JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION, DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Rôles des microorganismes dans le processus de lombricompostage

F.F. Manantsoa, R.H. Baohanta, F.J. Randrianarimanana, J-F. Arrighi, C. Chaintreuil, H. Randriambanona, I. Ratsizafy, H. Ramanankierana

ISSN : 2428-8500

DOI : 10.52497/jitipee.v9i2.376

Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement
ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

Rôles des microorganismes dans le processus de lombricompostage

Manantsoa Faustin F. [(1), (2)], Baohanta Rondro H. [(1)], Randrianarimanana Fanomezantso J. [(3)], Arrighi Jean-François [(4)], Chaintreuil Clémence [(4)], Randriambanona Herizo [(1)], Ratsizafy Irinah [(1)], Ramanankierana Heriniaina [(1)]

[(1)] Laboratoire de Microbiologie de l'Environnement, Centre National de Recherches sur l'Environnement, BP 1739, Antananarivo, Madagascar
[(2)] Université d'Antananarivo, École Doctorale Sciences de la Vie et de l'Environnement
[(3)] Université d'Antananarivo, Facultés des Sciences, Mention Biochimie Fondamentale et Appliquée
[(4)] PHIM Plant Health Institute, Université de Montpellier, IRD, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Campus de Baillarguet, 34398 Montpellier, France

kifr.francky@gmail.com

Résumé *– Le lombricompostage est une forme de valorisation des déchets organiques en fertilisant biologique sous l'action des vers de terre, mais également avec l'activité microbiologique. Cette étude vise à améliorer la qualité du lombricompost avec l'inoculation des bactéries favorisant la croissance des plantes. Pour ce faire, pendant 50 jours la capacité de deux souches (un Rhizobium et une Bactérie Solubilisatrice de Phosphate (BSP)) à survivre et à améliorer le lombricompost a été testée. La qualité microbiologique (densité de microorganismes inoculés) et les propriétés chimiques (teneurs en carbone (C), Azote (N), phosphore (P), potassium (K) et rapport carbone/azote (C/N)) des lombricomposts inoculés ont été évaluées. Les résultats ont montré que le lombricompost inoculé par Rhizobium a une amélioration significative en nombre de Rhizobium à la fin de l'expérimentation (50e jour), alors que celui inoculé par la BSP montre un nombre significativement élevé en BSP au 25e jour. Pour la composition chimique, le lombricompost inoculé par Rhizobium présente une concentration significativement élevée en phosphore (P) et en potassium (K) au 50e jour de l'expérimentation, tandis que celui qui est inoculé par la BSP présente une forte concentration en phosphore (P) et un rapport C/N élevé au 25e jour de l'expérimentation. Cette étude a permis de mettre en évidence les potentialités de l'inoculation microbienne à améliorer la qualité du lombricompost.*

Mots clés *: Lombricompost, inoculation, qualité, Rhizobium, BSP.*
DOI : 10.52497/jitipee.v9i2.376

ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

Introduction

Face à la croissance démographique mondiale, les ressources naturelles subissent une forte pression [1]. À Madagascar, la productivité agricole est une question d'actualité [2]. En effet, la population malgache considère peu l'amélioration des terres agricoles avec seulement 16 % des terres cultivées qui sont fertilisées [3] par une application d'environ 4 kg/ha d'engrais [4]. De plus, avec une population rurale représentant plus de 70 % de sa démographie, Madagascar est confronté à des problèmes de gestion de déchets organiques [5]. L'élimination des déchets organiques issus de l'agriculture est ainsi l'un des plus grands problèmes environnementaux et économiques [6]. Plusieurs techniques employées telles que la combustion, l'incinération, l'enfouissement de ces déchets génèrent des gaz à effet de serre, qui contribuent énormément au réchauffement climatique [7] [8]. Pour remédier à ce problème environnemental, certaines méthodes de gestion et de valorisation des déchets organiques tels que le compostage, le vermicompostage ou le lombricompostage ont été investiguées [9]. Ce dernier transforme les déchets organiques en impliquant les vers en composts riches en éléments nutritifs pour les plantes. L'emploi de la technique de lombricompostage est une approche innovante dans la gestion des déchets organiques en les transformant en fertilisant de haute qualité pour le sol [10]. Cependant, les données relatives à la qualité du lombricompost font cruellement défaut du fait du manque de directives techniques et scientifiques fiables sur le processus.

En effet, la connaissance et la maîtrise des facteurs tels que la composition du substrat, le type et la dynamique des vers utilisés, la diversité et la dynamique des microorganismes bénéfiques qui influencent la qualité du compost, permettraient de définir un processus standard qui assurerait la qualité de celui-ci et limiterait les coûts économiques et environnementaux tout en facilitant l'accessibilité de la technologie aux agriculteurs ou industriels. Des recherches sur les effets des paramètres microbiologiques et l'inoculation microbienne ont déjà été réalisées afin de mieux favoriser le déroulement du processus [11]. Des études sur les effets du type de substrats utilisés et les effets du lombricompost sur le développement des cultures ont été également réalisées [12]. Cependant, l'utilisation du lombricompost comme support d'inoculum n'a pas encore été suffisamment étudiée. L'inoculum est un produit obtenu par l'introduction d'un ou plusieurs micro-organismes dans un milieu favorable, permettant leur survie et leur croissance [13]. L'utilisation d'inoculums microbiens favorise la croissance des plantes et améliore la qualité du sol [14]. Pour pallier ce déficit de connaissances, cette étude se fixe comme objectif d'améliorer la qualité du lombricompost par l'introduction d'inoculums microbiens. Afin d'atteindre cet objectif, (i) la survie des bactéries introduites dans le lombricompost a été évaluée ainsi que (ii) les paramètres chimiques et agronomiques du lombricompost inoculé.

1. Matériels et méthodes

1.1. Production de lombricompost

La technique adoptée pour la production du lombricompost est une méthode qui a déjà été optimisée au sein du LME-CNRE [15]. Les déchets organiques (10 % de paille de riz, 20 % de fumier de zébu, 35 % de déchets verts et 35 % de peaux de banane) servant de substrats pour le lombricompostage ont été découpés puis mélangés. Ce mélange standard a ensuite été pré-composté pendant 10 jours en condition aérobie dans l'obscurité et à température ambiante. Ce processus permet d'accélérer la décomposition des matières organiques pour être plus accessibles et facilement colonisées par les vers de terre. Après le pré-compostage, les vers de compost (*Eisenia fetida*) fournis par l'ONG TATA Madagascar, ont été introduits dans les substrats. Ils ont été éparpillés au-dessus du substrat à raison de 50 individus (10 g) pour 1 kg de substrat et pour 45 jours de lombricompostage. On considère que 1 kg de vers de terre peut consommer 0,75 kg de matières organiques par jour [16].

1.2. Inoculation microbienne du lombricompost

Les bactéries utilisées dans cette étude sont des souches de Rhizobium venant de la souchothèque du LME-CNRE, et des bactéries dites solubilisatrices de phosphate (BSP) sélectionnées à partir de sol rhizosphérique de haricot et selon leur efficacité en termes de solubilisation de phosphate [17]. Pour la préparation des solutions bactériennes, les souches pures ont été mises en culture dans des tubes contenant 25 ml de milieu liquide (Yeast-Extract-Mannitol (YEM) pour le Rhizobium et le milieu TriCalcium Phosphate (TCP) pour les BSP, préalablement stérilisés (autoclavé pendant 30 min à 120 °C et à 1 bar). Les tubes ont été incubés à 30 °C à l'obscurité sousd agitation pendant 48 heures. Ensuite, 25 ml de ces suspensions bactériennes avec une concentration de 10^8 à 10^9 UFC/ml (Unités Formant Colonies par ml) ont été mélangés à 100 g de lombricompost stérilisé selon la méthode de Tittabutr *et al* [18]. En effet, le lombricompost a été placé au préalable deux fois à l'autoclave à 121 °C pendant 60 min à 1 bar.

Trois répétitions par inoculum (Rhizobium et BSP) ont été réalisées afin d'évaluer l'effet de l'inoculation sur la qualité du lombricompost pour chaque lombricompost inoculé. L'expérimentation a été exécutée pendant une durée de 50 jours puisque les bactéries utilisées durant l'expérimentation ont une croissance rapide [19]. Durant l'expérimentation les échantillons ont été stockés dans des bocaux à 30 °C.

1.3. Suivi de la cinétique de croissance des bactéries dans le lombricompost

Afin d'évaluer la croissance des bactéries pour chaque traitement, un dénombrement des bactéries contenues dans le lombricompost inoculé a été effectué à T0 (0 jour) c'est-à-dire juste après l'inoculation, T25 (25 jours) et T50 (50 jours). Ainsi, 10 g de lombricompost ont été prélevés à partir de chaque bocal et utilisés pour préparer les solutions mères. Une dilution en cascade a ensuite été effectuée à partir de chaque solution mère. Les dilutions 10^{-2} et 10^{-3} ont été utilisées pour ensemencer des boites de Pétri contenant les milieux spécifiques aux différentes bactéries. Ainsi, 0,1 ml de chaque dilution a été étalé sur milieu YEM contenant de

l'agar (YEMA) pour le dénombrement des Rhizobium et sur milieu TCP contenant de l'agar pour les BSP [20]. Les boites ont ensuite été incubées à 30 °C pendant 48 h pour les deux groupes de bactéries. Après incubation, les colonies bactériennes ont été dénombrées et le nombre de microorganismes (BSP et Rhizobium) a été noté en fonction du temps [21]. Seules les boites ayant le nombre de colonies compris entre 30 et 300 ont été considérées pour le calcul de l'unité formant colonie (UFC) [22], en utilisant la formule suivante [23] :

$$N = \frac{\sum colonies}{V \times (n1 + 0{,}1\, n2) \times d1} \quad (1)$$

Avec N : nombre d'UFC par g d'échantillon,
Σ colonies : somme des colonies des boites interprétables,
V : volume de solution du produit déposé dans les boites (mL),
$n1$: nombre de boites considérées à la première dilution retenue,
$n2$: nombre de boites considérées à la seconde dilution retenue,
$d1$: facteur de dilution de la première dilution retenue.

1.4. Analyse chimique des lombricomposts inoculés

Cinq grammes (5 g) d'échantillon ont été prélevés pour la détermination de la teneur en carbone (C), la teneur en phosphore (P), la teneur en potassium (K), la teneur en azote (N) et le rapport carbone-azote (C/N) a été déduit.
La teneur en carbone organique a été mesurée selon la méthode de Walkley et Black (1934). Le dosage du carbone organique est important pour la détermination de la teneur en matière organique de chaque échantillon [24]. Ainsi, chaque lombricompost produit a été oxydé par un excès d'une solution de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu acide ; l'excès est ensuite déterminé à l'aide d'une solution de sulfate ferreux hydraté ($FeSO_4$, H_2O).
La détermination de la teneur en phosphore (P) de chaque échantillon a été effectuée selon la méthode de BRAY II [25]. Les échantillons sont calcinés dans un four à moufle. Après calcination, 2 ml d'acide chlorhydrique (HCl) concentré (37 %) sont rajoutés aux échantillons préalablement humidifiés avec de l'eau distillée. La solution est ensuite évaporée sur une plaque chauffante et les résidus obtenus sont dissous dans 5 ml d'acide nitrique (HNO_3) 2N. La solution obtenue est filtrée à travers un papier filtre (110 mm). Avant utilisation, le volume de cette solution est ramené à 100 ml avec de l'eau distillée. La densité optique de la solution obtenue précédemment est lue à l'aide d'un spectrophotomètre en utilisant comme catalyseur le réactif vanado-molybdique qui donne une couleur jaune en solution. La densité optique est projetée puis lue par l'appareil pour donner la valeur de la concentration des éléments minéraux testés.
La teneur en potassium (K) des échantillons a été déterminée à l'aide d'un spectromètre d'adsorption atomique à flamme. Le spectromètre est d'abord étalonné avec des solutions étalons de concentration connue. Si la teneur en éléments minéraux de l'échantillon à analyser est plus forte que la solution étalon, la solution à analyser est diluée avec de l'eau distillée dans les proportions adéquates avant l'addition du catalyseur qui est l'acide chlorhydrique. La densité optique est projetée puis lue par le spectromètre pour donner la valeur de la concentration en potassium (K).

ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

La teneur en azote (N) totale des échantillons a été déterminée suivant la méthode de Kjeldahl [26]. Elle est basée sur la transformation de l'azote organique en azote minéral sous une forme ammoniacale (NH_4) SO_4 par l'action oxydative de l'acide sulfurique bouillant sur la matière organique en présence d'un catalyseur (Na_2SO_4, 17 g/100 g ; $CuSO_4$, $5H_2O$, 1,5 g/100 g). Dans des matras de minéralisation, un gramme (1 g) d'échantillon est mélangé avec vingt-cinq millilitres (25 ml) d'acide sulfurique concentré et un comprimé de catalyseur à base de sulfate de cuivre et de sulfate de potassium. L'ensemble est chauffé à 400 °C environ au minéralisateur (Buchi Digestion Unit K.435) pendant 4 à 5h. Lorsque le contenu des matras devient vert limpide, ceux-ci sont retirés du minéralisateur et refroidis à température ambiante. Vingt millilitres (20 ml) d'eau distillée sont ensuite ajoutés à la solution et le mélange est agité.
Les matras contenant la solution à doser sont connectés au réfrigérant d'un distillateur d'azote (BUCHI K-350) tandis que l'autre extrémité du distillateur est plongée dans un bécher contenant un liquide composé de vingt-cinq millilitres (25 ml) d'acide borique et de quelques gouttes d'indicateur coloré (mélange de rouge de méthyle et de bleu de méthylène). Les solutions dans les matras ont pris une coloration violacée. À l'aide de la pompe à soude du distillateur, cinquante millilitres (50 ml) de solution à 40 % d'hydroxyde de sodium sont introduits dans les matras ; le minéralisât a ainsi pris une couleur marron. La distillation est ensuite lancée pendant 10 min., un bécher contenant de l'acide borique et un indicateur coloré (rouge de méthyle) a servi à collecter le distillat. Enfin, le distillat collecté dans un bécher a pris une coloration verte au contact de l'azote ammoniacal recueilli dans le matras. L'azote est dosé par une solution d'acide sulfurique 0,1N. Le dosage est achevé lorsque le contenu du bécher est redevenu violacé. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'azote [27].
Le rapport carbone/azote (C/N) est un indicateur important en agriculture et en écologie, notamment dans le compostage et la gestion des sols. Il représente la teneur de carbone par rapport à la teneur d'azote dans une matière organique. Il a été obtenu selon la formule suivante :

$$\text{Rapport C/N}(\%) = \frac{Teneur\ en\ carbone\ (C)}{Teneur\ en\ azote\ (N)} \quad (2)$$

1.5. Traitement des données 15

Le logiciel XLSTAT 2014 a été utilisé pour le traitement statistique des données. Les données ont été soumises à une analyse de variance selon le test de Newman-Keuls au seuil de probabilité 5 % pour évaluer les groupes statistiques existants des effets des différentes inoculations sur la qualité du lombricompost. Les temps suivis d'une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène, au seuil de probabilité 0,05, selon le test de Newman-Keuls.

ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

2. Résultats

2.1. Effets du temps de stockage sur la survie des bactéries dans le lombricompost

La figure 1 présente la cinétique d'évolution des bactéries dans le lombricompost. En effet, on constate une évolution croissante des Rhizobiums durant les 50 jours, avec une croissance rapide entre 0 et 25 jours, montrant ainsi la résistance et la survie de ces bactéries sur le long terme. En revanche, 2 phases ont été constatées au cours de l'évolution des bactéries BSP, dont une phase croissante de 0 à 25 jours et une phase décroissante au-delà de 25 jours. Ce résultat montre que les bactéries BSP meurent au-delà du 25e jour, d'où la diminution de leur quantité dans le lombricompost. Ce qui suggère que cette souche de BSP peut augmenter dans le lombricompost pendant 25 jours. Par contre, celui des Rhizobiums peuvent survivre dans le lombricompost jusqu'à 50 jours.

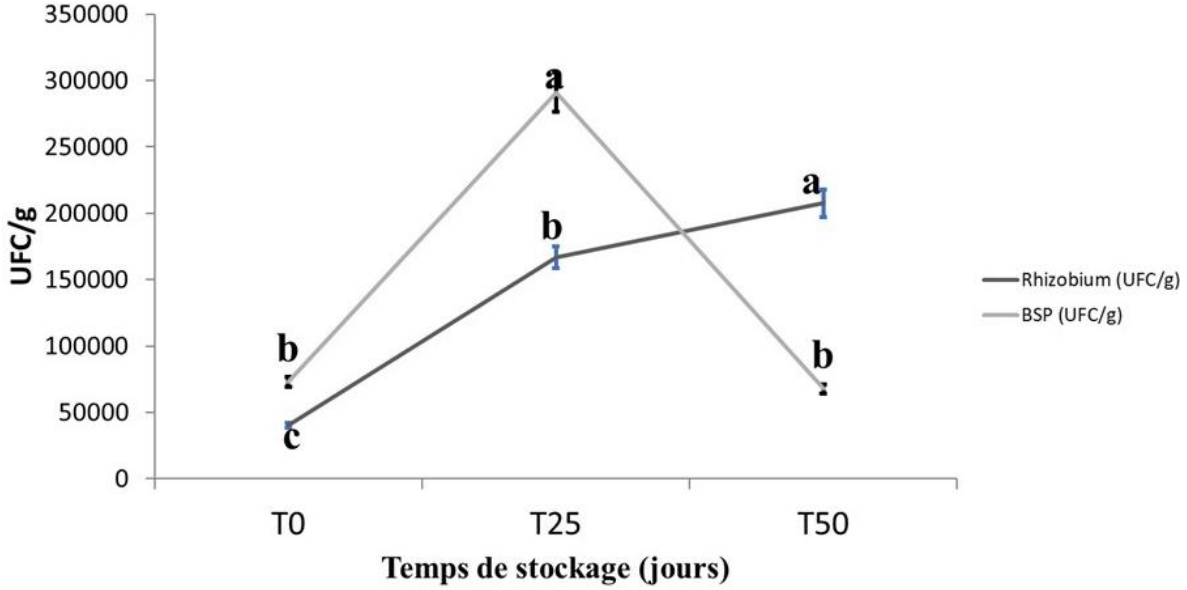

Figure 1 : Cinétique d'évolution des bactéries dans le lombricompost.
Les temps suivis d'une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène, au seuil de probabilité 0,05, selon le test de Newman-Keuls.

2.2. Effets de l'inoculation microbienne sur la qualité chimique des lombricomposts

2.2.1 Effets de l'inoculation par *Rhizobium*

La figure 2 montre l'évolution de la composition chimique dans le lombricompost inoculé par le Rhizobium. Selon la figure 2a, on constate une augmentation significative des teneurs du potassium (K) et du phosphore (P) au bout du 50e jour, alors que la teneur d'azote (N) subit une variation significative de T0 à T25 et de T25 à T50. En plus, le taux de carbone augmente significativement de T0 à T50. Enfin, le rapport C/N est significativement élevé à T25 (12,91 %) contrairement à T0 (11,28 %) et T50 (11,96 %) (Figure 2 b). Ceci montre que le nombre élevé de bactéries Rhizobium à T50 n'impacte pas positivement le rapport C/N.

ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

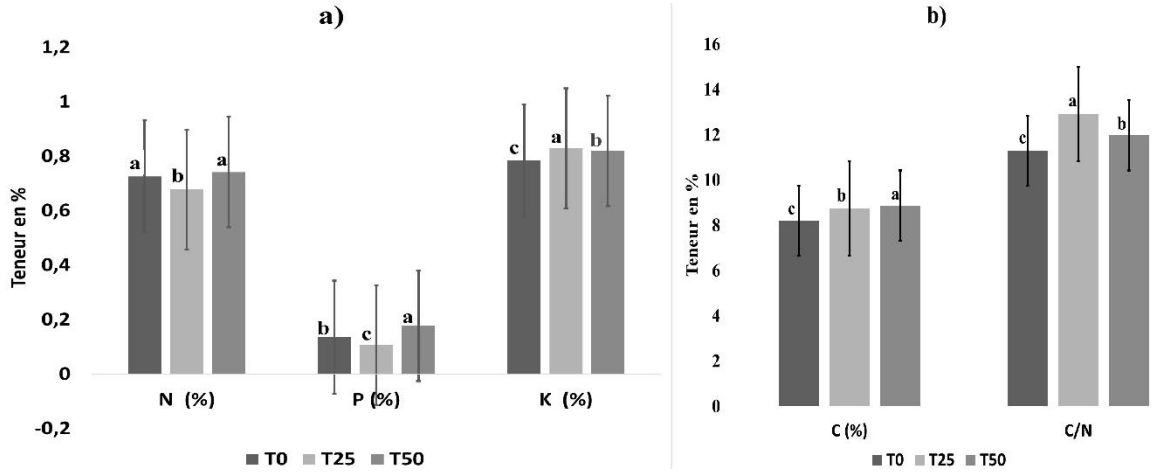

Figure 2 : Composition chimique du lombricompost inoculé par Rhizobium
Les histogrammes suivis d'une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène, au seuil de probabilité 0,05, selon le test de Newman-Keuls.

2.2.2 Effets de l'inoculation par BSP 222

La figure 3 montre l'évolution de la composition chimique dans le lombricompost inoculé par BSP. Selon la figure 3 a, on constate une diminution significative des teneurs de l'azote (N) à T25, suivi d'une augmentation à T50. Quant à la teneur du phosphore (P), on constate une augmentation significative du phosphore (P) au bout du 25e jour, alors que les teneurs sont restées significativement identiques à T0 et T50. Quant au potassium (K), les teneurs diminuent et restent significativement identiques à T25 et T50. Pour la figure 3 b, le taux de carbone reste significativement identique à T0, T25 et T50. Enfin, le rapport C/N est significativement élevé à T25 (12,77 %) et diminue à T50 (11,77 %) par rapport à T0 (12,31 %) (Figure 3 b). Ceci montre qu'après inoculation avec les BSP, le 25e jour présente la valeur agronomique la plus élevée.

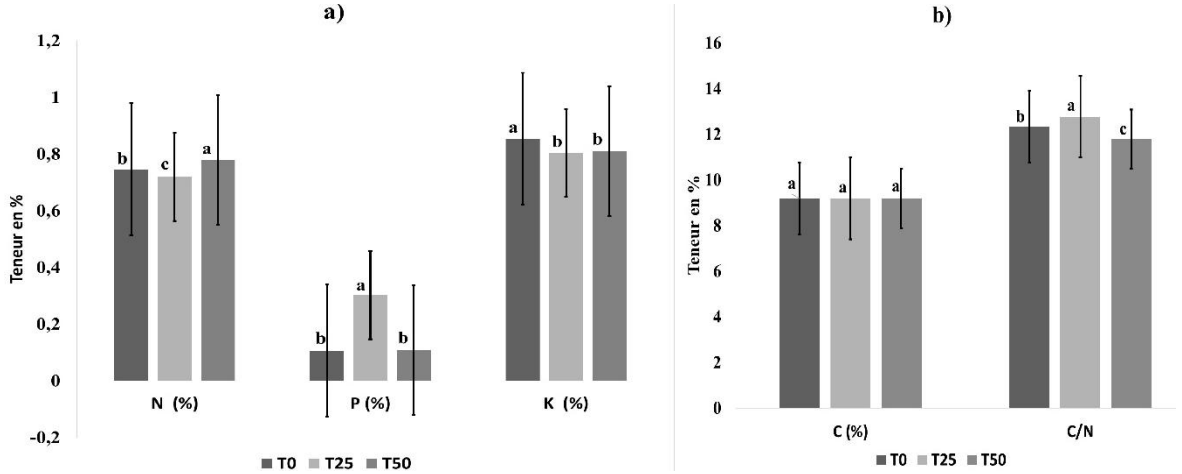

Figure 3 : Composition chimique du lombricompost inoculé par BSP.
Les histogrammes suivis d'une même lettre constituent un groupe statistiquement homogène, au seuil de probabilité 0,05, selon le test de Newman-Keuls.

ISSN : 2428-8500 vol. 9, n°2, 1, 2025
DOI : http://dx.doi.org/10.52497/jitipee.v9i2.376

Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'améliorer la qualité des lombricomposts par l'introduction de l'inoculum microbien. Les résultats obtenus ont clairement mis en évidence que, les BSP et les Rhizobiums sont capables de survivre dans le lombricompost, mais leurs dynamiques de croissance sont différentes.

Les Rhizobiums semblent avoir une plus grande résilience et une capacité de survie prolongée dans le lombricompost, puisqu'aucune phase de déclin n'est observée au 50e jour. Cette augmentation de la densité des rhizobia dans le lombricompost serait due au fait qu'il renferme des éléments minéraux essentiels aux développements de ces bactéries tels que l'azote et le phosphore comme l'ont démontré Tounsi *et al.* [28]. La capacité des souches de Rhizobium à se multiplier dans le lombricompost a aussi été démontrée par Kalra *et al*. [29]. La survie de ces souches de Rhizobiums serait aussi due à la température d'incubation du lombricompost qui était de 30 °C, qui joue un rôle majeur dans leurs développements. De façon similaire, Temprano *et al*. [21] ont montré que la température optimale de stockage de ces bactéries est proche de 28 °C. En ce qui concerne les bactéries solubilisatrices de phosphate (BSP) contenues dans le lombricompost inoculé, l'augmentation de la densité de ces bactéries jusqu'au 25e jour a déjà été démontrée par Khare *et al*. [30]. En effet leurs travaux de recherche avaient montré la capacité d'une souche de BSP à se multiplier dans le lombricompost durant les 30 premiers jours de stockage. Cette survie des BSP durant ces 25 premiers jours pourrait aussi s'expliquer par la qualité chimique des lombricompost avant l'inoculation, favorisant ainsi leurs multiplications [31]. La diminution de leurs densités après une phase de croissance est cohérente avec les résultats de Kumar et Singh [32] qui ont observé une même dynamique. Selon une étude faite par Sohaib *et al*. [33], sur la survie des souches des BSP dans des différents supports, la diminution de la population bactérienne pourrait s'expliquer par la diminution des nutriments dans le support. Ce qui justifie la diminution des bactéries dans cette étude.

Pour la composition chimique, les résultats ont été évalués au 25e et au 50e jour d'incubation (T25 et T50), que ce soit avec Rhizobium ou BSP. L'inoculation microbienne a permis l'amélioration de la teneur de certains éléments minéraux. L'augmentation de la teneur en azote (N) à la fin de l'expérimentation peut être due à la libération des substances azotées par les deux souches comme le suggèrent Lee et Lee [34]. Cette augmentation de la teneur en azote (N) à la fin de l'expérimentation a été rapportée par Kumar et Singh [32] avec l'inoculation des lombricomposts par des souches d'Azotobacter. Concernant la teneur en phosphore (P), l'inoculation avec BSP a permis une augmentation significative dès le 25e jour, ceci a été rapporté par Khare *et al*. [30] qui ont noté une augmentation de ces teneurs en phosphore après 30 jours d'inoculation avec BSP. Et selon, Rodriguez *et al*. [35], la diminution de cette teneur en phosphore (P) pourrait être expliquée par l'autoconsommation de cet élément par ces bactéries. À l'inverse, après l'inoculation de Rhizobiums, une augmentation a été observée à T50. Cette augmentation de la teneur en phosphore (P) à la fin de l'expérimentation a déjà été démontrée par Kumar et Singh [32] en utilisant des bactéries solubilisant le phosphore pendant 60 jours. Même si les différences statistiques entre les différents temps sur chaque paramètre chimique (N, P et K) analysé semblent être faibles, elles restent significatives sur le plan

méthodologique. Cependant, sur le terrain, même de petites variations dans la teneur en nutriments peuvent avoir un impact positif sur la fertilisation des sols. Ceci rejoint les résultats des études réalisées par Arancon *et al.* [36] sur l'utilisation du lombricompost sur des cultures de fraise qui ont trouvé un effet cumulatif même avec des variations faibles dans les teneurs en nutriments, notamment lors d'une application prolongée de lombricompost. De plus, selon Arancon *et al.* [37] même si les différences entre les teneurs en éléments chimiques sont faibles, la concentration totale en NPK dans le lombricompost à différents stades de maturation peut suffire à améliorer la qualité du sol et favoriser la croissance des plantes.

Conclusion

Cette étude visait essentiellement à améliorer la qualité du lombricompost par l'ajout d'inoculum microbien. Il a été observé que le rajout de l'inoculum de Rhizobium dans le lombricompost a fait augmenter la densité de ces microorganismes jusqu'au 50e jour d'incubation ainsi que la teneur en phosphore (P), en potassium (K) et en carbone (C). En revanche, le rajout d'inoculum de BSP dans le lombricompost a fait augmenter la densité de ces microorganismes jusqu'au 25e jour d'incubation ainsi que la teneur en phosphore (P) et le rapport C/N. Cette étude a permis de démontrer d'une part, la survie des bactéries après l'introduction des suspensions bactériennes dans le lombricompost et, d'autre part, une amélioration de la qualité du produit fini. Ce dernier devient alors plus riche en éléments nutritifs essentiels pour les plantes, et donc plus bénéfique pour une utilisation en agriculture.
De ce fait, l'utilisation de ce type de fertilisant dans le cadre des cultures maraîchères pourrait garantir des résultats optimaux en matière de rendement, de développement et d'état sanitaire des plantes. Cependant, afin de valoriser au mieux l'utilisation de ces résultats, il serait intéressant de tenir compte de certains paramètres, à savoir :

(i) les effets de l'inoculation de ces microorganismes dans le lombricompost non stérile,
(ii) les effets de l'utilisation de ces lombricomposts inoculés sur des cultures,
(iii) et l'identification moléculaire des souches bactériennes.

Ces paramètres et plus particulièrement, l'identification moléculaire des souches de Rhizobium ciblées, seraient d'une importance capitale pour la sélection du meilleur couple bactéries/lombricompost destiné à la conception d'un inoculum.

Remerciements

Nos vifs remerciements et reconnaissances s'adressent à tous les personnels et chercheurs du LME du CNRE (Laboratoire de Microbiologie de l'Environnement du Centre National de Recherche sur l'Environnement) et à ceux qui ont participé activement à la réalisation de ce travail. Mes remerciements vont également à l'endroit de Dr MAHAMADOU Kamagaté, Enseignant-chercheur à l'Université Polytechnique de Man (Côte d'Ivoire) pour son aide précieuse dans la rédaction de cet article. Enfin, et non des moindres, nous tenons à remercier chaleureusement le programme international organisé par l'Académie Internationale de la Francophonie Scientifique de l'AUF pour son soutien et les opportunités qu'il a offertes à cette collaboration.

Références

[1] Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). *Global food demand and the sustainable intensification of agriculture.* Proceedings of the national academy of sciences, 108(50), 20260-20264. DOI:10.1073/pnas.1116437108

[2] Moya, B., Parker, A., Sakrabani, R., & Mesa, B. (2019). *Evaluating the efficacy of fertilisers derived from human excreta in agriculture and their perception in Antananarivo, Madagascar*. Waste and Biomass Valorization, 10, 941-952. DOI:10.1007/s12649-017-0113-9

[3] Ranaivoarisoa, H., Ravoninjiva, S., Ramananarivo, S., & Ramananarivo, R. (2016). *Vermiculture for Sustainable Organic Agriculture in Madagascar*. Horticulturae, 3(1), 2. DOI:10.3390/horticulturae3010002

[4] NEPAD-CAADP (2015). *The Abuja declaration on fertilizers for an African Green Revolution: status of implementation at regional and national levels*. http://nepadcaadp.net/pdf/The%20Abuja%20Declaration%20on%20Fertilizers%20for%20an%20African%20Green%20Revolution.pdf

[5] Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K., Oukarroum, A., & Barakat, A. (2019). *Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, *114*, 109287. DOI:10.1016/j.rser.2019.109287

[6] Joncoux, S. (2013). *Les" produits résiduaires organiques" pour une intensification écologique de l'agriculture : ressources, déchets ou produits ? : sociologie des formats de valorisation agricole*, Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II. https://theses.hal.science/tel-00989973/

[7] Gourdon, R. (2010). *Impact de nouveaux modes de gestion sur l'accélération de la dégradation de déchets ménagers : approche multiparamétrique et multi-échelle*, thèse de doctorat, Université de Provence. https://cdn.unilim.fr/files/theses-doctorat/2010LIMO4077.pdf

[8] Goret, M. (2019). *Étude des interactions entre le climat urbain et le CO2 : modélisation des flux de CO2 et application à l'échelle d'une ville*, thèse de doctorat, Université de Toulouse. https://theses.hal.science/tel-04169779/

[9] Rajiv K, S., Sunita, A., Krunal, C., Vinod, C., & Brijal Kiranbhai, S. (2010). *Vermiculture technology: reviving the dreams of Sir Charles Darwin for scientific use of earthworms in sustainable development programs*. Technology and Investment, 1(3), 155-172. DOI: 10.4236/ti.2010.13019

[10] Suthar, S., & Singh, S. (2008). *Vermicomposting of domestic waste by using two epigeic earthworms (Perionyx excavatus and Perionyx sansibaricus)*. International Journal of Environmental Science & Technology, 5, 99-106. DOI:10.1007/BF03326002

[11] Kuppuraj Rajasekar, K. R., Thilagavathy Daniel, T. D., & Natchimuthu Karmegam, N. K. (2012) *Microbial enrichment of vermicompost*. International Scholarly Research Notices, 2012(1), 946079.
DOI:10.5402/2012/946079

[12] Sinha, R. K., Herat, S., Agarwal, S., Asadi, R., & Carretero, E. (2002). *Vermiculture and waste management: study of action of earthworms Elsinia foetida, Eudrilus euginae and Perionyx excavatus on biodegradation of some community wastes in India and Australia*. Environmentalist, 22, 261-268.
DOI:10.1023/A:1016583929723

[13] Malusa E., Sas-Paszt L., Ciesielska J. 2012. *Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers*. Sci. World J. 12 p DOI:10.1100/2012/491206
Arora N. K., Khare E., Naraian R., Maheshwari D. K. 2008. *Sawdust as a superior carrier for production of multipurpose bioinoculant using plant growth promoting rhizobial and pseudomonad strains and their impact on productivity of Trifolium repense*. Curr. Sci. 95 (1) : pp 90-94.
https://www.jstor.org/stable/24103283

[14] Manantsoa F. F., Baohanta R. H., Rabendalana R. P., Andriambololona N. S., Ratsizafy Irinah, Ramanankierana H. (2023). *Optimisation de la composition du substrat pour une meilleure qualité du lombricompost*. 40e anniversaire de la FSTE, Université de Mahajanga. Article soumis pour publication.
Ndegwa, P. M., & Thompson, S. A. (2001). *Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids*. Bioresource technology, *76*(2), 107-112. DOI:10.1016/S0960-8524(00)00104-8

[15] Jadhav, R. N. (2013). *Isolation of rhizobia from soybean cultivated in Latur area and study of its phosphate solubilization activity*. Bioscience discovery, 4(1), 100-103. https://jbsd.in/Volume%204%20No1%20Jan%2013/R%20N%20Jadhav%20100-103.pdf

[16] Tittabutr, P., Teamthisong, K., Buranabanyat, B., Teaumroong, N., & Boonkerd, N. (2012). *Gamma irradiation and autoclave sterilization peat and compost as the carrier for rhizobial inoculant production*. J. Agric. Sci. 4(12) : pp 59-67.
DOI:10.5539/jas.v4n12p59

[17] Jordan, D. C. (1982). *Transfer of Rhizobium japonicum Buchanan 1980 to Bradyrhizobium gen. nov., a genus of slow-growing, root nodule bacteria from leguminous plants*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, *32*(1), 136-139. DOI:10.1099/00207713-32-1-136

[18] Rao, H. C., Sreenivasa, M. N., Hebsur, N. S., Geetha Shirnalli, G. S., & Babalad, H. B. (2012). *Influence of microbial enrichment on microbial population and nutrient status of organic manures*. (2012): 545-547.
http://pub.uasd.edu/ojs/index.php/kjas/article/viewFile/2768/2560

[19] Temprano, F., Albareda, M., Camacho, M., Daza, A., Santamaria, C., & Rodríguez-Navarro, N. D. (2002). *Survival of several Rhizobium/Bradyrhizobium strains on different inoculant formulations and inoculated seeds*. International Microbiology, 5(2), 81-86. DOI:10.1007/s10123-002-0067-y

[20] Campello, F. (1983). *Tables pour le dénombrement des micro-organismes après culture* (milieux solides). Extension à la recherche. https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4580/

[21] Mouria, B., Ouazzani-Touhami, A., & Douira, A. (2013). *Isolement et identification de la mycoflore du compost des déchets urbains solides*. Nature & Technology, (9), 13. https://www.vitaminedz.com/articlesfiche/7258/7258505.pdf

[22] Mylavarapu, R., Sikora, F. J., & Moore, K. P. (2014). *Walkley-Black Method*. Soil test methods from the Southeastern United States, *158*. http://aesl.ces.uga.edu/sera6/MethodsManualFinalSERA6.pdf

[23] Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). *Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils*. Soil science, *59*(1), 39-46. DOI:10.1097/00010694-194501000-00006

[24] Crooke, W. M., & Simpson, W. E. (1971). *Determination of ammonium in Kjeldahl digests of crops by an automated procedure.* Journal of the Science of Food and Agriculture, *22*(1), 9-10. DOI:10.1002/jsfa.2740220104

[25] Sanchez, P. A., Palm, C. A., & Buol, S. W. (2003). *Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics*. Geoderma, 114(3-4), 157-185. DOI:10.1016/S0016-7061(03)00040-5

[26] Tounsi S.H., Dhane S.F., Hammami Z., Hamdi K., Chaabouni A., Bettaieb T., Jeddi F.B. 2015. *Effet de la nature et de la stérilisation des supports sur la viabilité et l'activité symbiotique de Rhizobium sullae*. J. New Sci. 19(9) : pp 766-772. https://www.researchgate.net/publication/357351719_Effet_de_la_nature_et_de_la_sterilisation_des_supports_sur_la_viabilite_et_l%27activite_symbiotique_de_Rhizobium_sullae

[27] Kalra, A., Chandra, M., Awasthi, A., Singh, A. K., & Khanuja, S. P. S. (2010). *Natural compounds enhancing growth and survival of rhizobial inoculants in vermicompost-based formulations*. Biology and Fertility of Soils, *46*, 521-524. DOI:10.1007/s00374-010-0443-2

[28] Khare, N., Pathak, D. V., Sangwan, S., & Chawla, N. (2014). *Effect of microbial enrichment on microbial population and nutritional status of vermicompost*. Res. Environ. Life Sci, *7*(3), 153-156. https://www.researchgate.net/publication/323607268_Effect_of_microbial_enrichment_on_microbial_population_and_nutritional_status_of_vermicompost

[29] Shahzad, S., Khan, M. Y., Zahir, Z. A., Asghar, H. N., & Chaudhry, U. K. (2017). *Comparative effectiveness of different carriers to improve the efficacy of bacterial consortium for enhancing wheat production under salt affected field conditions.* Pak. J. Bot, 49(4), 1523-1530. https://www.researchgate.net/publication/319037099_Comparative_effectiveness_of_different_carriers_to_improve_the_efficacy_of_bacterial_consortium_for_enhancing_wheat_production_under_salt_affected_field_conditions?_sg=DF6NieFzRk4BC5warsOfKIbqAos_evSp7dVjfdjSV_m6F4l4rQbP65GTSEwwkiLnWGOUr4jZkyG0APg

[30] Kumar, V., & Singh, K. P. (2001). *Enriching vermicompost by nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria*. Bioresource Technology, *76*(2), 173-175. DOI:10.1016/S0960-8524(00)00061-4

[31] Sohaib, M., Zahir, Z. A., Khan, M. Y., Ans, M., Asghar, H. N., Yasin, S., & Al-Barakah, F. N. (2020). *Comparative evaluation of different carrier-based multi-strain bacterial formulations to mitigate the salt stress in wheat*. Saudi Journal of Biological Sciences, 27(3), 777-787. DOI:10.1016/j.sjbs.2019.12.034

[32] Lee, H., & Lee, D. G. (2019). *Programmed cell death in bacterial community: Mechanisms of action, causes and consequences*. Journal of Microbiology and Biotechnology, *29*(7), 1014-1021. DOI:10.4014/jmb.1904.04017

[33] Rodriguez, H., Gonzalez, T., Goire, I., & Bashan, Y. (2004). *Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium Azospirillum spp*. Naturwissenschaften, 91, 552-555. DOI:10.1007/s00114-004-0566-0

[34] Arancon, N. Q., Edwards, C. A., & Bierman, P. (2006*). Influences of vermicomposts on field strawberries: Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties*. Bioresource technology, 97(6), 831-840. DOI:10.1016/j.biortech.2005.04.016

[35] Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Welch, C., & Metzger, J. D. (2004). *Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields.* Bioresource technology, *93*(2), 145-153. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.10.014