to test the compost'spotentialtoxicity on plant germination.

Concludingourstudy, wefoundthatusingvermicomposting to process a combination of paper and pigeon droppingsis an efficient, environmentallyfriendly, and cost-effective technique for transformingorganicwasteinto a high-qualitysoilenhancer. This methodpromotessustainabledevelopment in organicwaste management

Keyword:vermicomposting. composting. wastedroppings. Germination test



Déclaration de correction de mémoire de master 2025

Référence du mémoire N°: / 2025	PV de soutenance N°: / 2025
Nom et prénom(en majuscule) de l'étudiant (e) : Djamaoui Karim, Kalfali Nasserine	لقب و اسم الطالب (ة) :
La mention Très bien	Note(./20) العلامة
L'intitulé de mémoire la mentionnée Essai de Vermicompostage d'un mélange de fientes de pigeons et de déchets de papiers	

تصريح وقرار الأستاذ المشرف : Déclaration et décision de l'enseignant promoteur

<p>Déclaration :</p> <p>Je soussigné (e), Ghiti H. assia, (grade) MCB à l'université de Biskra, avoir examiné intégralement ce mémoire après les modifications apportées par l'étudiant.</p> <p>J'atteste que :</p> <ul style="list-style-type: none"> * le document a été corrigé et il est conforme au model de la forme du département SNV * toutes les corrections ont été faites strictement aux recommandations du jury. * d'autres anomalies ont été corrigées 	<p>تصريح :</p> <p>أنا الممضي (ة) أسفله (الرتبة) بجامعة أصرح بأنني راجعت محتوى هذه المذكرة كليا مراجعة دقيقة وهذا بعد التصحيحات التي أجراها الطالب بعد المناقشة، وعليه أشهد بأن : * المذكرة تتوافق بشكلها الحالي مع النموذج المعتمد لقسم علوم الطبيعة والحياة. * المذكرة صحت وفقا لكل توصيات لجنة المناقشة * تم تدارك الكثير من الإختلالات المكتشفة بعد المناقشة</p>
--	--

<p>Décision :</p> <p>Sur la base du contenu scientifique, de degré de conformité et de pourcentage des fautes linguistiques, Je décide que ce mémoire doit être classé sous la catégorie</p>	<p>قرار :</p> <p>اعتمادا على درجة مطابقتها للنموذج ، على نسبة الأخطاء اللغوية وعلى المحتوى العلمي أقرر أن تصنف هذه المذكرة في الدرجة :</p>												
<table border="1"> <tr> <td>acceptable مقبول</td> <td>ordinaire عادي</td> <td>bien حسن</td> <td>très bien جيد جدا</td> <td>excellent ممتاز</td> <td>exceptionnel متميز</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>D</td> <td>C</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>A+</td> </tr> </table>	acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien جيد جدا	excellent ممتاز	exceptionnel متميز	E	D	C	B	A	A+	
acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien جيد جدا	excellent ممتاز	exceptionnel متميز								
E	D	C	B	A	A+								



الأستاذ المشرف

(Signature)

التاريخ
2025 / 06 / 12

NB : Cette fiche doit être collée d'une façon permanente derrière la page de garde sur les copies de mémoire déposées au niveau de la bibliothèque universitaire