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

Effets directs et résiduels d’un tri-compost à base de paille de riz, fumier animal et source azotée altérnative (Tithonia Diversifolia ou urine de lapin) sur la production d’amarante

Bikorimana, Léonidas; Sous la Direction de : Prof. Salvator Kaboneka; Dr. Daniel Rucakumugufi

2026-03
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2450

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

EFFETS DIRECTS ET RESIDUELS D'UN TRI-COMPOST A BASE DE PAILLE DE RIZ, FUMIER ANIMAL ET SOURCE AZOTEE ALTERNATIVE (*TITHONIA DIVERSIFOLIA* OU URINE DE LAPIN) SUR LA PRODUCTION D'AMARANTE

Par

BIKORIMANA Léonidas

Mémoire

Présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Option : Génie de l'Environnement

Sous la Direction de :

Prof. Salvator KABONEKA (Directeur)

Dr. Daniel RUCAKUMUGUFI (Co-directeur)

BUJUMBURA, MARS 2026

MEMBRES DU JURY

Président	: Prof. Séverin NIJIMBERE
Secrétaire	**: Dr Ir. Soter NDIHO KUBWAYO**
Directeur	: Prof. Salvator KABONEKA
Co-directeur	: Dr Daniel RUCAKUMUGUFI

DEDICACE

A Dieu tout Puissant;

A mes chers parents

A mes frères

A mes oncles et tantes

A mes cousins et cousines

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce mémoire

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de mémoire de Master, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.

Mes sincères remerciements s'adressent en premier lieu à Prof. Salvator KABONEKA, Directeur de ce mémoire, ainsi qu'à Monsieur Dr. Daniel RUCAKUMUGUFI, Co-directeur, pour leur encadrement scientifique, leurs conseils avisés, leur disponibilité et leur rigueur intellectuelle qui ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

J'exprime également ma reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Leurs observations, critiques constructives et suggestions permettent d'enrichir et d'améliorer ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement la Coopérative d'Excellence pour les Jeunes Entrepreneurs du Burundi (COEJEBU) pour l'appui matériel et financier apporté à la réalisation de ce travail. Ce soutien a été déterminant pour la conduite des activités de recherche et la réussite de ce mémoire.

Ma profonde gratitude va également à mes camarades de classe, pour l'esprit de solidarité, de collaboration et de partage qui a marqué notre parcours académique. J'adresse aussi mes sincères remerciements à mes chers parents, frères et sœurs, oncles et tantes, cousins et cousines pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et les sacrifices consentis tout au long de ma formation.

Je remercie sincèrement les enseignants de la Faculté d'Agronomie et de Bio ingénierie (FABI), ceux des écoles primaires et secondaires, qui ont contribué à ma formation intellectuelle et personnelle. Une mention particulière est adressée aux professeurs du Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, pour la qualité de leur enseignement et leur encadrement scientifique.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tout le personnel du laboratoire de Chimie de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi pour leur disponibilité, leur professionnalisme et la bonne collaboration lors de la réalisation des analyses ayant servi à ce travail.

À tous ceux et à toutes celles qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas été cités nommément, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

La baisse de la fertilité des sols constitue une contrainte majeure à la production agricole durable dans les régions tropicales, notamment en Afrique subsaharienne. Dans ce contexte, la valorisation des amendements organiques locaux représente une alternative durable aux engrais minéraux. La présente étude vise à évaluer les effets directs et résiduels d'un tri-compost à base de paille de riz et de fumures animales, enrichis soit par la biomasse de *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray, soit par l'urine de lapin sur la production de l'amarante (*Amaranthus spp.*). L'expérimentation a été conduite sous serre à la Faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, selon un dispositif de randomisation totale comprenant huit traitements et trois répétitions. Une dose unique de 10 g de compost par pot (4 kg de sol) a été appliquée avant le semis. La culture de l'amarante a été suivie sur quatre cycles successifs (8 mois), permettant d'évaluer l'effet direct (première récolte) et l'effet résiduel (trois récoltes suivantes). Les paramètres étudiés incluent la biomasse aérienne, racinaire, totale et les ratios BR/BT et BR/BA, ainsi que le pH et la conductivité électrique (CE) du sol. Les données ont été analysées par ANOVA au seuil de 5 %. Les résultats montrent que le fumier de vache domine à la première récolte puis chute tandis que les tri-composts sont faibles au début de la récolte puis dominent à la fin des quatre récoltes. Le pH du sol a diminué de 9,06 pour le témoin à des valeurs comprises entre 8,18 et 8,63 pour les traitements tri-composts ($p < 0,001$), traduisant un effet tampon favorable. La conductivité électrique a également été significativement réduite, passant de 0,042 µS/cm pour le témoin à 0,022–0,030 µS/cm pour les composts enrichis ($P < 0,001$). Sur l'ensemble des quatre récoltes, la biomasse totale moyenne varie de 8,44±3,99 g pour le témoin à 13,95±2,23 g pour le fumier de vache et 13,02±1,63 g pour le tri-compost enrichi à paille de riz+ fiente de poule et l'urine de lapin. Les composts enrichis à la *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray présentent des biomasses totales comprises entre 11,02±3,31 g et 12,68±2,56 g. L'analyse de la biomasse racinaire révèle une différence significative entre traitements ($p = 0,0356$), avec des valeurs plus élevées pour les composts enrichis (1,63 à 1,75 g) comparativement au témoin (0,98 g). L'interaction traitement × récolte est significative pour la biomasse totale ($p = 0,00785$), indiquant une libération progressive des nutriments et une valeur résiduelle marquée des tri-composts aux dernières récoltes. D'une manière générale, les tri-composts enrichis au *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray ou à l'urine de lapin améliorent durablement la fertilité du sol et la production de l'amarante. L'urine de lapin présente un effet direct rapide comparable à celui de la *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray, confirmant son potentiel comme source locale d'azote dans les systèmes agricoles durables.

Mots-clés : Tri-compost, *Tithonia diversifolia*, urine de lapin, fertilité du sol, effet résiduel, amarante.

ABSTRACT

The progressive decline in soil fertility represents a major constraint to sustainable agricultural production in tropical regions, particularly in sub-Saharan Africa. In this context, the use of locally available organic amendments constitutes a viable alternative to mineral fertilizers. This study aimed to evaluate the direct and residual agronomic value of tri-composts based on rice straw and animal manures, enriched either with *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray biomass or with rabbit urine, on the production of amaranth (*Amaranthus spp.*). The experiment was conducted under greenhouse conditions at the Faculty of Agronomy and Bioengineering, University of Burundi, using a randomized complete block design with eight treatments and three replications. A single application of 10 g of compost per pot (4 kg of soil) was incorporated before sowing. Amaranth was grown over four successive cropping cycles (eight months) to assess both the direct effect (first harvest) and the residual effect (three subsequent harvests). Measured parameters included shoot biomass, root biomass, total biomass, soil pH, and electrical conductivity (EC). Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) at the 5% significance level. Results showed that all tri-compost treatments significantly improved soil chemical properties and amaranth biomass production compared to the unamended control. Soil pH decreased from 9.06 in the control treatment to values ranging between 8.18 and 8.63 in tri-compost treatments ($p < 0.001$), indicating a buffering effect of organic amendments. Electrical conductivity was also significantly reduced, from 0.042 µS cm^{-1} in the control to 0.022–0.030 µS cm^{-1} in enriched compost treatments ($P < 0.001$). Across the four harvests, mean total biomass increased from 8.44±3.99 g in the control to 13.95 ± 2.23 g with cattle manure and 13.02 ± 1.63 g with the rabbit-urine-enriched tri-compost (B603A). Tri-composts enriched with *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray produced total biomasses ranging from 11.02±3.31 g to 12.68±2.56 g. Root biomass differed significantly among treatments ($p = 0.0356$), with higher values recorded in enriched composts (1.63–1.75 g) compared to the control (0.98 g). The treatment × harvest interaction was significant for total biomass ($p = 0.00785$), indicating a gradual nutrient release and a strong residual effect of tri-composts during later harvests. In generally, tri-composts enriched with *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray or rabbit urine significantly enhance soil fertility and amaranth productivity. Rabbit urine showed a rapid direct effect comparable to *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray, confirming its potential as an effective local nitrogen source for sustainable tropical agriculture.

Keywords: Tri-compost, *Tithonia diversifolia*, rabbit urine, soil fertility, residual effect, amaranth.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS xi

AVANT-PROPOS xii

0. INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

0.1. Contexte générale et justification 1

0.2. Problématique 2

0.3. Questions de recherche 3

0.4. Hypothèse de la recherche 3

0.5. Objectif de l'étude 4

0.5.1. Objectif global 4

0.5.2. Objectifs spécifiques 4

0.5.3. Intérêt de l'étude 4

0.5.4. Structure du mémoire 4

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LES TRI COMPOSTS ET LA CULTURE D'AMARANTE 5

I.1. Généralités sur le tri-compost 5

I.1.1. Définition et rôle du compost 5

I.1.2. Concept du tri-compost et importance du ratio C/N 5

I.1.3. Technique de compostage, avantages et qualité 6

I.2. Généralités sur l'amarante 8

I.2.1. Description et importance nutritionnelle 8

I.2.2. Exigences culturales 9

I.3. Comparaison entre la *Tithonia diversifolia* et l'urine de lapin comme enrichisseurs 10

I.3.1. Sur le plan nutritif 10

I.3.2. Sur le plan agronomique 10

I.3.3. Sur le plan pratique 10

I.4. Importance de la matière organique 10

I.4.1. Définition de la matière organique et son importance 10

I.4.2. Dynamique de l'évolution de la matière organique 12

I.4.3. Effet de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol 12

I.4.4. Effet sur les propriétés physiques du sol 14

I.4.5. L'enfouissement de la matière organique n'est pas toujours bénéfique 15

I.4.6. Influence de la matière organique sur la physiologie des végétaux 15

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE 16

II.1. Localisation géographique du milieu d'étude 16

II.2. Méthodologie 16

II.2.1. Matériel d'étude 16

II.2.2. Dispositif expérimental 21

II.2.3 Semis des semences 22

II.2.4. Conduite de la culture 22

II.2.5. Cycle cultural et récolte 23

II.2.6. Séchage et conservation des échantillons 24

II.2.7. Mesure du pH et de la conductivité électrique du sol 24

II.2.8. Détermination de la biomasse foliaire et racinaire 25

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 27

III.1. Effet des traitements sur les propriétés physico-chimiques du sol 27

III.1.1. Influence des traitements sur le pH du sol 27

III.1.2. Influence des traitements sur la conductivité électrique (CE) du sol 29

III.2. Effet global des traitements sur la production de biomasse 31

III.3. Effet de l'interaction entre le traitement et la récolte 33

III.3.1. Effet de l'interaction sur la biomasse totale (BT) 33

III.3.2. Effet de l'interaction sur la biomasse aérienne (BA) 35

III.3.3. Effet de l'interaction sur la biomasse racinaire (BR) 36

III.3.4. Effet de l'interaction sur le ratio biomasse racinaire/biomasse totale (BR/BT) 38

III.3.5. Effet de l'interaction sur le ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne (BR/BA) 39

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 41

Conclusion 41

Recommandations 42

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 44

ANNEXES 51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition nutritionnelle des feuilles et graines d'amarante (pour 100 g de matieres sèche) 8
Tableau 2: Différents traitements appliqués 20
Tableau 3: Analyse de variance de l'effet des traitements sur le pH du sol 27
Tableau 4: Comparaison des moyennes du pH du sol selon le traitement 28
Tableau 5: Analyse de variance (ANOVA 1) de l'effet des traitements sur la Conductivité Électrique (CE) du sol 29
Tableau 6: Comparaison des moyennes de la CE (µS/cm) du sol selon le traitement 30
Tableau 7: Effet des traitements sur les biomasses et leurs rapports sur les 4 coupes 31
Tableau 8: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur les variables de biomasse 33
Tableau 9: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse totale (BT) 34
Tableau 10: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse aérienne 35
Tableau 11: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse racinaire 36
Tableau 12: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur le rapport BR/BT 38
Tableau 13: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur le rapport BR/BA 39

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Dispositif expérimental des essais effectués en culture sous serre..... 22
Figure 2. Arrosage des essais..... 23

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANOVA : Analyse de la variance

BA : Biomasse aérienne

BR : Biomasse racinaire

BR/BA : Ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne

BR/BT : Ratio biomasse racinaire / biomasse totale

BT : Biomasse totale

BV : Bouse de vache

CEC : Capacité d'Echange Cationique

CE : Conductivité électrique

COEJEBU : Coopérative d'Excellence pour les Jeunes Entrepreneurs du Burundi

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FABI : Faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie

FP : Fumier de porc

FPo : Fiente de poule

MO : Matière organique

pH : Potentiel hydrogène

PR : Paille de riz

UB : Université du Burundi

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de Master en Sciences et Gestion intégrée de l'Environnement, option Génie de l'environnement, à la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi. Il constitue l'aboutissement d'un travail académique visant à consolider les connaissances théoriques et méthodologiques acquises au cours de la formation, tout en apportant une contribution scientifique à la problématique de la gestion durable des ressources environnementales.

Ce travail s'inscrit dans un contexte marqué par la dégradation progressive des sols, la pression accrue sur les ressources naturelles et les défis liés à la sécurité alimentaire dans les régions tropicales. La gestion intégrée de l'environnement exige aujourd'hui des approches innovantes et durables permettant de concilier productivité agricole, protection des écosystèmes et valorisation des ressources locales. C'est dans cette perspective que cette étude s'est intéressée à l'évaluation de l'effet direct et résiduel d'un tri-compost issu de résidus agricoles et de sous-produits d'élevage, appliqués à la culture de l'amarante.

La réalisation de ce mémoire a nécessité une démarche scientifique rigoureuse, fondée sur l'expérimentation, l'analyse statistique et l'interprétation critique des résultats. Elle a également permis de développer des compétences pratiques en matière d'évaluation environnementale, de gestion de la fertilité des sols et de valorisation des déchets organiques, en cohérence avec les objectifs de la formation en Génie de l'environnement.

Ce travail est le fruit d'un effort personnel soutenu, mené dans le respect des principes d'éthique scientifique et d'intégrité académique. Il est formulé dans l'espoir qu'il puisse contribuer, à son échelle, à la promotion des pratiques agricoles durables et servir de référence pour des études ultérieures dans le domaine de la gestion intégrée de l'environnement.

0. INTRODUCTION GENERALE

0.1. Contexte générale et justification

La gestion durable des ressources naturelles représente un enjeu fondamental pour assurer la pérennité de l'agriculture face à la pression démographique mondiale (FAO, 2021). L'intensification des pratiques agricoles a permis d'accroître les rendements, mais elle a parallèlement entraîné une dégradation significative de la qualité des sols (Sanchez, 2019).

Cette détérioration se manifeste principalement par une diminution critique des taux de matière organique et un déséquilibre nutritionnel dans les terres arables (Lal, 2015). Dans les régions tropicales et notamment en Afrique subsaharienne, la faible fertilité inhérente des sols constitue le principal facteur limitant la productivité des cultures vivrières (Vanlauwe *et al*., 2003).

Le recours systématique aux engrais minéraux, bien qu'efficace à court terme, pose des défis économiques majeurs pour les petits exploitants et soulève des préoccupations environnementales liées au lessivage et à la pollution des eaux et sols (Smaling & Braun, 2005). Il est par conséquent devenu impératif de se tourner vers des stratégies agro écologiques qui privilégient la valorisation des ressources locales pour la restauration de la santé des sols (Altieri, 2017).

L'utilisation d'amendements organiques, tels que le compost, est reconnue comme une solution écologique pour améliorer simultanément les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols cultivés (Hossain, 2014). Le tri-compost, un processus impliquant l'association de trois sources distinctes de matière organique, représente une approche innovante visant à optimiser l'équilibre des nutriments (Nziguheba *et al*., 2000) .

Au niveau local, des sous-produits agricoles abondants comme la paille de riz et la fumure animale issue de l'élevage constituent des substrats de base prometteurs pour l'élaboration de ce tri-compost (Groot *et al*., 2018). Néanmoins, pour maximiser l'efficacité agronomique du produit final, l'enrichissement en éléments nutritifs spécifiques est une pratique recommandée (Palm *et al*., 2001).

Dans ce cadre, deux sources d'enrichissement se distinguent par leur potentiel: la biomasse de *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray et l'urine de lapin. Le *Tithonia diversifolia* est largement étudié pour sa richesse en azote, phosphore et potassium, permettant une amélioration rapide et substantielle de la fertilité (Jama *et al*., 2007). L'urine de lapin, quant à elle, offre une source d'azote hautement concentrée et facilement mobilisable, représentant une alternative non conventionnelle (Mugabe *et al*., 2019).

La culture de l'amarante (*Amaranthus spp.*) a été retenue comme culture indicatrice en raison de sa valeur nutritionnelle élevée, de sa croissance végétative courte et de son importance socio-économique dans les systèmes vivriers (Tsoho *et al*., 2015).

Ainsi, l'agriculture organique est basée sur l'amendement du sol par l'apport de matière organique. En plus de leur rôle de réservoir d'éléments nutritifs, celles-ci ont un rôle majeur de la fertilité physique des sols, de leur aération et de leur résistance à la dégradation et à l'érosion. De plus la matières organique est très importante dans de nombreux sols pauvres à dominance de kaolinite, la principale composante du complexe absorbant, c'est-à-dire une source des charges maintenant les cations (Kaboneka *et al*., 2021).

0.2. Problématique

Malgré l'évidence des bénéfices des amendements organiques enrichis, il existe un déficit de connaissances empiriques concernant la performance comparative entre les différentes méthodes d'enrichissement d'un tri-compost spécifique (Wang *et al*., 2020). Plus précisément, la littérature scientifique manque de données sur l'évaluation directe de l'effet agronomique et de la valeur résiduelle d'un tri-compost enrichi soit par le *Tithonia diversifolia*, soit par l'urine de lapin (Kouame *et al*., 2016).

Il est fondamental d'établir si l'enrichissement liquide par l'urine de lapin, plus facile à collecter, offre une valeur agronomique comparable ou supérieure à l'incorporation de la biomasse végétale de *Tithonia diversifolia* (Dendooven *et al*., 2012). Cette évaluation doit porter non seulement sur l'effet direct de l'amendement sur la biomasse d'amarante, mais aussi sur son impact résiduel à long terme sur la fertilité du sol pour garantir la durabilité des systèmes de culture successifs (Sall *et al*., 2013).

C'est dans cette optique que notre sujet intitulé « Effets directs et résiduels d'un tri-compost à base de paille de riz, fumier animal et source azotée alternative (*Tithonia diversifolia* ou urine de lapin) sur la production d'amarante »

0.3. Questions de recherche

La présente étude vise à répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la valeur agronomique directe (biomasse) du tri-compost enrichi, comparativement à un traitement témoin ou au fumier de vache, sur la culture d'amarante ?
2. Quel est l'effet résiduel de chaque variante du tri-compost enrichi sur les cycles de cultures suivantes ?

3. Il existe un tri-compost, parmi celui enrichi avec *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin qui est plus efficace que le fumier de vache en termes de production d'amarante ?

0.4. Hypothèse de la recherche

Afin de guider cette investigation, les hypothèses suivantes sont émises :

1. L'application du tri-compost enrichi en paille de riz, fumure animale et *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin améliore significativement la production d'amarante (H1).
2. Le tri-compost enrichi avec *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin a un effet résiduel positif sur les cycles de cultures suivantes (H2).
3. Au moins un tri-compost enrichi avec *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin est plus efficace que le fumier de vache pour la production d'amarante (H3).

0.5. Objectif de l'étude

0.5.1. Objectif global

L'objectif global de cette étude est d'évaluer l'effet direct et résiduel du tri-compost à base de paille de riz, fumure animale et *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin sur la production d'amarante.

0.5.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont de :

- déterminer la valeur agronomique directe (biomasses) de chaque traitement,
- quantifier la valeur résiduelle du compost sur les cultures suivantes,
- comparer l'efficacité de deux variantes de compost (biomasse de *Tithonia diversifolia* ou urine de lapin).

0.5.3. Intérêt de l'étude

Les résultats attendus de cette recherche possèdent un triple intérêt (scientifique, agronomique et environnemental). Sur le plan scientifique, cette étude apportera des éléments de comparaison inédits et chiffrés sur la performance des deux enrichisseurs du compost, comblant ainsi une lacune bibliographique identifiée. Sur le plan agronomique, les conclusions fourniront aux agriculteurs des recommandations concrètes et optimisées pour la gestion de la fertilité des sols et l'amélioration des rendements en amarante. Enfin, d'un point de vue environnemental, ce travail promeut l'économie circulaire par la valorisation des déchets organiques et la réduction de la dépendance aux intrants chimiques, soutenant une agriculture plus résiliente et écologique.

0.5.4. Structure du mémoire

Le présent mémoire est articulé autour de trois chapitres principaux, qui s'ajoutent à l'introduction et à la conclusion générale. Le Chapitre I développe les généralités théoriques relatives au tri-compost, à ses composantes, à l'amarante, et aux concepts d'effet direct et résiduel. Le Chapitre II est consacré à la description détaillée du milieu d'étude ainsi qu'à la présentation des matériels et des méthodes d'expérimentation d'analyse aussi utilisés.

Le Chapitre III présente, analyse et discute les résultats obtenus à la lumière des objectifs fixés et des hypothèses formulées.

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LES TRI COMPOSTS ET LA CULTURE D'AMARANTE

I.1. Généralités sur le tri-compost

I.1.1. Définition et rôle du compost

Le compost est une matière organique stabilisée et hygiénisée, issue de la décomposition aérobie contrôlée de résidus organiques d'origines diverses (Hossain, 2014). Il est considéré comme un amendement essentiel pour l'amélioration durable des propriétés physico-chimiques du sol, en augmentant notamment sa capacité d'échange cationique (CEC), sa rétention en eau et sa stabilité structurale (Wang *et al*., 2020). L'utilisation du compostage s'inscrit dans l'approche de l'agro-écologie pour restaurer la qualité des sols dégradés, particulièrement dans les environnements tropicaux (Altieri, 2017)**.**

I.1.2. Concept du tri-compost et importance du ratio C/N

Le tri-compost, tel qu'envisagé dans cette étude, désigne un compost élaboré à partir de trois composantes principales :

- Matière carbonée (carbonée bulk): Fournissant le squelette du compost.
- Fumure animale (azotée booster): Source d'azote, de micro-organismes, et d'éléments minéraux pour activer la phase thermophile.
- Bio-enrichisseur spécifique: Intrant de haute valeur nutritive pour booster le produit final.

Cette combinaison vise à maîtriser le ratio carbone/azote (C/N), un facteur critique pour la qualité du compost. Un ratio initial optimal se situe généralement entre 25/1 et 30/1 pour assurer une décomposition efficace et rapide sans immobilisation excessive de l'azote par les micro-organismes (Hossain, 2014).

I.1.3. Technique de compostage, avantages et qualité

I.1.3.1. Technique de compostage

Le compostage est un processus biochimique qui s'articule autour de trois phases principales, fortement dépendantes de la gestion du tas (aération, humidité, mélange) :

- Phase Mésophile (ou initiale) : Elle dure quelques jours, les micro-organismes mésophiles décomposent les sucres et acides aminés solubles, provoquant une première élévation de la température.
- Phase Thermophile (ou de chauffage) : La température monte rapidement (55°C à 65°C, voire plus), ce qui est essentiel pour l'hygiénisation du compost donc élimination des graines de mauvaises herbes et des pathogènes. Cette phase est maintenue par l'activité des micro-organismes thermophiles et est cruciale pour la stabilisation (Hossain, 2014)
- Phase de Maturation (ou de refroidissement) : La température redescend progressivement à l'ambiante. La matière organique est alors transformée en humus stable (humification), conférant au compost ses qualités d'amendement de sol (Vanlauwe *et al*., 2003).

I.1.3.2. Avantages du compost

L'utilisation des amendements organiques, notamment le compost, présente des avantages multiples d'ordre agronomique, écologique et économique. Sur le plan agronomique, l'apport de compost contribue significativement à l'amélioration de la structure du sol par le renforcement de l'agrégation des particules, ce qui favorise une meilleure porosité et une aération optimale. Il entraîne également une augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC), permettant une meilleure rétention et disponibilité des nutriments pour les plantes. Par ailleurs, le compost constitue une source progressive de nutriments majeurs tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), ainsi que d'oligo-éléments (microéléments) essentiels sous des formes chélatées, réduisant ainsi les pertes par lessivage et améliorant l'efficacité de la nutrition minérale des cultures (Wang *et al*., 2020).

D'un point de vue écologique, le compostage des résidus agricoles et organiques participe à la réduction des déchets tout en favorisant leur recyclage au sein des agroécosystèmes. L'incorporation de matière organique stable dans le sol contribue à la séquestration du carbone organique, jouant ainsi un rôle important dans l'atténuation des changements climatiques.

En outre, l'amélioration de la structure du sol induite par le compost permet de réduire l'érosion hydrique et la perte des nutriments par ruissellement et lessivage, contribuant à la préservation de la qualité des sols et des ressources en eau (Altieri, 2017).

Sur le plan économique, l'utilisation du compost permet de diminuer la dépendance des exploitations agricoles aux engrais minéraux de synthèse, entraînant une réduction notable des coûts de production. Elle favorise également la valorisation des sous-produits agricoles et des déchets organiques disponibles localement, renforçant ainsi l'autonomie des exploitations. À long terme, ces pratiques contribuent à l'amélioration de la résilience et de la durabilité des systèmes de production agricole, en particulier dans les contextes à faibles intrants, comme ceux rencontrés en Afrique subsaharienne (Vanlauwe *et al*., 2003).

I.1.3.3. Qualité du compost

La qualité d'un compost est jugée sur deux aspects: sa maturité et sa valeur fertilisante (Hossain, 2014).

- Maturité (ou stabilité) : Un compost est considéré comme mûr lorsqu'il ne dégage plus de chaleur, a une odeur de terre fraîche et présente un C/N final stable et bas (typiquement inférieur à 20/1). Un compost non mûr peut être phytotoxique, car sa décomposition finale dans le sol peut consommer l'azote disponible pour les plantes (effet faim d'azote).
- Valeur agronomique: Elle est mesurée par sa concentration en éléments nutritifs (N, P, K) et par sa teneur en matière organique stable. Le tri-compost, grâce à l'enrichissement par des intrants riches comme Tithonia ou l'urine de lapin, vise spécifiquement à maximiser cette valeur (Nziguheba *et al*., 2000).

Chimiquement, un compost de qualité agronomique est caractérisé par un intervalle de pH assez large,de 5,5-8,5 (Kong *et al*., 2024).

I.2. Généralités sur l'amarante

I.2.1. Description et importance nutritionnelle

L'amarante est une plante potagère annuelle, prisée pour ses feuilles comestibles et sa rusticité. Elle est un pilier des systèmes vivriers en régions tropicales. Sur le plan nutritionnel (Tableau 1), elle est reconnue comme un « super aliment » en raison de sa richesse exceptionnelle en protéines de haute qualité, vitamines, et minéraux (fer, calcium, magnésium), contribuant fortement à la lutte contre la malnutrition (Tsoho *et al*., 2015). La consommation régulière de l'amarante combat l'anémie du fait de sa richesse en fer, réduit les risques cardiovasculaires grâce sa richesse en phytostérols, lutte contre le cancer, les diarrhées et les hémorragies, améliore la vision, diminue le taux de sucre dans le sang et de diabète (Agré *et al*., 2016). Le tableau ci-dessous montre la composition nutritionnelle des feuilles et graines d'amarante.

Tableau 1: Composition nutritionnelle des feuilles et graines d'amarante (pour 100 g de matieres sèche)

Composition	Feuilles	Graines
Valeur énergétique (kcal)	26,5	365
Eau (g)	91,49	11,1
Protéines (g)	2,11	15,8
Lipides (g)	0,18	8,81
Glucides (g)	4,11	56,8
Sel (mg)	0,02	
Fer (mg)	2,26	308
Calcium (mg)	2,09	214
Magnésium (mg)	55	3,0
Sodium (mg)	21	26
Potassium (mg)	641	484
Phosphore (mg)	72	582
Zinc (mg)	0,88	3,7
Cuivre (mg)	0,16	9,0

Manganèse (mg)	0,86	308
Composition	Feuilles	Graines
Nickel (mg)		0,16
Sélénium (mg)	0,9	
B-corotène (µg)	1662	
Vitamine C (µg)	41,1	
Amidon (%)		55,1
Omega-3 (mg)		81
Omega-6 (mg)		4031
Omega-9 (mg)		2143
Cendres totals (mg)		3,25
Sucre (g)		1,47
Vitamine B1 (mg)	0,02	0,08
Vitamine B2 (mg)	0,13	0,19
Vitamine B3 (mg)	0,56	1,2
Vitamine B5 (mg)	0,06	
Vitamine B6 (mg)	0,18	
Acides amine (g)		19,71
Acides gras monosaturés (g)	0.04	8,39
Acides gras polysaturés (g)	0,08	
Acides oléiques (g)	0,04	
Acides linoléiques (g)	0,08	

Source : (Agre *et al*., 2016)

I.2.2. Exigences culturales

L'amarante est bien adaptée aux climats chauds et est relativement intolérante à la sécheresse. Cependant, pour atteindre un rendement optimal en termes de biomasse feuillée, elle est particulièrement exigeante en fertilité du sol, et nécessite des apports importants en matière organique et en azote.

Des études confirment que l'application de compost améliore significativement sa croissance et son rendement, en fournissant les conditions pédologiques idéales (Tsoho *et al*., 2015).

I.3. Comparaison entre la *Tithonia diversifolia* et l'urine de lapin comme enrichisseurs

I.3.1. Sur le plan nutritif

Tithonia diversifolia est un apport massif d'Azote (N) et surtout de Phosphore (P), un élément souvent limitant en agriculture tropicale. L'urine de lapin est quant à elle majoritairement concentrée en Azote (N) et en Potassium (K). Le choix entre les deux intrants influence directement le profil nutritionnel final du tri-compost, un tri-compost enrichi au *Tithonia* ayant un potentiel à long terme plus élevé pour la gestion du phosphore (Nziguheba *et al*., 2000).

I.3.2. Sur le plan agronomique

Tithonia diversfolia améliore la structure physique du compost en apportant de la matière ligneuse, favorisant une meilleure porosité et une activité microbienne plus diversifiée. L'urine de lapin, étant liquide et riche en urée, assure une minéralisation et une mise à disposition des nutriments plus rapides, ce qui pourrait induire un effet direct plus prononcé, notamment sur la croissance végétative de l'amarante, très demandeuse en N (Mugabe *et al*., 2019).

I.3.3. Sur le plan pratique

L'utilisation du *Tithonia* requiert la récolte et le transport de grandes quantités de biomasse, impliquant un travail physique important. L'urine de lapin, bien que facile à collecter sur place (élevage de lapins), demande des précautions de manipulation et de stockage pour éviter les pertes d'azote par volatilisation (Dendooven *et al*., 2012).

I.4. Importance de la matière organique

I.4.1. Définition de la matière organique et son importance

La matière organique du sol désigne l'ensemble des composés carbonés issus de la décomposition des résidus végétaux, animaux et microbiens présents dans le sol (Stevenson, 1994). Elle comprend les fractions vivantes (microorganismes), mortes (résidus) et stabilisées (humus) qui jouent un rôle fondamental dans la fertilité du sol (Brady & Weil, 2017)

La qualité de la matière organique influence donc directement la diversité, l'abondance et l'intensité de l'activité de la flore et de la faune du sol. Cette activité affecte directement sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Alvarez *et al*., 1998).

La matière organique du sol (principalement présente sous formes de substances humiques), est caractérisée par une capacité d'échange très importante (400 à 800 cmole (+) kg-1), due à la présence de groupements carboxyles fonctionnels et de phénols. Elle est donc un réservoir réel ou potentiel (suivant le taux de saturation) de cations nutritifs. La matière organique est capable de fixer et d'inhiber des composés (pesticides, xénobiotiques) ou des traces d'éléments minéraux (Al, Fe, Cu...) en formant des chélates (Robert, 1996).

Certaines contraintes d'ordre physique, chimique et biologique peuvent entrainer des processus de dégradations des sols. Ces contraintes peuvent nuire à la production agricole ou à l'environnement global (Robert., 1996).

Au point de vue :

- Agronomique, la mise en culture des sols induit une chute de la teneur en carbone et matière organique (MO). La diminution du carbone et de la MO dans le sol est la conséquence soit de l'érosion avec exportation des agrégats, soit du travail du sol conduisent à la minéralisation (Balesdent, 2005). Il y a donc diminution de la fertilité chimique et une dégradation physique (taux d'agrégation, stabilité structurale, rétention en eau, perméabilité) et donc une augmentation de la compactation, des risques d'érosion, et de la sensibilité à la battance (Taboada *et al*., 1998)
- Environnemental, la matière organique du sol augmente les propriétés modératrices du sol. Ainsi, elle emmagasine ou même séquestre le carbone à partir du CO_2 (gaz à effet de serre) . elle augmente le temps de conservation des réserves d'eau du sol et diminue donc les besoins d'irrigation. Elle limite le ruissellement et donc diminue les risques d'inondation par l'écrêtement des crues. Elle limite le transfert des polluants par effet de stockage (Robert, 2002).
- Chimique, la minéralisation de la matière organique du sol libère des éléments fertilisants N et P qui sont associés au carbone dans les composés organiques. En agriculture extensive

(à faibles entrants), le recyclage des éléments nutritifs N, P et S, par la décomposition graduelle des résidus végétaux, est le principal facteur de durabilité (Mayumi *et al*., 2002).

I.4.2. Dynamique de l'évolution de la matière organique

La matière organique évolue par un ensemble de transformations biochimiques impliquant la fragmentation, la décomposition microbienne, l'humification et la minéralisation (Paul, 2007). La minéralisation correspond à la conversion des constituants organiques en éléments minéraux assimilables par les plantes tels que N, P et S (Coleman *et al*., 2018). Ce processus dépend de la température, de l'humidité, de la texture et de la qualité biochimique des résidus (Recous & Mary, 1990).

L'évolution de la matière organique s'inscrit donc dans un cycle dynamique où la matière fraîche se transforme progressivement en humus stable puis en nutriments minéraux disponibles (Brussaard *et al*., 2007)**.**

Schéma simplifié de la minéralisation de la matière organique :

Résidus organiques → Décomposition microbienne → Humification → Humus → Minéralisation → Nutriments assimilables ($N–NO_3^-$, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}) (Stevenson, 1994)

I.4.3. Effet de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol

La matière organique améliore les propriétés chimiques du sol en agissant sur plusieurs aspects essentiels. Elle régule le pH en jouant un rôle tampon, augmente la capacité d'échange cationique (CEC) et donc la rétention des nutriments, réduit la toxicité de l'aluminium dans les sols acides, et améliore la disponibilité du phosphore pour les plantes. Ainsi, elle constitue un élément clé de la fertilité chimique des sols.

a) pH

Le pH est défini comme l'inverse du logarithme de l'activité des ions H^+. Le potentiel d'hydrogène (pH) renseigne sur le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol (Schvarty et al., 2005). La mesure de l'acidité permet de quantifier la concentration des ions H^+ dans les solutions de sol. La matière organique agit comme un tampon du pH en neutralisant les excès d'acidité ou d'alcalinité (Brady &Weil, 2017).

Le pH est fortement corrélé à la matière organique du sol qui agit comme un tampon dans un sol acide. La matière organique offre de nombreux sites chargés négativement pour lier les protons (H^+) et augmenter ainsi le pH.

Dans un sol basique, la matière organique du sol peut donc devenir source d'ions H^+, acidifiant le sol. Dans les deux cas, la solution de sol tend vers un pH neutre, bien qu'elle soit conditionnée par la nature alcaline de la matière organique entrant dans le sol (McCauley *et al*., 2017)**.**

De plus, le pH influence l'activité microbienne. Les pH acides inhibent la croissance bactérienne, mais favorisent la croissance fongique jusqu'à un pH minimum de 4,5 (Sylvia et al., 2005). Une augmentation du pH entraîne cependant une augmentation globale de la respiration basale des sols et de l'activité microbienne (Rousk, 2009).

On peut déterminer en fait deux pH pour chaque échantillon sol : l'un dans l'eau et l'autre dans du chlorure de potassium (KCl) (Baize, 1988). Le premier renseigne sur l'acidité effective de la solution et le second sur l'acidité potentielle (Fardeau, 2015).

Le pH optimal pour la production végétale est d'environ 6,5 (Jacques, 2021)**.** Le pH d'un sol influence la capacité de ses constituants porteurs de charges à piéger ou libérer les cations (Schvarty et al., 2005). Le pH idéal pour l'amarante est de 6,5 (Council, 1984).

b) Capacité d'échange cationique (CEC)

Les complexes humiques possèdent une forte CEC, favorisant la rétention d'éléments nutritifs tels que Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ et NH_4^+ (Stevenson, 1994).

La Capacité d'échange cationique (CEC) est la quantité totale de cations échangeables (Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, Na^+, H^+, Al_3^+, NH_4^+) qui peuvent être adsorbés sur certains constituants solides du sol porteurs de charges tels que la MOS, les oxydes de fer ou d'aluminium et certains minéraux argileux comme la kaolinite (Jacques, 2021)**.** Elle varie dans le temps et la plupart des cations échangeables, sauf Al_3+, sont des nutriments pour les plantes (Jacques, 2021). Cette propriété illustre à la fois la fonction de garde-manger pour les plantes et un réservoir jouant un rôle majeur en tant que pouvoir tampon de la pression osmotique entre le milieu extérieur et les cellules des racines (Diacono, 2010). Plus un sol est riche en argiles et en matières organiques, plus sa capacité

à adsorber des cations est grande. Au contraire, plus un sol est riche en sable et pauvre en matières organiques, plus sa CEC est faible (Jacques, 2021).

Le taux de saturation d'un sol en bases échangeables est le pourcentage de la CEC occupée par des cations basiques tels que Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+} (Schvarty *et al*., 2005) .

Plus ce taux est élevé, plus il y a de cations nutritifs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) disponibles et le taux de saturation du complexe d'échange en bases l'est aussi (Schvarty *et al*., 2005).

c) Toxicité aluminique

Dans les sols acides, l'aluminium échangeable (Al^{3+}) devient soluble et toxique pour les racines. La matière organique réduit cette toxicité en formant des complexes organo-métalliques stables avec l'Al^{3+}. La minéralisation de la matière organique peut également augmenter le pH, diminuant la solubilité de l'aluminium. L'incorporation de biomasse organique peut réduire jusqu'à 90 % l'aluminium toxique dans certains sols acides (Hue *et al*., 1986).

d) Phosphore assimilable

Les acides humiques augmentent la disponibilité du phosphore en réduisant sa fixation par les oxydes de fer et d'aluminium, en particulier dans les sols acides tropicaux. L'activité microbienne stimulée par la matière organique augmente la minéralisation du phosphore organique, améliorant sa disponibilité pour les plantes (Oberson & Joner, 2005).

La matière organique améliore la disponibilité du phosphore en complexant les ions Fe^{3+} et Al^{3+} pour empêcher la formation de phosphates insolubles. Les groupements humiques occupent aussi les sites d'adsorption, réduisant ainsi la fixation du phosphore (Bolan *et al*., 2010) .

Les acides organiques issus de la décomposition de la matière organique solubilisent le phosphore fixé (Condron *et al*., 2005).

I.4.4. Effet sur les propriétés physiques du sol

La matière organique joue un rôle central dans l'amélioration des propriétés physiques du sol, notamment par la formation et la stabilisation des agrégats. Les composés organiques, tels que les polysaccharides microbiens et les acides humiques, agissent comme des agents liants favorisant la

cohésion entre les particules minérales. Cette stabilisation structurale améliore la porosité, l'aération et la capacité de rétention en eau du sol.

L'incorporation de carbone organique favorise la macro-agrégation, ce qui augmente la résistance à l'érosion et améliore les mouvements d'air et d'eau dans le profil du sol (Six *et al*., 2000).

La matière organique diminue également la densité apparente grâce à sa faible densité propre et son effet sur la structuration du sol. Un accroissement modéré de la matière organique peut entraîner une amélioration significative de la capacité de rétention en eau, facilitant l'infiltration et le développement des racines (Hudson, 1994).

I.4.5. L'enfouissement de la matière organique n'est pas toujours bénéfique

Bien que l'incorporation de matière organique soit souvent bénéfique, un enfouissement excessif ou mal géré peut entraîner des effets négatifs sur la dynamique du sol et la croissance végétale. Dans des conditions de faible aération, la décomposition peut devenir anaérobie, générant des substances phytotoxiques comme les acides acétiques, butyriques ou propioniques, ainsi que de l'ammoniac et ces conditions peuvent inhiber la croissance des plantules et perturber l'activité microbienne bénéfique **(**Bernal *et al*., 2009). Par ailleurs, lorsque des résidus à rapport C/N élevé sont enfouis, les microorganismes mobilisent de grandes quantités d'azote minéral pour décomposer cette matière, provoquant une immobilisation temporaire de l'azote. Ce phénomène entraîne une réduction de la disponibilité en azote pour les plantes, particulièrement dans les premières semaines suivant l'incorporation (Recous & Mary, 1990).

I.4.6. Influence de la matière organique sur la physiologie des végétaux

Les substances humiques issues de la décomposition de la matière organique ont un impact direct sur la physiologie des plantes. Elles stimulent la croissance des racines, améliorent l'absorption des nutriments et renforcent la capacité photosynthétique. Les acides humiques activent aussi des enzymes clés du métabolisme végétal, augmentent la perméabilité membranaire et améliorent le transport actif des nutriments (Nardi *et al*., 2002).

De plus, certaines fractions humiques stimulent la biosynthèse de phytohormones, telles que les auxines, qui sont essentielles à l'élongation cellulaire et au développement racinaire et peuvent agir comme régulateurs de croissance en favorisant la prolifération racinaire et la vigueur végétative (Canellas *et al*., 2002).

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Localisation géographique du milieu d'étude

L'expérimentation a été conduite sous serre à la Faculté d'Agronomie et de Bio ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, située au Campus Mutanga, dans la ville de Bujumbura (capitale économique du Burundi). La sous serre de la Faculté d'Agronomie et de Bio ingénierie se trouve, à une altitude moyenne de 838 mètres, entre 3°22' de latitude Sud et 29°23' de longitude Est.

La ville de Bujumbura bénéficie un climat tropical humide à deux saisons, principales une saison pluvieuse s'étendant généralement d'octobre à mai et une saison sèche de juin à septembre (Caviglia, 2024). La température moyenne annuelle varie entre 24°C et 28°C, avec une pluviométrie oscillant entre 800 et 1 200 mm/an (station Bujumbura-Aéroport). Ces conditions climatiques sont favorables à la croissance des cultures maraîchères telles que l'amarante (*Amaranthus spp*.).

II.2. Méthodologie

II.2.1. Matériel d'étude

Le matériel d'étude comprend l'ensemble des équipements, outils et intrants utilisés pour la conduite des essais expérimentaux sur la culture d'amarante (*Amaranthus spp.)* sous serre à la Faculté d'Agronomie et de Bio ingénierie (FABI). Ces matériels ont été mobilisés à la fois pour la préparation du sol, la mise en culture, l'entretien, la récolte et les mesures analytiques.

II.2.1.1. Matériel général

Les principaux matériels utilisés au cours de cette étude sont les suivants :

- Pots plastiques : récipients expérimentaux de volume homogène, chacun contenant 4 kg de sol fin et séché à l'air libre.
- Arrosoirs : utilisés pour l'irrigation quotidienne des plants, à raison de deux arrosages par jour (matin et soir).
- Sceaux et cannettes : employés pour le lavage des racines après chaque récolte afin d'éliminer les particules de sol adhérentes.

- Enveloppes en papier : utilisées pour le conditionnement des échantillons de sol destinés à l'analyse du pH et de la conductivité électrique (CE).
- Sachets perforés : destinés au séchage et à la conservation des échantillons de plantes après chaque récolte.
- Ciseaux et pinces : pour la séparation précise des parties aériennes et racinaires des plants d'amarante.
- Balance analytique : pour la mesure de la biomasse sèche des échantillons, avec une précision au gramme.
- pH-mètre : pour la mesure du pH du sol, après la quatrième récolte.
- Conductimètre : pour la mesure de la conductivité électrique (CE) du sol.
- Registre de suivi et stylos : pour l'enregistrement systématique des données relatives aux dates de semis, démariage, récolte, séchage, pesées et mesures analytiques.

L'ensemble de ces matériels a permis d'assurer la fiabilité et la traçabilité des mesures réalisées au cours de l'expérimentation.

II.2.1.2. Sol d'expérimentation

Le sol utilisé provient du site agricole de Gihanga (de l'ancienne province de Bubanza), situé dans la plaine de la Rusizi. Il a été prélevé manuellement à une profondeur de 0–20 cm, puis broyé à 2 mm pour éliminer les débris grossiers. Avant l'installation de l'expérience, le sol a été homogénéisé et laissé reposer à l'air libre pour stabiliser son humidité.

Chaque pot a reçu une quantité uniforme de 4 kg de sol sec. Ce sol, de texture limono-argileuse, est caractéristique des terres alluviales de Gihanga, connues pour leur bonne capacité de rétention en eau et leur fertilité moyenne**.**

II.2.1.3. Composts et amendements organiques

Les composts testés ont été préparés à partir de différents mélanges de paille de riz, de fumures animales (bouse de vache, fumier de porc, fientes de poule), et d'agents enrichissants biologiques tels que la biomasse de *Tithonia diversifolia* ou l'urine de lapin.

II.2.1.3.1. Paille de riz (matière carbonée de base)

La paille de riz est le résidu de la culture du riz après la moisson. Elle est l'une des biomasses les plus disponibles en zones rizicoles et constitue la matière carbonée de base (matrice bulk) dans le compostage. Elle est essentielle pour le maintien de l'aération et de la porosité du tas de compost (Wang *et al*., 2020).

Son utilisation dans le compost permet de gérer efficacement des résidus agricoles abondants, réduisant ainsi le brûlage des pailles, une pratique très polluante. En tant que composant du compost, elle contribue à l'augmentation à long terme de la matière organique stable dans le sol.

La paille de riz se compose majoritairement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, d'où sa richesse en carbone. Sa teneur en nutriments est faible, mais elle peut contenir des quantités non négligeables de silice, bénéfique pour la résistance des plantes. Son ratio C/N est très élevé (souvent > 50/1), ce qui rend sa décomposition lente si elle n'est pas mélangée à des matières azotées (Wang *et al*., 2020).

II.2.1.3.2. *Tithonia diversifolia*

Tithonia diversifolia (Hemsl) A. Gray est une astéracée arbustive largement employée en agroforesterie et dans la gestion de la fertilité des sols (Jama *et al*., 2007). Elle est utilisée comme engrais vert ou biomasse de haute qualité dans les systèmes de culture intensifs (Palm *et al*, 2001).

La biomasse de *T. diversifolia* est exceptionnelle par sa composition, contenant des niveaux élevés d'azote (N) et de phosphore (P), souvent comparables à ceux des engrais minéraux. Les feuilles peuvent contenir 3 à 4% d'azote, 0,3 à 0,4% de phosphore et 3 à 4% de potassium (Nziguheba *et al*., 2000). Son incorporation dans le compost enrichit rapidement le produit final, améliorant ainsi l'efficacité pour des cultures exigeantes comme l'amarante (Kouame *et al*., 2016).

Sur le plan environnemental, son utilisation favorise la séquestration du carbone et réduit la dépendance aux engrais chimiques, s'inscrivant dans une démarche d'agriculture durable (Altieri, 2017).

II.2.1.3.3. Bouse de vache

La bouse de vache est une fumure organique issue des déjections bovines, composée principalement d'eau, de matière organique, de nutriments variés et également riche en microorganismes bénéfiques favorisant la décomposition de la matière organique(Garg & Kaushik, 2005) . Elle est souvent utilisée dans l'agriculture traditionnelle pour améliorer la fertilité des sols**.** Son application améliore la structure du sol, augmente la capacité de rétention hydrique et stimule l'activité microbienne (Tognetti *et al*., 2007).

Elle participe aussi à la séquestration du carbone dans le sol, contribuant à l'atténuation du changement climatique (Smith *et al*., 2008).

II.2.1.3.4. Fumier de porc

Le fumier de porc est un mélange de déjections porcines, de litières végétales utilisé comme amendement organique et a également des composés organiques facilement dégradables pour favoriser une minéralisation rapide (Kirchmann & Witter, 1992).

Il contient en moyenne 0,8–1,2 % d'azote, 0,6–0,9 % de phosphore et 0,5–0,8 % de potassium et est plus riche en nutriments que les fumiers bovins en raison de la nature de l'alimentation porcine. De plus, il améliore la fertilité du sol en augmentant directement les teneurs en nutriments disponibles (Smith *et al*., 2007).

II.2.1.3.5. Fientes de poule

Les fientes de poule, issues de l'élevage avicole, représentent l'une des fumures animales les plus riches. Elles sont souvent utilisées soit directement comme fertilisant, soit comme source azotée majeure dans le compostage pour son rôle activateur.

Elles ont une teneur en nutriments supérieure à celle des fumiers bovins ou porcins, notamment en azote et en phosphore. Leur utilisation dans le compost permet de valoriser les déchets de l'élevage et de boucler le cycle des nutriments au niveau de l'exploitation, réduisant ainsi la pollution potentielle des eaux par les rejets (Hossain, 2014)

II.2.1.3.6. Urine de lapin

L'urine de lapin est un fertilisant organique liquide très concentré, souvent négligé. Son utilisation dans la production agricole est une pratique de plus en plus étudiée dans le cadre de la gestion des nutriments et valorise un sous-produit de l'élevage, réduisant le gaspillage et offrant une alternative locale et économique aux engrais de synthèse. Elle peut être utilisée pour arroser directement les tas de compost afin de les enrichir. Son faible ratio C/N (quasi nul) fait un activateur puissant pour le compostage des matières carbonées (Mugabe *et al*., 2019).

Elle est caractérisée par une très forte teneur en azote et en potassium, avec une faible concentration en phosphore. L'azote y est principalement présent sous forme d'urée, qui s'hydrolyse rapidement en ammonium, offrant des nutriments directement et rapidement assimilables par les plantes, ce qui est l'avantage principal des fertilisants liquides organiques (Dendooven *et al*., 2012).

Tableau 2: Différents traitements appliqués

Traitement	Composition du compost
T1	Tri-compost à base de paille de riz + fumier de bovin + biomasse de *Tithonia diversifolia*
T2	Tri-compost à base de paille de riz + fumier de porc + biomasse de *Tithonia diversifolia*
T3	Tri-compost à base de paille de riz + fientes de poule + biomasse de *Tithonia diversifolia*
T4	Tri-compost à base de paille de riz + fumier de bovin + urine de lapin
T5	Tri-compost à base de paille de riz + fumier de porc + urine de lapin
T6	Tri-compost à base de paille de riz + fientes de poule + urine de lapin
T7	Fumier de bovin seul
T8	Témoin sans apport de fumure organique

Les traitements T_1 à T_3 représentent la série de composts enrichis à la *Tithonia diversifolia*, tandis que les traitements T_4 à T_6 représentent les composts enrichis à l'urine de lapin. Les traitements T_7 et T_8 servent de comparatifs respectivement pour l'effet du fumier brut et du sol sans apport organique. Ces formulations ont été choisies afin de comparer les effets de la source d'azote organique (*Tithonia* ou urine de lapin) et la nature de la fumure animale de base sur la production de biomasse d'amarante.

Chaque compost a été bien décomposé avant son application, afin de garantir une libération progressive des nutriments et d'éviter les effets phytotoxiques liés à une fermentation incomplète. La quantité appliquée a été de 10 g de compost par pot, incorporée une seule fois avant le semis. Ce dosage uniforme visait à évaluer les différences d'efficacité entre les types de composts plutôt que les effets de la dose.

II.2.1.4. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de semences d'amarante (*Amaranthu*s spp.), plante herbacée à cycle court, sélectionnée pour sa capacité à réagir rapidement aux apports de matière organique.

II.2.2. Dispositif expérimental

L'étude a été conduite selon un dispositif de randomisation totale comportant huit traitements et trois répétitions, soit un total de 24 unités expérimentales par essai. Ce choix méthodologique a permis de minimiser les effets des variations non contrôlées (microclimatiques ou édaphiques) et de renforcer la validité statistique des résultats.

Chaque unité expérimentale était constituée d'un pot plastique (Figure 1) contenant 4 kg de sol sec prélevé à Gihanga, homogénéisé à 2 mm. Les composts ont été incorporés dans le sol une seule fois avant le semis, à raison de 10 g de compost par pot**.**

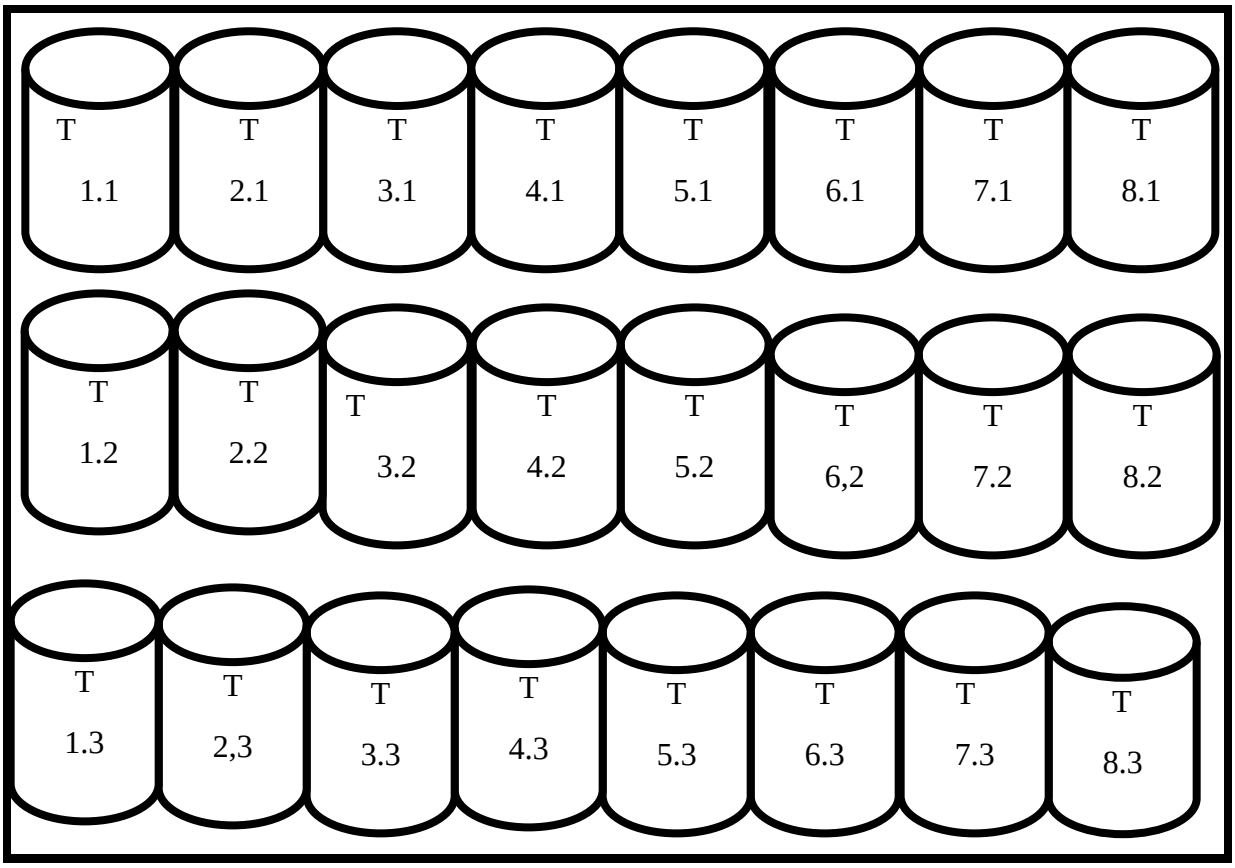


Figure 1. Dispositif expérimental des essais effectués en culture sous serre

II.2.3 Semis des semences

Les semences d'amarante ont été semées directement dans les pots contenant les différents substrats expérimentaux. Chaque pot a reçu un semis homogène de plus 10 graines, réparties uniformément à la surface du sol. Après deux semaines de germination, un démariage a été effectué pour ne conserver que cinq plants vigoureux par pot, assurant ainsi une densité de peuplement homogène entre les traitements.

Cette étape a permis de garantir une meilleure compétition intra-spécifique contrôlée et d'éviter les biais liés à la densité dans l'évaluation de la croissance et de la biomasse.

II.2.4. Conduite de la culture

L'entretien de la culture a consisté principalement à un arrosage manuel régulier (Figure 2), effectué deux fois par jour (le matin et le soir).

Aucun traitement phytosanitaire ni fertilisation supplémentaire n'a été appliqué, de manière à isoler l'effet propre des composts sur la croissance des plants.

Les conditions de température et d'humidité ont été stabilisées par la culture sous serre, limitant ainsi les variations climatiques susceptibles d'influencer la minéralisation de la matière organique et l'absorption des nutriments.



Figure 2. Arrosage des essais

II.2.5. Cycle cultural et récolte

Chaque cycle de culture a duré deux mois, du semis à la récolte. La récolte des plants a été effectuée à la fin de chaque cycle (60 jours), lorsque les plants avaient atteint un stade de développement végétatif optimal.

Les plants ont été soigneusement extraits des pots, puis lavés à l'eau claire afin d'éliminer toute trace de sol avant la séparation des parties aériennes et racinaires à l'aide de ciseaux fins.

Cette opération a été répétée pour quatre cycles successifs, soit une durée totale de huit mois donc de février à octobre 2024. La première récolte a permis de déterminer la valeur agronomique directe des composts, tandis que les trois suivantes ont servi à estimer leur valeur résiduelle, traduisant la libération progressive des nutriments et la persistance de leurs effets dans le sol.

II.2.6. Séchage et conservation des échantillons

Après chaque récolte, les plants ont été disposés dans des sachets perforés et séchés à température ambiante sous serre pendant une durée de 25 jours, jusqu'à obtention d'un poids constant.

Les échantillons secs ont ensuite été pesés à l'aide d'une balance analytique pour déterminer la biomasse sèche totale, aérienne et racinaire. Les valeurs obtenues ont constitué la base des analyses statistiques relatives à la valeur agronomique directe et résiduelle des composts.

II.2.7. Mesure du pH et de la conductivité électrique du sol

Les mesures du pH et de la conductivité électrique (CE) du sol ont été réalisées à la fin du quatrième cycle de culture afin d'évaluer les effets résiduels des différents composts sur les propriétés chimiques du sol. Ces paramètres ont servi à déterminer la stabilité chimique du substrat après plusieurs cycles de culture d'amarante.

II.2.7.1. Prélèvement des échantillons de sol

Après la quatrième récolte, un échantillon de sol a été prélevé dans chaque pot à l'aide d'une spatule en inox propre. Les prélèvements ont été effectués à une profondeur de 0 à 10 cm, correspondant à la zone principale d'activité racinaire de l'amarante.

Pour chaque pot, environ 100 g de sol ont été prélevés, homogénéisés et placés dans des enveloppes en papier correctement étiquetées avec le code du traitement et le numéro de répétition.

Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre pendant 72 heures, puis tamisés à 2 mm afin d'éliminer les débris végétaux et les agrégats grossiers. Cette préparation a permis d'obtenir un sol homogène, adapté aux mesures en suspension aqueuse.

II.2.7.2. Lieu et conditions d'analyse

Les analyses de pH et de conductivité électrique (CE) ont été effectuées au Laboratoire de Chimie de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi, situé au le campus Mutanga.

Le pH du sol est déterminé à l'aide pH-mètre de marque consort, modèle C6010 dans une suspension sol-eau de rapport 1/5 (m/v). Cinq grammes (5 g) de sol sec tamisé ont été placés dans un bécher contenant 25 ml d'eau distillée après un temps d'équilibrage d'une heure pendant lequel les suspensions étaient agitées toutes les 20 minutes. La mesure du pH a été réalisée à l'aide d'un pH-mètre électronique calibré à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 10.

La Conductivité électrique (CE) est mesurée dans la même suspension au rapport sol-eau (1/5). Après homogénéisation du mélange, la conductivité a été lue à l'aide d'un conductimètre numérique, les valeurs étant exprimées en microSiemens par centimètre (µS/cm). Entre chaque série de mesures, l'électrode du conductimètre a été rincée à l'eau distillée et essuyée pour éviter toute contamination croisée.

II.2.7.3. Traitement des données

Les valeurs de pH et de CE obtenues pour chaque traitement ont été saisies dans une base de données sous Microsoft Excel 2019, puis soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur à l'aide du logiciel SPSS version 26. Les moyennes ont été comparées au seuil de signification de 5 % ($p < 0,05$) à l'aide du test de Tukey HSD.

Le pH a permis d'évaluer l'effet neutralisant ou acidifiant des composts, indicateur de leur capacité à modifier la réaction du sol. La conductivité électrique (CE), quant à elle, a été utilisée pour estimer la quantité d'ions solubles (nutriments minéraux) résultant de la décomposition et de la minéralisation des matières organiques.

II.2.8. Détermination de la biomasse foliaire et racinaire

La détermination de la biomasse foliaire et racinaire constitue une étape essentielle de cette étude, car elle permet d'évaluer la valeur agronomique directe et résiduelle des composts testés à travers la production de matière sèche de l'amarante (*Amaranthus* spp). Ces mesures reflètent l'efficacité nutritionnelle des différents traitements et la capacité des composts à améliorer la croissance végétale au cours des cycles culturaux successifs.

Plusieurs paramètres ont été calculés pour chaque pot :

- Biomasse aérienne (BA) : masse sèche totale des parties aériennes (tiges + feuilles), exprimée en grammes (g).
- Biomasse racinaire (BR) : masse sèche totale des racines, exprimée en grammes (g).
- Biomasse totale (BT) : somme de la biomasse aérienne et racinaire.
- Rapport BR/BT : proportion de biomasse racinaire par rapport à la biomasse totale.
- Rapport BR/BA : rapport entre la biomasse racinaire et la biomasse aérienne, indicateur de l'allocation de matière sèche entre les deux compartiments.

II.2.9. Exploitation des données de la biomasse et des ratios

Les données de biomasse (BA, BR, BT, BR/BT et BR/BA) ont été saisies dans Microsoft Excel 2019 puis soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur à l'aide du logiciel SPSS (version 26).

Le test de Tukey HSD a été appliqué au seuil de 5 % ($p < 0,05$) pour comparer les moyennes des traitements.

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

La structure de ce chapitre suit la progression logique de l'étude, abordant d'abord l'influence des traitements sur les propriétés initiales du sol, puis les effets des facteurs Traitement et Récolte, ainsi que leur interaction sur la production de biomasse d'amarante. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux d'Analyse de Variance (ANOVA) et de tableaux de comparaison des moyennes, conformément aux conventions académiques.

III.1. Effet des traitements sur les propriétés physico-chimiques du sol

L'évaluation de l'impact des différents amendements sur le sol a été réalisée par une Analyse de Variance à un facteur (ANOVA 1) pour le pH et la conductivité électrique (C E) du sol, mesurés à la fin de l'expérimentation.

III.1.1. Influence des traitements sur le pH du sol

L'analyse de variance (Tableau 3) révèle que l'application des différents traitements a exercé une influence statistiquement très significative sur le pH du sol, comme l'indique la faible probabilité observée ($P < 0,001$).

Tableau 3: Analyse de variance de l'effet des traitements sur le pH du sol

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	(Pr(>F))
Traitement	7	23,833	0,3405	12,73	$1,78e^{-05}$
Résiduels	16	0,4279	0,0267		

DDL : Degré de Liberté ; SCE : Somme des Carrés des Ecarts ; CM : Carrés Moyens

La comparaison des moyennes pour le pH des différents traitements, utilisant la méthode de regroupement statistique, met en évidence la formation de quatre groupes distincts, avec une variation de 9,06 pour le traitement T à 8,18 pour le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL).

Tableau 4: Comparaison des moyennes du pH du sol selon le traitement

Traitement	Moyenne±Écart-type
T(T8)	9,06± 0,19 a
FV(T7)	8,91± 0,23 a
PR + BV + Td(T1)	8,63± 0,10 b
PR + FP + Td(T2)	8,48± 0,24 bc
PR + FP +UL(T5)	8,33± 0,12 cd
PR + BV+ UL(T4)	8,22± 0,10 cd
PR + FPo+ Td(T3)	8,2± 0,18 cd
PR + FPo + UL(T6)	8,18± 0,06 d

T: Témoin, FV: Fumier de vache, PR: Paille de riz, BV: Bouse de vache, FP: Fumier de porc, FPo: Fiente de poule, Td: *Tithonia diversifolia*, UL: Urine de lapin

Les groupes homogènes révèlent une tendance très claire pour une alcalinité élevée du témoin et du fumier de vache seul. Le sol témoin (T) présente le pH le plus élevé (9,06), suivi de près par le Fumier de Vache (8,91). Ils forment le groupe statistique (a). Ces valeurs indiquent un sol fortement basique (alcalin).

Tous les tri-composts ont significativement abaissé le pH vers des valeurs plus neutres, ce qui indique un effet acidifiant des tri-composts. Le traitement de paille de riz+ fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) enregistre la valeur la plus basse (8,18 groupe d), suivi de paille de riz + fiente de poule et *Tithonia diversifolia* (PR + FPo + Td) avec une valeur de 8,20 et paille de riz + bouse de vache et urine de lapin (PR + BV + UL) qui a une valeur de 8,22. La réduction est de près de 1 unité pH par rapport au témoin.

Les résultats indiquent que le sol expérimental était initialement alcalin (pH > 9), ce qui peut correspondre à certains sols de la plaine de l'Imbo ou à des sols ayant reçu des cendres. L'apport du tri-compost a joué un rôle de tampon.

La décomposition de la matière organique (paille + activateurs) par les micro-organismes libère du dioxyde de carbone (CO_2) qui, en réagissant avec l'eau du sol, forme de l'acide carbonique. De plus, le processus d'humification produit des acides organiques (acides humiques et fulviques). Ces composés neutralisent les ions hydroxyles (OH^-) responsables de l'alcalinité élevée du témoin (Jones, 1998).

Ces résultats sont corroborés par (Nijimbere *et al*., 2023) au Burundi, qui observent que les composts matures tendent à ramener le pH vers la neutralité, améliorant ainsi la disponibilité des micronutriments (Fer, Manganèse) souvent bloqués dans les sols trop basiques.

Les traitements de paille de riz + fumier de porc et urine lapin, et paille de riz + bouse de vache et urine de lapin (PR + FP+ UL, PR + BV + UL) et ceux de paille de riz + fiente de poule et *Tithonia diversifoli*, et paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR +FPo + Td, PR + FP + Td) se retrouvent dans les groupes (cd) et (bc). Il n'y a pas de différence majeure entre eux sur ce paramètre. L'urine de lapin, bien que riche en ammoniac (initialement basique), subit une nitrification (transformation en nitrates) qui libère des protons H^+, contribuant ainsi à l'abaissement bénéfique du pH observé à 8,18 pour le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL).

III.1.2. Influence des traitements sur la conductivité électrique (CE) du sol

Les résultats de l'ANOVA 1 (Tableau 5) effectuée sur la conductivité électrique (CE) démontrent également une influence statistiquement très significative des traitements sur cette variable. La valeur F observée est de 14,88, associée à une probabilité très faible ($P = 6,42e^{-06}$).

Tableau 5: Analyse de variance (ANOVA 1) de l'effet des traitements sur la Conductivité Électrique (CE) du sol

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F))
Traitement	7	0,001093	0,0001562	14,88	$6,42e^{-06}$
Résiduels	16	0,000168	0,0000105		

La comparaison des moyennes de la CE du sol selon les traitements révèle la structuration des traitements en trois groupes statistiques distincts. Le traitement T (témoin non amendé) et FV (fumier de vache) présentent les moyennes les plus élevées, tandis que le traitement de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* enregistre la moyenne la plus basse (Tableau 6).

Tableau 6: Comparaison des moyennes de la CE (µS/cm) du sol selon le traitement

Traitement	Moyenne± Écart-type
T	0,042± 0,004 a
FV	0,04± 0,004 a
PR + BV + UL	0,03± 0,003 b
PR + FPo + Td	0,027± 0,001 bc
PR + FP + UL	0,027± 0,001 bc
PR + BV + Td	0,026± 0,006 bc
PR + FPo + UL	0,025± 0,001 bc
PR + FP + Td	0,022± 0,003 c

Le témoin (T) et le FV affichent les CE les plus élevées (0,042 et 0,040 mS/cm), classés dans le groupe a. Les traitements du tri-compost présentent des valeurs significativement plus faibles, descendant jusqu'à 0,022 mS/cm pour le traitement de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (Groupe c).

A première vue, on pourrait s'attendre à ce que l'ajout de compost augmente la CE (apport d'ions). Or, c'est l'inverse qui est observé ici.

Deux mécanismes expliquent ce résultat :

- L'effet de dilution biologique

La biomasse produite par les tri-composts était nettement supérieure à celle du témoin (voir section Biomasse Totale). Les plantes vigoureuses des traitements de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia*, et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FP + Td et PR + FPo + UL) consomment une grande quantité de nutriments dissous pour leur croissance.

À l'inverse, sur le sol témoin (T), la croissance faible des plantes a laissé les sels minéraux inutilisés dans la solution du sol, d'où une CE résiduelle plus élevée.

- Stabilisation

L'humus formé par le compostage augmente la Capacité d'Échange Cationique (CEC) du sol. Les ions nutriments (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) sont alors adsorbés sur le complexe argilo-humique plutôt que d'être libres en solution. Cela réduit la conductivité mesurée dans l'immédiat mais constitue une réserve à long terme pour la plante, évitant le lessivage. Ces résultats collaborent ceux de (Sindayihebura, 2013) qui souligne que l'amélioration du complexe adsorbant est cruciale pour la durabilité de la fertilité des sols sableux de l'Imbo.

III.2. Effet global des traitements sur la production de biomasse

Afin d'évaluer l'effet principal des traitements sur la production d'amarante sur l'ensemble des quatre récoltes, une analyse de la variance globale a été menée sur la Biomasse Totale (BT), la Biomasse Aérienne (BA), la Biomasse Racinaire (BR), et les ratios d'allocation BR/BT et BR/BA.

Le tableau 7 présente les moyennes des biomasses (Totale, Aérienne, Racinaire) cumulées ou moyennées sur l'ensemble des quatre coupes.

Tableau 7: Effet des traitements sur les biomasses et leurs rapports sur les 4 coupes

Traitements	BT	BA	BR	BR/BT	BR/BA
PR + BV + Td	11,78 ± 1,54	10,48± 1,44	1,30± 0,11 ab	0,11± 0,01	0,12 ± 0,01
PR + FP + Td	12,68± 2,56	11,05± 2,10	1,63 ± 0,47 ab	0,13 ± 0,01	0,15± 0,02
PR + FPo + Td	11,02± 3,31	9,60± 3,00	1,42 ± 0,33 ab	0,13± 0,01	0,15 ± 0,02
PR + BV + UL	11,98± 1,49	10,61± 1,39	1,37 ± 0,12 ab	0,12± 0,08	0,13 ± 0,01
PR + FP + UL	9,25± 1,94	8,16± 1,72	1,08± 0,22 ab	0,12± 0,01	0,13 ± 0,01
PR + FPo + UL	13,02± 1,63	11,27± 1,38	1,75 ± 0,26 ab	0,13± 0,01	0,16 ± 0,01
FV	13,95± 2,23	12,06 ± 1,98	1,89 ± 0,40 a	0,14 ± 0,02	0,16 ± 0,03
T	8,44± 3,99	7,47± 3,56	0,98± 0,44 b	0,12 ± 0,01	0,13 ± 0, 01
P (>F)	0,177	0,225	0,0356 *	0,0792	0,081
CV (%)	24	24	28	11	12

Malgré des écarts nominaux importants, l'analyse de variance ne détecte pas de différence significative entre les traitements pour la BT (p = 0,177) et la BA (p = 0,225) sur l'ensemble du cycle. Cependant, au-delà des statistiques, le traitement FV (Fumier Vache) affiche la moyenne la plus élevée (13,95± 2,23 g), suivi de très près par le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) avec une de moyenne de 13,02 ± 1,63g et le traitement de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (12,68± 2,56 g). Le témoin T est en retrait (8,44 g±3,99g).

Contrairement aux parties aériennes, la biomasse racinaire présente une différence significative entre les traitements (p = 0,0356). Le fumier de vache (1,89 g) domine significativement le témoin T (0,98 g). Les tri-composts de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (1,75 g) et de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (1,63 g) se situent dans le groupe intermédiaire supérieur (ab), statistiquement comparables au fumier de vache (FV).

Les ratios ne montrent que des tendances marginales (p=0,08), indiquant que l'architecture globale de la plante reste relativement conservée quel que soit le traitement, oscillant entre 11 et 12% d'investissement racinaire.

De manière générale, le fumier (FV) domine au début de la récolte (R1) puis chute, tandis que les tri-composts de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin, et de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FPo + UL, PR + FP + Td) sont faibles à la première récolte puis dominent à la fin en faisant la moyenne des 4 récoltes.

Pour la première récolte, le fumier de vache (FV) est supérieur. Mais pour un cycle complet de 4 récoltes, les tri-composts de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin, et de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FPo + UL et PR + FP + Td) égalent la performance du fumier de vache (13,02 g contre 13,95 g) tout en améliorant la fertilité du sol à long terme.

Bien que la statistique soit non significative, la tendance biologique est claire, les amendements augmentent la biomasse de +50% à +65% par rapport au témoin (13,95 g contre 8,44 g). Ceci s'aligne avec les travaux de Sindayihebura (2013) dans l'Imbo, qui rapportent des augmentations de rendement similaires sur *Amaranthus* ssp avec des fumures organiques.

Le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) obtient une biomasse totale de 13,02 g, surpassant légèrement le meilleur traitement à base de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (12,68 g) et talonnant le fumier de vache. Cela confirme que l'urine de lapin, souvent négligée, possède un potentiel fertilisant équivalent aux biomasses végétales reconnues comme le *Tithonia diversifolia*. C'est un résultat important pour les éleveurs burundais qui peuvent valoriser ce sous-produit liquide via le compostage.

III.3. Effet de l'interaction entre le traitement et la récolte

Les résultats de l'ANOVA 2 (Tableau 8) montrent que l'interaction entre le traitement et la récolte est statistiquement significative pour la Biomasse Totale (p=0,00785), la Biomasse Aérienne (P=0,0103) et la Biomasse Racinaire (p=0,00328). L'effet d'interaction n'est pas significatif pour les ratios BR/BT (p=0,093) et BR/BA (p=0,0789) au seuil de p<0,05.

Tableau 8: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur les variables de biomasse

Source de Variation	**DDL**	**BT Pr(>F)**	**BA Pr(>F)**	**BR Pr(>F)**	**BR/BT Pr(>F)**	**BR/BA Pr(>F)**
Traitement	7	0,13493	0,1682	0,03206	0,0267	0,0329
Récolte	3	0,45615	0,6526	0,00191	$2,85e^{-11}$	$8,83e^{-10}$
Traitement x récolte	**21**	**0,00785**	**0,0103**	**0,00328**	**0,093**	**0,0789**
Résiduels	64	101,66	77,35	2, 0065	0,03982	0,06923

III.3.1. Effet de l'interaction sur la biomasse totale (BT)

Le tableau 9 suivant présente les moyennes de Biomasse Totale pour chaque combinaison de traitement et de récolte.

L'analyse des groupes par récolte précise cette interaction qu'à la récolte 1, le traitement FV domine (3,29 g), suggérant une disponibilité immédiate des nutriments. La Récolte 2 et 3, les tri-composts prennent le relais.

Par exemple, le traitement de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FP + Td) culmine à la récolte 2 (3,69 g) et le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin à la récolte 3 (3,66 g).

Tandis qu'à la récolte 4 (Effet résiduel), les traitements à base de paille enrichie, notamment de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia* (PR + BV + Td) montrent les biomasses les plus élevées (3,94 g), indiquant une libération lente et soutenue des nutriments.

Tableau 9: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse totale (BT)

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3	Récolte 4
FV	3,29 ± 6,38 a	3,20 ± 0,65ab	2,69 ± 1,5 ab	1,67 ± 0,64 b
PR + BV + UL	3,01 ± 4,80 ab	3,06 ± 0,33 ab	1,79 ± 1,55 b	2,32 ± 0,52 ab
T	2,56 ± 3,30 ab	2,10 ± 1,14 b	1,37 ± 0,34 b	1,66 ± 0,66 b
PR + FP + Td	0,24 ± 2,63 ab	3,69 ± 0,72 ab	3,03 ± 1,98 ab	3,34 ± 0,37 ab
PR + BV + Td	0,10 ± 2,27 b	3,21 ± 0,68 ab	2,35 ± 0,7 ab	3,94 ± 0,27 ab
PR + FPo + UL	0,47 ± 2,23 b	3,22 ± 0,72 ab	3,66 ± 0,94 ab	3,90 ± 0,66 ab
PR + FPo + Td	1,89 ± 1,89 b	3,22 ± 1,62 ab	2,98 ± 0,75 ab	2,93 ± 0,29 ab
PR + FP + UL	1,87 ± 1,87 b	2,08 ± 1,28 b	3,22 ± 0,52 ab	2,07 ± 0,75 b

L'interaction significative corrobore les travaux sur la minéralisation de la matière organique. Le fumier de vache seul (FV) semble avoir agi rapidement, possiblement dû à une pré-minéralisation plus avancée. En revanche, les tri-composts contenant de la paille de riz (riche en carbone/lignine) et du *Tithonia diversifolia* ont probablement subi une phase initiale d'immobilisation de l'azote avant de le libérer pour les récoltes tardives.

La performance tardive des traitements à base de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia*, et paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + BV + Td, PR + FP + Td) s'aligne avec les études de (Jama *et al*., 2000) qui démontrent que *Tithonia diversifolia* est une ressource de haute qualité pour la biomasse, libérant progressivement N, P et K.

La supériorité numérique du traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) par rapport au témoin soutient les observations de (Ewulo *et al*., 2008), qui ont noté que l'azote uréique du lapin est rapidement assimilable mais gagne à être composté pour un effet durable.

III.3.2. Effet de l'interaction sur la biomasse aérienne (BA)

La biomasse aérienne, qui constitue la partie économiquement utile de l'amarante (feuilles et tiges), suit une tendance similaire à la biomasse totale (Tableau 10). Le tableau ci-après présente les moyennes de Biomasse Aérienne pour chaque combinaison de traitement et de récolte.

Tableau 10: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse aérienne

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3	Récolte 4
FV	5,43 ± 2,67 a	2,70 ± 0,60 ab	2,39 ± 1,32 ab	1,54 ± 0,58 b
PR + BV + UL	4,17 ± 2,70 ab	2,71 ± 0,29 ab	1,61 ± 1,40 ab	2,11 ± 0,41 ab
T	2,88 ± 2,26 ab	1,81 ± 1,02 b	1,26 ± 0,31 b	1,52 ± 0,58 b
PR + FP + Td	2,22 ± 0,17 ab	3,21 ± 0,49 ab	2,69 ± 1,70 ab	2,93 ± 0,33 ab
PR + BV + Td	2,04 ± 0,96 ab	2,79 ± 0,60 ab	2,11 ± 0,85 ab	3,56 ± 0,24 ab
PR + FPo + UL	1,93 ± 0,36 ab	2,73 ± 0,62 ab	3,20 ± 0,83 ab	3,42 ± 0,59 ab
PR + FP + UL	1,64 ± 0,52 b	1,74 ± 1,13 b	2,88 ± 0,47 ab	1,90 ± 0,69 ab
PR + FPo + Td	1,63 ± 1,08 b	2,66 ± 1,51 ab	2,69 ± 0,67 ab	2,62 ± 0,19 ab

L'analyse temporelle montre un déclin marqué du FV (de 5,43 g à la récolte 1 vers 1,54 g à la récolte 4), alors que les tri-composts comme paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia* augmentent (de 2,04 g à la récolte 1 vers 3,56 g à la récolte 4).

La biomasse aérienne est directement corrélée à la disponibilité en Azote (N). Le déclin rapide du traitement du fumier de vache (FV) suggère un épuisement du stock d'azote disponible. À l'inverse, l'augmentation de la biomasse aérienne dans les dernières récoltes pour les traitements de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia*, et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + BV + Td et PR + FPo + UL) confirme l'intérêt agronomique des tri-composts pour les cycles des cultures suivantes.

En comparant le traitement de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FP + Td) et un traitement équivalent sans *Tithonia diversfolia*, l'apport de biomasse est soutenu. Le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) donne un total de 11,27 g contre 9,60 g pour le traitement de paille de riz + fiente de poule et *Tithonia diversifolia*

(PR + FPo + Td). Bien que la différence ne soit pas statistiquement testée, la valeur agronomique de l'urine de lapin semble comparable, voire supérieure dans cette configuration spécifique, à celle du *Tithonia diversifolia*.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de (Olabode *et al*., 2007) qui soulignent que bien que le *Tithonia diversifolia* soit excellent, son efficacité dépend grandement de la synchronisation entre la libération des nutriments et les besoins de la plante. L'urine de lapin (riche en N) combinée à la paille (source de C) dans le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) semble avoir créé un équilibre C/N favorable à une production foliaire soutenue (Akanbi *et al*., 2010).

III.3.3. Effet de l'interaction sur la biomasse racinaire (BR)

Le tableau 11 suivant présente les moyennes de Biomasse Racinaire pour chaque combinaison de traitement et de récolte, conformément à la signification statistique de l'interaction (p=0,00328).

Tableau 11: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur la biomasse racinaire

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3	Récolte 4
FV	0,96 ± 0,63 a	0,50 ± 0,06 ab	0,29 ± 0,18 b	0,13 ± 0,07 b
PR + BV + UL	0,62 ± 0,31 ab	0,35 ± 0,11 b	0,18 ± 0,16 b	0,21 ± 0,11 b
T	0,43 ± 0,31 ab	0,29 ± 0,13 b	0,11 ± 0,04 b	0,14 ± 0,08 b
PR + FP + Td	0,40 ± 0,07 ab	0,48 ± 0,23 ab	0,34 ± 0,28 b	0,41 ± 0,0 ab
PR + FPo + UL	0,31 ± 0,11 b	0,49 ± 0,10 ab	0,46 ± 0,15 ab	0,49 ± 0,10 ab
PR + FPo + Td	0,26 ± 0,15 b	0,56 ± 0,11 ab	0,29 ± 0,08 b	0,31 ± 0,05 b
PR + BV + Td	0,24 ± 0,06 b	0,43 ± 0,09 ab	0,25 ± 0,13 b	0,39 ± 0,04 ab
PR + FP + UL	0,23 ± 0,07 b	0,35 ± 0,15 b	0,33 ± 0,05 b	0,07 ± 0,06 b

Le tableau des groupes homogènes décompose cette interaction et révèle une évolution distincte de la disponibilité des nutriments selon le type de fertilisant.

A la récolte 1 (Effet immédiat), le traitement FV (Fumier de Vache) domine statistiquement avec la moyenne la plus élevée (0,96 ± 0,63 a), classé dans le groupe a. Les tri-composts, notamment de paille de riz+ fumier de porc et urine de lapin (0,23 g) et de paille de riz + bouse de vache et

Tithonia diversifolia (0,24g), se trouvent dans le groupe inférieur b. Cela indique une libération rapide de l'azote par le fumier de la vache comparée à une immobilisation initiale dans les composts.

Pour la deuxième et la troisième récolte, on observe un chassé-croisé. La performance du fumier de vache (FV) chute drastiquement (tombant à 0,29 g à la récolte 3). À l'inverse, les tri-composts comme les traitements de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia divesifolia* (0,48 g à la récolte 2) et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (0,49 g à récolte 2 et 0,46g à la récolte 3) augmentent leur production, restant dans les groupes supérieurs ab, tandis que le Témoin (T) s'effondre dans le groupe b (0,11g à la récolte 3).

A la Récolte 4 (Effet résiduel), la tendance s'inverse complètement par rapport à la première récolte. Les tri-composts, particulièrement de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia* (0,49 g) et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (0,39 g), affichent les valeurs nominales les plus hautes. Le traitement du fumier de vache (FV) rejoint le groupe statistique le plus bas b (0,13 g), ne se distinguant plus significativement du témoin T (0,14g).

Les résultats des groupes confirment que la nature de l'amendement influence la cinétique de production de la biomasse aérienne (feuilles et tiges). La supériorité initiale du FV (groupe a à la récolte 1) s'explique par la présence d'azote minéral rapidement disponible dans le fumier de vache non composté avec des matériaux cellulosiques. Cependant, cette ressource s'épuise vite, comme l'indique son déclassement vers le groupe b à la récolte 4.

À l'inverse, les traitements de paille de riz+ bouse de vache et *Tithonia diversifolia* (PR+BV+Td) et de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia divesifolia* (PR+FP+Td) montrent une stabilité remarquable. Ceci corrobore les travaux de (Jama *et al*., 2000), qui stipulent que la biomasse de *Tithonia diversifolia* accumule des nutriments (N, P, K) en concentrations élevées et les libère progressivement lorsqu'elle est incorporée au sol, évitant les pertes par lessivage observées avec les engrais minéraux ou les fumiers trop solubles.

L'analyse des groupes à la récolte 4 met en lumière l'efficacité du traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) qui atteint 0,49 g. Bien que classé statistiquement dans le même groupe ab que les traitements à base de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia* (PR + BV + Td), sa valeur élevée en fin de cycle valide l'hypothèse H3.

L'urine de lapin, bien que liquide et rapidement minéralisable, semble avoir été stabilisée efficacement par le processus de compostage avec la paille de riz (riche en carbone).

Selon (Olabode *et al.*, 2007) et (Ewulo *et al*., 2008), l'apport d'urine améliore le rapport C/N du compost, favorisant une activité microbienne soutenue qui prolonge la disponibilité des nitrates pour la plante.

La faible performance initiale des composts (groupes b à la récolte 1 pour le traitement de paille de riz + fumier de porc et urine de lapin (PR + FP + UL) et de paille de riz + fiente de poule et *Tithonia diversifolia* (PR + FPo + Td) suivie d'une remontée suggère une phase d'organisation microbienne de l'azote, souvent observée lors de l'apport de paille de riz. Une fois cette phase passée, la minéralisation nette profite à la récolte suivante (récoltes 3 et 4), conférant aux tri-composts une valeur résiduelle supérieure à la fumure simple.

III.3.4. Effet de l'interaction sur le ratio biomasse racinaire/biomasse totale (BR/BT)

Bien que l'interaction Traitement & Récolte pour le ratio BR/BT ne soit pas significative au seuil de 5 % (p=0,093), les résultats bruts des comparaisons de moyennes sont présentés pour l'exhaustivité des données.

Tableau 12: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur le rapport BR/BT

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3	Récolte 4
PR + FP + Td	0,15 ± 0,01 a	0,13 ± 0,04 abcde	0,10 ± 0,02 bcde	0,12 ± 0,01 abcde
FV	0,15 ± 0,02 a	0,16 ± 0,02 abc	0,1 ± 0,03 bcde	0,08 ± 0,01 de
PR + FPo + Td	0,14 ± 0,02 a	0,19 ± 0,05 a	0,10 ± 0,01 cde	0,11 ± 0,01 bcde
PR + BV + UL	0,14 ± 0,02 a	0,12 ± 0,03 abcde	0,07 ± 0,06 e	0,09 ± 0,03 cde
PR + FPo + UL	0,13 ± 0,02 a	0,15 ± 0,01 abcd	0,13 ± 0,03 abcde	0,13 ± 0,01 abcde
T	0,13 ± 0,01 a	0,15 ± 0,05 abcde	0,08 ± 0,01 cde	0,08 ± 0,02 cde
PR + FP + UL	0,12 ± 0,01 a	0,18 ± 0,03 ab	0,10 ± 0,00 bcde	0,08 ± 0,01 cde
PR + BV + Td	0,11 ± 0,03 a	0,13 ± 0,01 abcde	0,10 ± 0,02 bcde	0,10 ± 0,00 bcde

Le ratio est plus élevé lors des premières récoltes (1 et 2, groupes a, moyenne 0,13-0,15) et chute significativement à la troisième et quatrième récolte (groupes b, moyenne 0,10). Peu de différences

significatives existent entre les traitements eux-mêmes (p=0,0267 globalement, mais groupes très chevauchants abcd). Cela signifie que quel que soit le fertilisant, l'amarante privilégie d'abord l'installation (racines), puis la production de feuilles (biomasse aérienne).

Ces résultats illustrent parfaitement le principe d'allocation de biomasse. Une fois le système racinaire établi, la plante redirige ses photosynthétats vers les parties aériennes. Un ratio BR/BT faible en fin de cycle (autour de 0,10 en moyenne) est en réalité pour un indicateur de bonne fertilité du sol. En effet, lorsque l'eau et les nutriments sont abondants (grâce à la minéralisation des composts), la plante a besoin de moins de racines pour nourrir une grande biomasse aérienne.

Ces résultats confirment avec ceux de (Bigirimana *et al*., 2017) à l'ISABU sur la valorisation du *Tithonia diversifolia* qui soulignent que la plante permet de soutenir une croissance végétative vigoureuse (donc un ratio BR/BT faible). Le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) agit de même, sa richesse en azote stimule la croissance foliaire, réduisant mécaniquement la part relative des racines dans la biomasse totale, ce qui est l'objectif recherché pour un légume-feuille.

III.3.5. Effet de l'interaction sur le ratio biomasse racinaire/biomasse aérienne (BR/BA)

De même, l'interaction Traitement & Récolte pour le ratio BR/BA (Tableau 13) n'est pas significative au seuil alpha de 0,05 (P=0,0789), mais les résultats bruts des comparaisons de moyennes sont inclus.

Tableau 13: Effet de l'interaction Traitement x Récolte sur le rapport BR/BA

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3	Récolte 4
PR + FP + Td	0,18 ± 0,02 a	0,14 ± 0,05 abcd	0,12 ± 0,03 bcd	0,14 ± 0,01 abcd
FV	0,17 ± 0,03 a	0,19 ± 0,02 abc	0,12 ± 0,03 bcd	0,08 ± 0,02 cd
PR + FPo + Td	0,16 ± 0,03 a	0,24 ± 0,08 a	0,11 ± 0,01 cd	0,12 ± 0,01 bcd
PR + BV + UL	0,16 ± 0,03 a	0,13 ± 0,04 bcd	0,08 ± 0,07 d	0,10 ± 0,03 cd
PR + FPo + UL	0,16 ± 0,03 a	0,18 ± 0,01 abcd	0,14 ± 0,04 abcd	0,14 ± 0,02 cd
T	0,15 ± 0,01 a	0,18 ± 0,07 abcd	0,09 ± 0,020 cd	0,09 ± 0,02 cd
PR + FP + UL	0,14 ± 0,01 a	0,22 ± 0,04 ab	0,12 ± 0,00 bcd	0,09 ± 0,02 cd
PR + BV + Td	0,12 ± 0,03 b	0,15 ± 0,02 abcd	0,12 ± 0,02 bcd	0,11 ± 0,00 cd

Les ratios sont les plus élevés, atteignant une moyenne de 0,18 à la récolte 1. Cela traduit une allocation prioritaire vers l'ancrage et l'exploration du sol. Le ratio chute brutalement pour se stabiliser autour de 0,11. La plante redirige alors massivement ses assimilats vers la partie aérienne.

Le fumier (FV) présente la chute la plus drastique (passe de 0,19 à la deuxième récolte à 0,08 à la quatrième récolte). Les tri-composts, tels que paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversfolia* (PR + FP + Td) et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL), maintiennent un ratio plus équilibré en fin de cycle (0,14 à R4), indiquant la persistance d'un système racinaire fonctionnel capable de soutenir la croissance aérienne tardive**.**

La diminution générale du ratio BR/BA au cours du temps est conforme au modèle de l'équilibre fonctionnel. Lorsque la fertilité du sol est élevée (disponibilité en eau et nutriments), la plante alloue moins de carbone aux racines car l'absorption est facilitée.

Les faibles ratios observés sous fumier de vache (FV) et Témoin (T) en fin de cycle (0,08 - 0,09). Pour le Témoin, cela reflète souvent un épuisement général (plantes chétives). Pour le FV, cela suggère une sénescence racinaire rapide après le boom initial d'azote minéral.

Les traitements de paille de riz + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FP + Td) et de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) favorisent un équilibre structurel. La richesse en phosphore du *Tithonia diversifolia* stimule la croissance racinaire, mais sa minéralisation progressive assure que cette croissance ne se fait pas au détriment des feuilles. Cela rejoint les résultats de (Nijimbere *et al*., 2023), qui notent que les composts enrichis en *Tithonia diversifolia* au Burundi induisent une vigueur végétative globale (aérienne et souterraine) supérieure aux fumures classiques.

Le traitement de paille de riz + fiente de poule et urine de lapin (PR + FPo + UL) affiche un ratio de 0,14 à la récolte 4 identique à celui du paille + fumier de porc et *Tithonia diversifolia* (PR + FP + Td), Cela confirme l'hypothèse H3. L'urine de lapin, une fois compostée avec une source de carbone (paille), permet un développement physiologique comparable à celui obtenu avec le *Tithonia diversifolia*. L'azote de l'urine booste la biomasse aérienne (le dénominateur augmente), mais l'amélioration structurelle du sol par le compost maintient la biomasse racinaire (le numérateur reste stable), aboutissant à ce ratio équilibré.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion

La présente étude avait pour objectif d'évaluer les effets directs et résiduels de différents tri-composts élaborés à partir de paille de riz, de fumures animales et enrichis soit par la biomasse de *Tithonia diversifolia*, soit par l'urine de lapin, sur la production de l'amarante (*Amaranthus spp.*). Cette démarche s'inscrit dans une logique d'agriculture durable visant la valorisation des ressources organiques locales et la réduction de la dépendance aux engrais minéraux de synthèse.

Les résultats obtenus montrent globalement que le fumier de vache est supérieur à la première récolte tandis qu'à la quatrième récolte (Effet résiduel), le traitements de paille de riz + bouse de vache et *Tithonia diversifolia* montre la biomasse la plus élevée, ce qui indique une libération lente et soutenue des nutriments, mais pour un cycle complet de quatre récolte les tri composts de paille de riz, fiente de poule et urine de lapin et paille de riz+ fumier de porc et *Tithonia diversifolia* égalent la performance du fumier de vache tout en améliorant la fertilité du sol à long terme. Cette amélioration du tri compost est attribuable à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs, à l'augmentation de la matière organique du sol et à l'amélioration des conditions physico-chimiques favorables à la croissance végétale. L'effet direct observé dès le premier cycle de culture confirme l'efficacité agronomique des composts enrichis, tandis que la persistance des rendements sur les cycles suivants met en évidence leur valeur résiduelle.

La comparaison entre les deux types d'enrichissement indique que le tri-compost enrichi à la *Tithonia diversifolia* tend à présenter une performance agronomique durable, probablement liée à sa richesse en azote et en phosphore ainsi qu'à sa capacité à améliorer la structure et la stabilité de la matière organique du sol. Toutefois, les composts enrichis à l'urine de lapin se distinguent par une mise à disposition plus rapide des nutriments, traduisant un effet direct marqué sur la croissance végétative de l'amarante. Ces résultats suggèrent que les deux enrichisseurs possèdent des avantages agronomiques complémentaires.

Par ailleurs, l'évolution du pH et de la conductivité électrique du sol après plusieurs cycles culturaux montre que les composts testés contribuent à stabiliser la réaction du sol et à maintenir une disponibilité ionique compatible avec une production végétale durable

. Ainsi, l'utilisation du tri-compost enrichi apparaît comme une stratégie pertinente pour améliorer à la fois la fertilité immédiate et la fertilité à moyen, à long terme des sols cultivés.

En définitive, cette étude confirme que le tri-compost à base de paille de riz, de fumures animales et d'enrichisseurs biologiques constitue une alternative crédible et écologiquement durable pour la production maraîchère, en particulier dans les systèmes agricoles tropicaux à faibles intrants.

Recommandations

Au regard des résultats obtenus et des enseignements tirés de cette étude, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

Du point de vue agronomique :

- Promouvoir l'utilisation des tri-composts enrichis comme amendements organiques prioritaires dans la culture de l'amarante et d'autres cultures maraîchères exigeantes en nutriments.
- Adapter le choix de l'enrichisseur en fonction des objectifs de production :
    - ✓ privilégier la *Tithonia diversifolia* pour une amélioration durable de la fertilité du sol et une meilleure valeur résiduelle,
    - ✓ utiliser l'urine de lapin lorsque l'objectif principal est une réponse rapide de la culture en début de cycle.

Pour les producteurs :

- Encourager la valorisation des résidus agricoles (paille de riz) et des déchets d'élevage disponibles localement afin de réduire les coûts de production et la dépendance aux intrants externes.
- Veiller à la bonne maturité des composts avant leur application afin d'éviter les risques de phytotoxicité ou d'immobilisation de l'azote.
- Sensibiliser les agriculteurs aux bonnes pratiques de collecte, de stockage et d'utilisation de l'urine de lapin pour limiter les pertes d'azote par volatilisation.

Pour la recherche future:

- Étendre les essais en conditions de plein champ afin de valider les résultats obtenus sous serre et d'évaluer l'impact des facteurs climatiques.
- Étudier l'effet des tri-composts enrichis sur d'autres cultures vivrières et maraîchères afin d'élargir leur domaine d'application.
- Analyser l'évolution à long terme des propriétés biologiques du sol (activité microbienne, biomasse microbienne) afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à l'effet résiduel observé.
- Evaluer la qualité nutritionnelle d'amarante récoltée sur le sol enrichi des tri-composts

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Agré, A.P., Sanoussi, A.F., Dossou-Amino, I., Dassou, A., Rudebjer, P., Hall, R., & Vadouhe, R. (2016). Plan d'actions stratégiques pour la promotion de la chaine de valeur de l'Amarante (Amarantus spp) au Bénin. International Journal of Neglected and Underutilized species, 15(2), 33-41.
2. Akanbi, W. B., Ojo, A. E., Olaniran, O. A., & Adebisi, M. A. (2010). Effect of complementary organic and inorganic fertilizers on the performance and yield of Amaranthus cruentus (L.). Nature and Science, 8(7), 163-172.
3. Altieri, M. A. (2017). Agroecology : The Science of Sustainable Agriculture. CRC Press.
4. Alvarez, R., Díaz, R. A., Barbero, N., Santanatoglia, O. J., & Blotta, L. (1998). Soil organic carbon, microbial biomass and CO_2-C production from three tillage systems. Soil and Tillage Research, 50(3–4), 201–207.
5. Baize, D. (1988). Guide des analyses courantes en pédologie. Editions INRA, Paris (France), 172 p.
6. Balesdent, J. (2005). The dynamics of organic matter in soil : Concepts and models. Biogeochemistry, 76, 139–150.
7. Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. Bioresource Technology, 100(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027
8. Bigirimana, J. C., Mboninyibuka, A., Nibasumba, A., Havyarimana, D., & Ndayizeye, A. (2017). Recherche Agronomique : Amont de l'Agriculture et de l'Elevage au Burundi.
9. Bolan, N. S., Szogi, A. A., Chuasavathi, T., Seshadri, B., Rothrock Jr, M. J., & Panneerselvam, P. (2010). Uses and management of poultry litter. World's Poultry Science Journal, 66(4), 673–698. https://doi.org/10.1017/S0043933910000656
10. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.

11. Brussaard, L., De Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. Agriculture, Ecosystems & Environment, 121(3), 233–244. https://doi.org/10.1016/j.agee

12. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Okorokova-Façanha, A. L., & Façanha, A. R. (2002). Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H+-ATPase activity in maize roots. Plant Physiology, 130(4), 1951–1957. https://doi.org/10.1104/pp.00708

13. Caviglia, C. com-Michael. (2024). Diagramme Climatique de Bujumbura | Aperçu Météo de Bujumbura, Burundi. https://www.climechart.com/fr/graphique-climatique/bujumbura/burundi

14. Coleman, D. C., Callaham, M. A., & Crossley, D. A. (2018). Fundamentals of soil ecology (3rd ed.). Academic Press.

15. Condron, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2005). Chemistry and Dynamics of Soil Organic Phosphorus. In Phosphorus : Agriculture and the Environment (p. 87-121). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c4

16. Council, N. R. (1984). Amaranth : Modern Prospects for an Ancient Crop. National Academies Press.

17. Dendooven, L., Govaerts, B., & Van Tiel, N. (2012). Liquid organic fertilizers : Effects on soil fertility and crop productivity. Agroecology and Sustainable Food Systems, 36(5), 539-559.

18. Diacono, M. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. Renewable Agriculture and Food Systems, 25(2), 122–135.

19. Ewulo, B. S., Olabode, O. S., & Ajayi, B. A. (2008). Utilization of poultry manure and rabbit urine as substituted mineral fertilizer for sustainable production of okra (Abelmoschus esculentus L. Moench). Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2(3), 675-679.

20. FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.

21. Fardeau J-C. (2015). Des indicateurs de la fertilité des sols. Etudes et gestion des sols, 22 : 77—100.

22. Fungo, B., Lehmann, J., Kalbitz, K., & Neff, J. (2011). Nutrient release and decomposition of Tithonia diversifolia and other green manures in tropical soils. Soil Biology & Biochemistry, 43(2), 366–373.

23. Garg, V. K., & Kaushik, P. (2005). Vermistabilization of textile mill sludge spiked with poultry droppings by an epigeic earthworm Eisenia foetida. Bioresource Technology, 96(9), 1063-1071. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.003

24. Groot, J. C. J., Tittonell, P., & Lesschen, J. P. (2018). Multi-scale modeling of sustainable rice-based farming systems in West Africa. Agricultural Systems, 164, 25-37.

25. Hossain, S. (2014). Effects of compost on soil properties and environment. American Journal of Environmental Protection, 3(2), 35-41.

26. Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. Journal of Soil and Water Conservation, 49(2), 189–194.

27. Hue, N. V., Craddock, G. R., & Adams, F. (1986). Effect of Organic Acids on Aluminum Toxicity in Subsoils. Soil Science Society of America Journal, 50(1), 28-34. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010006x

28. Jacques F. (2021). Evaluation de la fertilité de différents types de buttes de style permacole. Master Bio-ingénieur en Sciences Agronomiques, UFR Agro-Bio Tech (GxABT), Université de Liège-Grembloux (Liège, Bruxelle), 62 p.

29. Jama, B., Palm, C. A., Buresh, R. J., & Niang, A. (2007). Tithonia diversifolia as a green manure for soil fertility improvement. Agroforestry Systems, 71(1), 1-10.

30. Jama, B., Palm, C. A., Buresh, R. J., Niang, A., Gachengo, C., Nziguheba, G., & Amadalo, B. (2000). Tithonia diversifolia as a green manure for soil fertility improvement in western Kenya : A review. Agroforestry Systems, 49(2), 201-221. https://doi.org/10.1023/A:1006339025728

31. Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere – a critical review. Plant and Soil, 205(1), 25-44. https://doi.org/10.1023/A:1004356007312

32. Kaboneka,S., Nijimbere,S., & Nahayo, F. (2021). Appliqués seuls, les engrais minéraux azotés et phosphatés accélèrent la dégradation de la matière organique d'un sol acide d'altitude de Mugamba sud (Burundi),31(1),8-14.

33. Kirchmann, H., & Witter, E. (1992). Composition of fresh, aerobic and anaerobic farm animal dungs. Bioresource Technology, 40(2), 137-142. https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90199-8

34. Kong, Y., Zhang, J., Zhang, X., Gao, X., Yin, J., Wang, G., Li, J., Li, G., Cui, Z., & Yuan, J. (2024). Applicability and limitation of compost maturity evaluation indicators : A review. Chemical Engineering Journal, 489, 151386. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151386

35. Kouame, A. E., Aké, N. A., & Séri, B. (2016). Valorisation du compost et de la biomasse de Tithonia diversifolia pour la production d'amarante (Amaranthus cruentus L.). Journal of Applied Biosciences, 97(1), 9187-9199.

36. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, 7(5), 5875-5896.

37. Mayumi Tokura A., Furtini Neto A. E., Curi N., Faquin V., Hissao Kurihara C., & Alovisi A.A. (2002). Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. Pesq. Agropec. Bras., 37. 10 : 1467-1476.

38. McCauley A., Jones C., & Olson-Rutz K. (2017). Soil pH and Organic Matter. Nutrient Management, 8 : 1—16.

39. Mugabe, R. G., Mpairwe, D., & Nabaasa, K. (2019). Potential of rabbit urine as a liquid organic fertilizer in crop production. African Journal of Agricultural Research, 14(3), 162-171.

40. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. Soil Biology & Biochemistry, 34(11), 1527–1536. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8

41. Nijimbere, S., Kwizera, C., Irakoze, W., & Mbonihankuye, C. (2023). Effets des composts de Lantana camara Linn, d'Erythrina abyssinica Lam. Ex DC. et de Tithonia diversifolia (Hemsl) A. Gray et du fumier de chèvre sur le.

42. Nyeko, P., Edwards, P., & Smith, J. (2010). Root and shoot allometry in fast-growing leafy vegetables under organic fertilization. African Crop Science Journal, 18(3), 123–134.

43. Nziguheba, G., Palm, C. A., & Buresh, R. J. (2000). Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic inputs and their combinations in a field trial in western Kenya. Plant and Soil, 223(2), 221-235.

44. Oberson, A., & Joner, E. J. (2005). Microbial turnover of phosphorus in soil. Encyclopedia of Soils in the Environment, 245–255. https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00249-6

45. Olabode, O. S., Olabode, C. T., & Adetunji, M. T. (2007). Soil fertility improvement and vegetable yield as influenced by Tithonia green manure and inorganic fertilizer. World Journal of Agricultural Sciences, 3(1), 1-8.

46. Palm, C. A., Gachengo, C. N., Delve, R., Cadisch, G., & Giller, K. E. (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems : Application of an organic resource database. Agriculture, Ecosystems & Environment, 83(1–2), 27–42.

47. Palm, C. A., Gachengo, C. N., & Nziguheba, G. (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 86(2), 173-194.

48. Paul, E. A. (Éd.). (2007). Soil microbiology, ecology, and biochemistry (3rd ed). Academic Press.

49. Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Castellanos, S., & Wright, I. J. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots : Meta-analyses of interspecific variation. Functional Ecology, 26(5), 1141–1150.

50. Recous, S., & Mary, B. (1990). Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils. Soil Biology & Biochemistry, 22(7), 913–922. https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90033-9

51. Robert ,M. (1996). Le sol. Interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson. Ed. Paris. 244.

52. Robert, M. (2002). Rapport sur les ressources en sols du monde N° 96. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion de terres. Rapport INRA-FAO Rome. 62.

53. Rousk, J. (2009). Soil microbial community responses to pH. Applied and Environmental Microbiology, 75(13), 3745–3751.

54. Sall, S., Lamine, K., & Diatta, M. (2013). Residual effect of organic fertilizers on soil chemical properties and maize yield in Senegal. Journal of Agricultural Science and Technology B, 3(10), 785-794.

55. Sanchez, P. A. (2019). Soil fertility and hunger in Africa. Science, 325(5947), 1492-1493.

56. Sánchez, S., Rodríguez, A., & Carrillo, C. (2017). Growth dynamics and nutrient accumulation in Amaranthus species. Journal of Plant Nutrition, 40(12), 1730–1741.

57. Schvarty,c., Muller, J.,C., & Decroux ,J. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et prairies. France Agricole, Paris (France), 46 p.

58. Sindayihebura, E. (2013). Contribution à l'étude de l'influence de la fumure organo-minérale sur la croissance et la production de l'amarante (Amaranthus cruentus var Indundi) dans des conditions écologiques de l'Imbo : Cas du service maraicher et fruitier de Ngagara. Mémoire de fin d'études, Université du Burundi.

59. Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation : A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Soil Biology & Biochemistry, 32(14), 2099–2103. [Image].

60. Smaling, E. M. A., & Braun, A. R. (2005). Soil fertility degradation. In Encyclopedia of Soils in the Environment (pp. 58-65). Elsevier.

61. Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2007).

Greenhouse gas mitigation in agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1492), 789-813. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184

62. Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1492), 789-813. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184

63. Stevenson, F. J. (1994). Humus chemistry : Genesis, composition, reactions (2nd ed). John Wiley.

64. Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). Principles and Applications of Soil Microbiology.

65. Taboada M.A., F.G. Micucci D.J., & Cosentino R.S. Lavado. (1998). Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. Soil and Tillage Research. 49 : 57—63.

66. Tognetti, C., Mazzarino, M. J., & Laos, F. (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. Bioresource Technology, 98(5), 1067-1076. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.025

67. Tsoho, G. A., Muhammad, A. I., & Bako, M. M. (2015). Growth and yield of Amaranth (Amaranthus cruentus L.) as influenced by different levels of compost and nitrogen fertilizer. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 5(2), 80-87.

68. Vanlauwe, B., Aihou, K., Sanginga, N., Ndung'u-Magiroi, K. W., & Vanlauwe, B. (2003). Integrated soil fertility management : Operational definition and consequences for research and development. CABI.

69. Wang, J., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). Comparative effects of composted manure and different mineral fertilizers on soil properties and crop yield. Journal of Integrative Agriculture, 19(5), 1163-1175.

ANNEXES

Annexes A : Données des biomasses totales, foliaires et racinaires sur les quatre récoltes

Traitement	Récolte	Répétition	BTen g	BA en g	BR en g	BR/BT en g	BR/BA en g
1	1	1	3,4	3,125	0,275	0,0808824	0,088
1	1	2	1,5	1,33	0,17	0,1133333	0,1278195
1	1	3	1,91	1,65	0,26	0,1361257	0,1575758
1	2	1	3,44	2,94	0,5	0,1453488	0,170068
1	2	2	2,45	2,12	0,33	0,1346939	0,1556604
1	2	3	3,75	3,3	0,45	0,12	0,1363636
1	3	1	2,49	2,275	0,215	0,0863454	0,0945055
1	3	2	3,248	2,857	0,391	0,1203818	0,1368568
1	3	3	1,318	1,183	0,135	0,1024279	0,1141167
1	4	1	4,23	3,8	0,43	0,1016548	0,1131579
1	4	2	3,683	3,33	0,353	0,0958458	0,106006
1	4	3	3,925	3,54	0,385	0,0980892	0,1087571
2	1	1	2,77	2,334	0,436	0,1574007	0,1868038
2	1	2	2,35	2,03	0,32	0,1361702	0,1576355
2	1	3	2,75	2,31	0,44	0,16	0,1904762
2	2	1	3,86	3,39	0,47	0,1217617	0,1386431
2	2	2	2,9	2,65	0,25	0,0862069	0,0943396
2	2	3	4,3	3,58	0,72	0,1674419	0,2011173
2	3	1	5,03	4,382	0,648	0,128827	0,1478777
2	3	2	1,08	0,982	0,098	0,0907407	0,0997963
2	3	3	2,972	2,694	0,278	0,0935397	0,1031923
2	4	1	3,43	2,979	0,451	0,1314869	0,1513931
2	4	2	3,662	3,23	0,432	0,1179683	0,1337461
2	4	3	2,942	2,585	0,357	0,121346	0,1381044
3	1	1	3,3	2,87	0,43	0,130303	0,1498258
3	1	2	1,15	0,96	0,19	0,1652174	0,1979167

Traitement	Récolte	Répétition	BTen g	BA en g	BR en g	BR/BT en g	BR/BA en g
3	1	3	1,21	1,06	0,15	0,1239669	0,1415094
3	2	1	5,08	4,39	0,69	0,1358268	0,1571754
3	2	2	2,16	1,64	0,52	0,2407407	0,3170732
3	2	3	2,42	1,95	0,47	0,1942149	0,2410256
3	3	1	3,485	3,12	0,365	0,1047346	0,1169872
3	3	2	3,34	3,029	0,311	0,0931138	0,1026741
3	3	3	2,125	1,924	0,201	0,0945882	0,1044699
3	4	1	2,91	2,63	0,28	0,0962199	0,1064639
3	4	2	3,179	2,805	0,374	0,1176471	0,1333333
3	4	3	2,713	2,432	0,281	0,1035754	0,1155428
4	1	1	4,19	3,59	0,6	0,1431981	0,1671309
4	1	2	8,06	7,12	0,94	0,1166253	0,1320225
4	1	3	2,14	1,81	0,33	0,1542056	0,1823204
4	2	1	3,04	2,8	0,24	0,0789474	0,0857143
4	2	2	3,4	2,94	0,46	0,1352941	0,1564626
4	2	3	2,75	2,39	0,36	0,1309091	0,1506276
4	3	1	2,76	2,49	0,27	0,0978261	0,1084337
4	3	2	0	0	0	0	0
4	3	3	2,62	2,34	0,28	0,1068702	0,1196581
4	4	1	2,326	2,108	0,218	0,0937231	0,1034156
4	4	2	1,805	1,701	0,104	0,0576177	0,0611405
4	4	3	2,843	2,525	0,318	0,1118537	0,1259406
5	1	1	2,01	1,74	0,27	0,1343284	0,1551724
5	1	2	1,23	1,08	0,15	0,1219512	0,1388889
5	1	3	2,38	2,11	0,27	0,1134454	0,1279621
5	2	1	1,6	1,29	0,31	0,19375	0,2403101
5	2	2	1,12	0,9	0,22	0,1964286	0,2444444
5	2	3	3,54	3,02	0,52	0,1468927	0,1721854
5	3	1	3,55	3,19	0,36	0,1014085	0,1128527

Traitement	Récolte	Répétition	BTen g	BA en g	BR en g	BR/BT en g	BR/BA en g
5	3	2	3,48	3,12	0,36	0,1034483	0,1153846
5	3	3	2,62	2,34	0,28	0,1068702	0,1196581
5	4	1	1,408	1,278	0,13	0,0923295	0,1017214
5	4	2	1,914	1,773	0,141	0,0736677	0,0795262
5	4	3	2,892	2,645	0,247	0,085408	0,0933837
6	1	1	2,57	2,18	0,39	0,151751	0,1788991
6	1	2	2,43	2,08	0,35	0,1440329	0,1682692
6	1	3	1,7	1,52	0,18	0,1058824	0,1184211
6	2	1	2,39	2,02	0,37	0,1548117	0,1831683
6	2	2	3,53	2,97	0,56	0,1586402	0,1885522
6	2	3	3,73	3,19	0,54	0,1447721	0,169279
6	3	1	2,72	2,43	0,29	0,1066176	0,1193416
6	3	2	4,6	4,08	0,52	0,1130435	0,127451
6	3	3	3,67	3,09	0,58	0,1580381	0,1877023
6	4	1	4,242	3,778	0,464	0,1093824	0,1228163
6	4	2	4,328	3,733	0,595	0,1374769	0,1593892
6	4	3	3,14	2,737	0,403	0,1283439	0,1472415
7	1	1	10,07	8,39	1,68	0,1668322	0,2002384
7	1	2	3,75	3,2	0,55	0,1466667	0,171875
7	1	3	5,34	4,69	0,65	0,1217228	0,1385928
7	2	1	3,04	2,53	0,51	0,1677632	0,201581
7	2	2	2,64	2,2	0,44	0,1666667	0,2
7	2	3	3,92	3,37	0,55	0,1403061	0,1632047
7	3	1	1,04	0,96	0,08	0,0769231	0,0833333
7	3	2	3,05	2,65	0,4	0,1311475	0,1509434
7	3	3	3,97	3,57	0,4	0,1007557	0,1120448
7	4	1	0,936	0,879	0,057	0,0608974	0,0648464
7	4	2	1,938	1,768	0,17	0,0877193	0,0961538
7	4	3	2,135	1,963	0,172	0,0805621	0,087621

Traitement	Récolte	Répétition	BTen g	BA en g	BR en g	BR/BT en g	BR/BA en g
8	1	1	2,06	1,79	0,27	0,131068	0,150838
8	1	2	1,6	1,37	0,23	0,14375	0,1678832
8	1	3	6,25	5,47	0,78	0,1248	0,142596
8	2	1	1,28	1,02	0,26	0,203125	0,254902
8	2	2	1,63	1,45	0,18	0,1104294	0,1241379
8	2	3	3,4	2,96	0,44	0,1294118	0,1486486
8	3	1	1	0,93	0,07	0,07	0,0752688
8	3	2	1,45	1,31	0,14	0,0965517	0,1068702
8	3	3	1,67	1,54	0,13	0,0778443	0,0844156
8	4	1	2,304	2,066	0,238	0,1032986	0,1151985
8	4	2	0,99	0,913	0,077	0,0777778	0,0843373
8	4	3	1,696	1,579	0,117	0,0689858	0,0740975

Annexes B : Données biomasses cumulées sur les quatre récoltes

Traitement	Répétition	BT en g	BA en g	BR en g	BR/BT en g	BR/BA en g
T1	1	13,56	12,14	1,42	0,41423142	0,46573142
	2	10,881	9,637	1,244	0,46425476	0,52634278
	3	10,903	9,673	1,23	0,45664275	0,51681311
T2	1	15,09	13,085	2,005	0,5394763	0,6247176
	2	9,992	8,892	1,1	0,43108617	0,48551755
	3	12,964	11,169	1,795	0,54232759	0,63289024
T3	1	14,775	13,01	1,765	0,46708431	0,53045224
	2	9,829	8,434	1,395	0,61671896	0,75099732
	3	8,468	7,366	1,102	0,51634543	0,60254769
T4	1	12,316	10,988	1,328	0,41369468	0,4646945
	2	13,265	11,761	1,504	0,30953716	0,34962556
	3	10,353	9,065	1,288	0,5038386	0,57854677
T5	1	8,568	7,498	1,07	0,52181635	0,6100566
	2	7,744	6,873	0,871	0,49549578	0,57824418
	3	11,432	10,115	1,317	0,45261628	0,51318938
T6	1	11,922	10,408	1,514	0,5225627	0,60422527
	2	14,888	12,863	2,025	0,55319352	0,64366163
	3	12,24	10,537	1,703	0,53703657	0,62264382
T7	1	15,086	12,759	2,327	0,47241585	0,54999916
	2	11,378	9,818	1,56	0,53220017	0,61897224
	3	15,365	13,593	1,772	0,4433467	0,5014633
T8	1	6,644	5,806	0,838	0,50749157	0,59620722
	2	5,67	5,043	0,627	0,42850895	0,48322872
	3	13,016	11,549	1,467	0,40104193	0,44975774

Annexes C : Données de pH et CE après la dernière récolte

Traitement	Répétition	PH	CE en µS/cm
T1	1	8,74	0,031
	2	8,58	0,027
	3	8,56	0,02
T2	1	8,51	0,019
	2	8,22	0,021
	3	8,7	0,025
T3	1	8,16	0,026
	2	8,04	0,028
	3	8,39	0,027
T4	1	8,11	0,028
	2	8,27	0,034
	3	8,29	0,029
T5	1	8,45	0,026
	2	8,32	0,027
	3	8,22	0,028
T6	1	8,22	0,024
	2	8,11	0,025
	3	8,21	0,026
T7	1	8,65	0,039
	2	8,99	0,044
	3	9,09	0,037
T8	1	9,27	0,045
	2	8,96	0,037
	3	8,94	0,043