

2025-01

Essai d'amélioration de la teneur en phosphore des composts produits par co-compostage des pailles de riz et d'adjuvants organiques avec les phosphates naturels de Matongo

Igiraneza, Fulgence

UB, FS

<https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2221>

Téléchargé depuis le dépôt institutionnel officiel de l'Université du Burundi

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE
L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : Eau et Assainissement



**ESSAI D'AMELIORATION DE LA TENEUR EN PHOSPHORE DES
COMPOSTS PRODUITS PAR CO-COMPOSTAGE DES PAILLES DE RIZ
ET D'ADJUVANTS ORGANIQUES AVEC LES PHOSPHATES
NATURELS DE MATONGO**

Par

IGIRANEZA Fulgence

MÉMOIRE

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

Sous la direction de :

Dr. RUCAKUMUGUFI Daniel (Directeur)

Prof. KABONEKA Salvator (Co-Directeur)

Bujumbura, Juillet 2025

MEMBRES DU JURY :

Président : Prof NIJIMBERE Séverin

Secrétaire : Dr NTAKIYIRUTA Pierre

Directeur : Dr RUCAKUMUGUFI Daniel

Co-directeur : Prof KABONEKA Salvator

DEDICACE

A mes parents

A mes frères et sœurs

A la famille MUGANO

A tous mes connaissances

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, mes remerciements s'adressent particulièrement à mon Directeur de mémoire Dr RUCAKUMUGUFI Daniel et à mon Co-Directeur Prof. KABONEKA Salvator pour leur disponibilité et leur patience malgré leurs multiples occupations. Leurs conseils méthodologiques et leurs rigueurs scientifiques m'ont guidé vers l'essentiel.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury notamment le président du jury Prof. Severin NIJIMBERE et le secrétaire du jury Dr. Pierre NTAKIYIRUTA qui ont accepté à évaluer ce travail. Ils ont pris leur temps à lire ce mémoire afin de l'améliorer. Je leur en suis très reconnaissant.

Une vive reconnaissance est adressée à tous les professeurs du Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, pour la formation solide et multidisciplinaire dont ils m'ont faite bénéficier. Je dis merci à tout le personnel du Laboratoire de Chimie et à mes camarades de classe pour une franche collaboration au cours des travaux de ce mémoire.

Je ne peux pas passer inaperçu sans remercier la Coopérative d'Excellence pour les Jeunes Entrepreneurs du Burundi (COEJEBU en sigle) financé par le PAEEJ-Burundi pour son financement tant matériels que financier qu'elle a apporté envers ce travail.

A toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, qu'elles trouvent ici mes sympathies et mes reconnaissances.

Que ce mémoire vous comble de joie.

Résumé

L'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les sols agricoles constitue un enjeu majeur pour la fertilité des terres et l'optimisation des rendements agricoles. Cependant, l'utilisation des phosphates naturels de Matongo, est limitée par leur faible solubilité. Ce mémoire présente une étude sur l'amélioration de la teneur en phosphore des composts obtenus par le co-compostage du tithonia diversifolium et de pailles de riz avec divers adjuvants organiques, notamment le fumier de porc, les fientes de poule et les bouses de vaches, en association avec des phosphates de Matongo. L'objectif principal de cette recherche est d'optimiser la valorisation des déchets agricoles tout en augmentant la fertilité des sols par l'enrichissement en phosphore des composts. Dans un premier temps, une analyse des caractéristiques physico-chimiques des matières premières a été réalisée afin de déterminer leur potentiel en matière de compostage. Ensuite, plusieurs formulations de compost ont été élaborées, en variant les types d'association des intrants. Les composts obtenus ont été soumis à des tests de maturation et d'analyse de la teneur en phosphore. Les résultats enregistrés pour les échantillons des composts témoins (composts obtenus sans l'ajout de phosphates aux intrants) : E450 ; E591 et E603 sont respectivement de $1,05 \pm 0,120\%$ de P_2O_5 ; $0,88 \pm 0,042\%$ de P_2O_5 et $0,69 \pm 0,245\%$ de P_2O_5 ; et les composts enrichis avec les phosphates de Matongo : E101 ; E205 ; E308 ; E708 et E805 ont révélé les résultats respectifs : $3,56 \pm 0,035\%$ de P_2O_5 , $2,99 \pm 0,071\%$ de P_2O_5 ; $3,42 \pm 0,081\%$ de P_2O_5 ; $3,12 \pm 0,056\%$ de P_2O_5 et $3,14 \pm 0,070\%$ de P_2O_5 . Ces résultats montrent que l'ajout de phosphates de Matongo, en combinaison avec les adjuvants organiques, permet d'augmenter significativement la teneur en phosphore des composts. Les analyses des paramètres physico-chimiques, des métaux lourds et le test de phytotoxicité ont été effectuées sur les composts produits afin d'évaluer leur stabilité et leur maturité. A l'exception de la teneur en Plomb (Pb) qui se montre supérieure aux normes de qualité d'un compost destiné à la fertilisation, tous les autres paramètres testés répondent bien aux normes de qualité établies pour un compost de bonne qualité. L'adjuvant bouse de vache se montre meilleur solubilisant des phosphates en comparaison avec les deux autres adjuvants expérimentés. Ce travail contribue à la valorisation des résidus agricoles et à la gestion durable des ressources, tout en répondant aux besoins croissants en fertilisants organiques riches en phosphore pour l'agriculture. Les conclusions de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement de pratiques de compostage innovantes et durables

Mots-clés : Co-compostage, phosphates naturels de Matongo, pailles de riz, adjuvants organiques, Solubilisation, fertilisation.

Abstract

The improvement of phosphorus availability in agricultural soils is a major challenge for soil fertility and the optimization of crop yields. However, the use of Matongo natural's phosphates is limited due to their low solubility. This thesis presents a study on enhancing the phosphorus content of composts obtained through the co-composting of tithonia diversifolia and rice straw with various organic additives, including pig manure, poultry droppings, and cow dung, in combination with Matongo phosphates.

The main objective of this research is to optimize the valorization of agricultural waste while increasing soil fertility through phosphorus-enriched composts. Initially, an analysis of the physicochemical characteristics of raw materials was conducted to determine their composting potential. Then, several compost formulations were developed, varying the types of input combinations. The resulting composts were subjected to maturation tests and phosphorus content analysis. The results recorded for the control compost samples: E450, E591, and E603 were respectively: $1.05 \pm 0.120\%$ P_2O_5 ; $0.88 \pm 0.042\%$ P_2O_5 ; and $0.69 \pm 0.245\%$ P_2O_5 . Meanwhile, the composts enriched with Matongo phosphates (E101, E205, E308, E708, and E805) showed the following phosphorus content: $3.56 \pm 0.035\%$ P_2O_5 , $2.99 \pm 0.071\%$ P_2O_5 , $3.42 \pm 0.081\%$ P_2O_5 , $3.12 \pm 0.056\%$ P_2O_5 , and $3.14 \pm 0.070\%$ P_2O_5 , respectively.

The results indicate that adding Matongo phosphates, in combination with organic additives, significantly increases the phosphorus content of the composts. Physicochemical parameter analyses, heavy metal assessments, and phytotoxicity tests were conducted on the produced composts to evaluate their stability and maturity. Except for lead (Pb) content, which exceeds the quality standards for compost intended for fertilization, all other tested parameters comply with the established quality standards for high-quality compost. Among the tested additives, the cow dung adjuvant proved to be a better phosphate solubilizer than the two others adjuvants tested.

This study contributes to the valorization of agricultural residues and the sustainable management of resources while addressing the growing need for phosphorus-rich organic fertilizers in agriculture. The findings of this research open up promising perspectives for the development of innovative and sustainable composting practices.

Keywords: Co-composting, Matongo natural phosphates, rice straw, organic additives, solubilization, fertilization.

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY.....	i
DEDICACE	ii
REMERCIEMENTS	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	x
Avant-Propos.	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPTRE I : GENERALITES SUR LE COMPOSTAGE DES DECHETS ET LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE.....	4
I.1. Déchets.	4
I.1.1. Définition : Qu'est-ce qu'un déchet ?.....	4
I.1.2. Origine de la valorisation du déchet.....	4
I.1.3. Impacts des déchets sur la santé publique et l'environnement.....	5
I.1.4. Techniques de la valorisation des déchets biodégradables	5
I.1.5. Choix de la technique pour valoriser les déchets.....	6
I.2. Compostage des déchets biodégradables.....	7
I.2.1. Définition	7
I.2.2. Avantages du compostage	8
I.2.3. Les principaux paramètres à contrôler lors du compostage	9
I.2.3.1. La teneur en eau	10
I.2.3.2. L'aération.....	10
I.2.3.3. Retournements	10
I.2.3.4. Température	11
I.2.3.5. pH	12
I.2.3.6. Conductivité électrique	13
I.2.3.7. Rapport C/N.....	13
I.2.3.8. Teneur en matière organique totale (M.O.T).....	14
I.2.3.9. Eléments traces métalliques (ETM)	14
I.3. Phosphore et son impact dans l'agriculture	14
I.3.1. Phosphates naturels	14
I.3.2. Solubilité des phosphates naturels.....	15

Essai d'amélioration de la teneur en phosphore des composts produits par co-compostage des pailles de riz et d'adjuvants organiques avec les phosphates naturels de Matongo

I.3.3. Importance des déchets organiques biodégradables dans l'amélioration du teneur en phosphore.....	15
I.3.4. Impact du phosphore dans l'agriculture	16
I.3.5. Plantes dépendantes du phosphore pour une bonne production.....	17
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	20
II.1. Localisation de la zone d'étude	20
II.2. Méthodologie.....	20
II.2.1. Identification des intrants et matériels utilisés	20
II.2.2. Méthode de compostage et construction des andains	22
II.2.3. Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques.....	24
II.2.3.1. Humidité (en %)	24
II.2.3.2. Matière organique totale (MOT).....	24
II.2.3.3. pH.....	25
II.2.3.4. Conductivité électrique (CE)	25
II.2.3.5. Phosphore	25
II.2.3.6. Teneur en Azote total khidjeldhal (NTK)	26
II.2.3.7. Teneur en carbone organique total (COT).....	26
II.2.3.8. Teneur en potassium (K).....	27
II.2.3.9. Dosage d'éléments -traces métalliques (ETM)	27
II.2.4. Test de phytotoxicité.....	28
II.2.5. Méthodes de traitements des données.	30
CHAPITRE III : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	31
III.1. Caractérisation physico-chimique des intrants.....	31
III.2. Evolution de la température au cours du compostage	33
III.3. Evolution de l'aspect physique des andains et processus de la minéralisation des éléments ...	34
III.4. Evaluation de la qualité physique des composts obtenus	35
III.5. Caractérisation physicochimique des composts produits.	36
III.6. Comparaison de quelques caractéristiques physicochimiques des composts obtenus aux valeurs limites des normes de qualité et les résultats d'autres chercheurs	37
III.7. Evaluation de l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les composts obtenus.....	41
III.8. Evaluation des critères d'innocuité des composts produits	43
III.8.1. Composition en éléments traces métalliques des composts produits	43
III.8.2. Evaluation de la phytotoxicité des composts produits.	45
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	50
Références bibliographiques	52
ANNEXES	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Proportions des masses des intrants mélangés pour monter les andains.....	22
Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques des intrants.....	31
Tableau 3:Caractérisation physicochimique des composts produits.....	36
Tableau 4: Comparaison de quelques caractéristiques physicochimiques des composts obtenus aux valeurs limites des normes de qualité et les résultats d'autres chercheurs.	38
Tableau 5:Teneurs en métaux lourds des composts produits et leur comparaison aux valeurs limites des normes de qualité et aux résultats d'autres chercheurs	43
Tableau 6: Taux de germination et indice de germination des graines d'arachides et de maïs	46
Tableau 7: suivi de l'évolution journalière de la température.....	66
Tableau 8 : Comparaison des résultats de concentrations en phosphore des composts enrichis et les composts témoins.....	68
Tableau 9 : Critères d'innocuité et valeurs limites des normes standards de qualité d'un bon compost.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Aspect physique des phosphates superficiels de Matongo	21
Figure 2: Aspect physique des phosphates de profondeur de Matongo	22
Figure 3: Schéma de superposition des couches des différentes fractions utilisées au cours du compostage	23
Figure 4: Evolution de la température durant le processus de compostage pour les huit andains	33
Figure 5: Evolution de l'aspect physique de l'andain lors du processus de compostage.....	34
Figure 6: Aspects physiques des composts produits	35
Figure 7:Teneur en P ₂ O ₅ des composts témoins et enrichis	41
Figure 8: photos d'illustration des graines de maïs et d'arachides en germination	45
Figure 9: IG (%) et TG (%) des graines de maïs et d'arachides	47
Figure 10 : Photos d'illustration des retournements lors du compostage	69

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AFNOR	: Association- Française de Normalisation
ATP	: Adénosine Triphosphate
COEJEBU	: Coopérative d'Excellence pour les Jeunes Entrepreneurs du Burundi
C/N	: Rapport Carbone-Azote
CCME	: Conseil Canadien du Ministère de l'Environnement
COT	: Carbone Organique Total
EAS	: East African Stands
ETM	: Eléments-Traces Métalliques
FAO	: Food and Agriculture Organization
FOMI	: Fertilisants Organo-Minéraux.
IG	: Indice de Germination
ISABU	: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
ISTEEBU	: Institut des Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi
LASPA	: Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agro-alimentaires
MOT	: Matière Organique Totale
NF	: Normes Françaises
NT K	: Nitrogen Total Kjeldahl / Azote total khidjeldhal
PAEEJ	: Programme d'Autonomisation Economique et d'Emploi des Jeunes
PED	: Pays En Développement
SAA	: Spectrophotométrie d'Absorption Atomique
TG	: Taux de Germination
UB	: Université du Burundi

Avant-Propos.

Ce travail de mémoire est réalisé en vue de l'obtention d'un diplôme de master en sciences et gestion intégrée de l'environnement, Spécialité Eau et Assainissement.

Le compostage est une pratique qui contribue à la gestion durable des déchets organiques tout en améliorant la fertilité des sols. Dans un contexte où l'agriculture fait face à des défis croissants liés à la dégradation des sols, à la diminution des ressources naturelles et à la nécessité de produire des aliments de manière durable, l'optimisation des pratiques de compostage devient primordiale. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en se concentrant sur l'amélioration de la teneur en phosphore des composts issus du co-compostage de pailles de riz, d'adjuvants organiques tels que le fumier de porc, les fientes de poule et les bouses de vaches, en association avec les phosphates naturels de Matongo.

Le choix de ces matières premières s'explique par leur disponibilité dans de nombreuses régions agricoles et leur potentiel à enrichir le compost en éléments nutritifs essentiels, notamment le phosphore, qui joue un rôle crucial dans la croissance des plantes. Le phosphore est souvent considéré comme un facteur limitant dans la production agricole, et son incorporation efficace dans les composts pourrait non seulement améliorer la qualité des sols, mais également réduire la dépendance aux engrais chimiques, souvent coûteux et néfastes pour l'environnement.

Ce travail de recherche vise à explorer les interactions entre les différents matériaux utilisés, à évaluer leur impact sur la qualité du compost final et à proposer des recommandations pour optimiser le processus de co-compostage. En intégrant des approches scientifiques, nous espérons contribuer à la valorisation des déchets agricoles tout en répondant aux besoins croissants en nutriments des cultures.

L'idée de faire ce travail me vient dans l'Esprit après avoir constaté des problèmes de rendement agricoles et ceux d'assainissement dans certains milieux surtout la Gestion des déchets biodégradables. Alors que ces derniers pourraient être avantageux pour produire un compost riche en phosphore lorsqu'ils sont mélangés avec les phosphates naturels de Matongo.

Selon la littérature, le phosphore est crucial pour l'agriculture surtout en assurant une série de fonctions du métabolisme de la plante, il est l'un des éléments nutritifs essentiels nécessaires pour la croissance et le développement des végétaux. Et le compostage des déchets biodégradables est actuellement considéré comme une technique écologiquement durable dans un système de gestion intégrée des déchets.

Ce travail aurait à cet effet un triple avantage : l'accroissement de la productivité agricole par l'amélioration de la teneur en phosphore dans les composts produits et le renouvellement des éléments nutritifs des sols ; l'assainissement de l'environnement ainsi que la réduction des risques pour la santé.

Les résultats de ce travail pourront être consultés par les agriculteurs qui veulent produire eux – mêmes un compost de qualité riche en phosphore pour améliorer leurs sols agricoles ; pour tout projet visant la valorisation des phosphates naturels locaux et l'assainissement de l'environnement.

INTRODUCTION GENERALE

De vastes zones de l'Afrique subsaharienne souffrent d'une carence modérée à aiguë en phosphore, alors que ce dernier reste le deuxième élément nutritif le plus important pour les plantes après l'azote (Mulungula, 2013). Les sols de ces zones contiennent généralement des stocks assez importants de phosphore total, mais leur disponibilité pour les plantes est faible. Contrairement à l'azote, les moyens biologiques pour améliorer sa disponibilité sont limités (Hammond, 1996).

Le mélange d'une roche phosphatée avec la matière organique brute offre une possibilité de solubiliser le phosphate par les acides organiques qui se forment au cours du compostage et d'enrichir ainsi le compost en phosphore et en calcium (Van den Berghe, 1993).

Ce phénomène se produit aussi naturellement dans le sol, où les phosphates difficilement solubles peuvent être solubilisés par addition de matière organique (Van den Berghe, 1993).

En plus des conditions pluviométriques défavorables, la fertilité naturelle médiocre des sols et la faible utilisation des engrais minéraux et organiques sont souvent évoquées pour expliquer le faible rendement des cultures des pays subsahéliens. Cependant, l'un des éléments nutritifs les plus limitants de la production agricole est le phosphore (Compaoré et Nanéma, 2010).

La concentration des ions phosphates dans la solution du sol est faible et ne permet pas une nutrition phosphatée adéquate des cultures (Compaoré *et al.*, 2001).

Le Burundi fait face à une augmentation croissante de la population, ce qui entraîne une demande élevée en besoins alimentaires et, par conséquent, cette situation crée une grave pression sur les terres cultivables. Cette pression favorise la dégradation des terres, qui, à son tour, entraîne une diminution des rendements agricoles liée à une faible utilisation d'intrants agricoles, suite à la diminution des revenus des ménages.

Les agriculteurs cultivent de plus en plus la même terre d'année en année, et dans ces conditions, la fertilité du sol diminue si les nutriments utilisés ne sont pas restitués au sol et si les amendements organiques et minéraux ne sont pas utilisés (Nduwimana *et al.*, 2013).

Les analyses de sols du Burundi effectuées ont montré que la plupart des terres cultivées sont carencées en phosphore (ISABU, 2022).

Une pratique agricole est considérée comme non durable lorsque la biodisponibilité du phosphore limite les rendements indispensables à la satisfaction des besoins alimentaires (Pieri, 1991).

Pour accroître de façon durable la production agricole, il s'avère nécessaire non seulement d'augmenter les teneurs en phosphore des sols, mais aussi d'améliorer leur biodisponibilité. La correction de cette carence nécessiterait des apports d'engrais phosphatés plus ou moins solubles (Pieri, 1991).

La valorisation des déchets biodégradables par co-compostage joue un rôle important dans la gestion des déchets pour maintenir un environnement propre et parvenir à un système agricole durable, en améliorant l'état de fertilité du sol par l'apport de compost riche en matières organiques et en composés minéraux (Compaoré *et al.*, 2001).

En outre, la plupart des sols burundais ne sont pas riches en éléments nutritifs assimilables par les plantes, alors que 90 % de la population burundaise est agricole (ISTEEBU, 2011). Ces derniers ont besoin soit d'engrais chimiques, soit d'amendements organiques pour restaurer la fertilité de leurs sols et, par conséquent, assurer une production agricole suffisante (ISABU, 2022). L'utilisation du compost produit comme fertilisant est plus avantageuse que celle des engrais chimiques, car le compost apporte au sol de la matière organique, des éléments minéraux, une microflore et améliore la rétention de l'eau, alors que l'engrais chimique n'apporte que des éléments minéraux (Charnay, 2005). De plus, tous les agriculteurs ne disposent pas de moyens suffisants pour se procurer des engrais, du fait que le prix d'un sac de 25 kg d'engrais « FOMI IMBURA » coûte 33 000 BIF (PAPAB, 2020). Ce coût élevé empêche les agriculteurs d'acheter une quantité suffisante pour amender leurs sols.

Pour ce mémoire portant sur « *l'essai d'amélioration de la teneur en phosphore des composts produits par co-compostage des pailles de riz et adjuvants organiques (fumier de porc, bouses de vaches et fientes de poules) avec les phosphates naturels de Matongo* », il est essentiel de définir un objectif global ainsi que des objectifs spécifiques :

Objectif Global

Améliorer la teneur en phosphore des composts issus du co-compostage de pailles de riz et d'adjuvants organiques, en intégrant des phosphates naturels de Matongo, afin de favoriser une fertilisation durable et efficace pour les sols agricoles.

Objectifs Spécifiques

- Évaluer la composition physico-chimique initiale des intrants ;
- Suivre l'évolution des paramètres du processus de compostage des différents andains ;
- Évaluer la qualité physico-chimique des composts obtenus.

Hypothèse

L'hypothèse de travail sur laquelle repose cette recherche est :

- L'incorporation de phosphates naturels de Matongo dans le processus de co-compostage améliorera significativement la teneur en phosphore des composts, en raison de leur solubilité et de leur capacité à libérer du phosphore dans des conditions de compostage ;

Parmi les intérêts de ce travail, nous pouvons citer notamment : l'assainissement de l'environnement à travers la valorisation des déchets fermentescibles par co-compostage, et l'accroissement de la productivité agricole par l'utilisation de composts enrichis en phosphore grâce au co-compostage des pailles de riz et des adjuvants organiques avec des phosphates naturels de Matongo, car ces composts amélioreront la qualité agronomique du sol, favorisant ainsi la croissance des plantes.

Structure du Mémoire : Ce travail comporte trois chapitres :

1. Le premier chapitre aborde les aspects généraux du compostage des déchets, les phosphates naturels et leur solubilité, ainsi que les plantes qui nécessitent du phosphore pour leur croissance.
2. Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie suivie pour réaliser ce travail.
3. Le troisième chapitre s'intéresse à la présentation et à la discussion des résultats.
4. Une introduction et une conclusion générale encadrent ce travail.

CHAPTRE I : GENERALITES SUR LE COMPOSTAGE DES DECHETS ET LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE

I.1. Déchets.

I.1.1. Définition : Qu'est-ce qu'un déchet ?

Selon le texte fondateur de la politique dédiée à la gestion des déchets en France, "la loi-cadre du 15 juillet 1975 " un déchet est tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou encore toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon (Barles, 2005). La même définition apparaît dans l'article 6 de la loi n°1/09 du 25 mai 2021 portant code de l'environnement de la république du Burundi (Gouvernement du Burundi, 2021).

Les déchets auxquels l'homme et son environnement font face sont de natures différentes : Solides, liquides et gazeux. Dans notre travail de recherche, un accent particulier portera sur la fraction fermentescible des déchets solides agricoles.

I.1.2. Origine de la valorisation du déchet

La valorisation des matières a longtemps été la norme, au point qu'il n'existait pas de déchets voués à l'élimination, les résidus des activités domestiques, agricoles et artisanales (Barles, 2005). Autant de matières premières étant dans leur totalité réintroduits dans les systèmes de production agricoles et industriels (Barles, 2005). Avec la naissance des grandes villes et l'évolution industrielle, la complémentarité entre ville, industrie et agriculture autour de la période fin XIX^e – début XX^e fait apparaître la notion de déchet et la nécessité de se doter de moyens techniques et financiers pour en assurer l'élimination (Rocher, 2008). Les villes optent alors pour l'incinération, procédé qui répond aux préceptes hygiénistes de l'époque, et offre l'espoir de faire perdurer la réutilisation des résidus, sous forme de chauffage urbain notamment. Au fur des années la valorisation des sous-produits devient de plus en plus coûteuse. Les résidus, longtemps dotés d'une valeur positive dans le cadre d'un recyclage généralisé, acquièrent une valeur négative, puisque l'élimination représente un coût pour les collectivités suite à l'augmentation des volumes de matières et leur complexité croissante (Rocher, 2008).

La soudaine prise de conscience de la dépendance énergétique de la population est ressentie comme une menace très vive. Dans un souci de lutte contre le gaspillage d'énergie et de matières premières, les déchets tendent alors à être considérés comme une potentielle matière première secondaire (Bertolini, 1998).

I.1.3. Impacts des déchets sur la santé publique et l'environnement

Toute sorte de pollution présente dans un milieu est potentiellement une source de danger sur l'environnement et la santé de la population.

Une pollution est toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction de substances chimiques artificielles ; toute perturbation du flux d'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière, ou encore toute altération d'une biocénose naturelle provoquée par l'introduction d'espèces exotiques invasives (Laaref *et al.*, 2020).

La gestion inefficace des déchets engendre des risques de pollutions chimiques pour l'environnement et la santé des populations vivant ou non à proximité. Cette pollution chimique est d'origine diverse : organique, minérale et métallique (Ghazi *et al.*, 2020).

Elle engendre l'émission des oxydes de carbone, d'azote et de soufre, des acides, des poussières, des composés organiques volatils et des organohalogénés. Ainsi, cela nous montre que les populations riveraines des différents dépotoirs et de la décharge de Bujumbura sont exposées aux risques des différentes maladies liées à la toxicité de ces déchets.

Les déchets fermentescibles placés dans une décharge, au cours de leur processus de biodégradation contribuent aussi à la pollution des eaux souterraines et des eaux de surfaces successivement à travers l'infiltration de leur lixiviat et l'érosion (Mizero *et al.*, 2015).

I.1.4. Techniques de la valorisation des déchets biodégradables

La valorisation d'un déchet peut se faire de deux manières :

-valorisation énergétique (la méthanisation)

-valorisation en matière (compostage)

D'une part, la digestion anaérobie de la fraction organique des déchets ménagers est l'une des méthodes de traitement et de valorisation de ces déchets. En effet cette valorisation, offre la possibilité de combiner le traitement de ces déchets et la production d'une énergie renouvelable qui est le biogaz (saidi-Boulahia, 2018).

D'autre part, le compostage est une méthode de transformation des déchets fermentescibles en compost.

Il s'agit d'un processus naturel qui se produit lorsque les déchets organiques sont décomposés par des micro-organismes dans des conditions optimales de température, d'humidité et d'aération. Le compost résultant est un amendement du sol riche et fertile, très utile pour l'agriculture (Soudi, 2001).

I.1.5. Choix de la technique pour valoriser les déchets

Le développement des activités humaines et industrielles concoure inéluctablement à l'augmentation de la production de déchets qui ont des impacts néfastes sur la santé humaine et animale et sur les ressources en eaux et en sols. Le traitement de ces déchets et leur élimination deviennent impératifs (Soudi, 2001).

Alors tout problème réside dans la recherche de solutions adaptées, écologiquement compatibles et en harmonie avec les directives environnementales et les intérêts socio-économiques (Soudi, 2001).

Des actions de gestion de déchets non appropriées aux conditions locales ont été assistées aussi bien au niveau des filières de traitement qu'au niveau du mode de collecte. Vu les déchets rejetés et leur nature, suivant les modes de vie et les caractéristiques climatiques et géographiques, les techniques de traitement ne sont pas facilement adaptables.

Les études menées dans ce domaine par les institutions gouvernementales et universitaires montrent que les déchets au Maroc, à l'instar de la plupart des autres pays en développement, se caractérisent par une humidité élevée et une forte teneur en matières organiques compostables (Jemali, 1996). Au Burundi, une étude réalisée en 2015 sur la caractérisation des déchets solides produit en ville de Bujumbura montre que la fraction fermentescible ressort nettement avec une moyenne de 70 % contre une moyenne de 30 % de la fraction non fermentescible (Mizero *et al.*, 2015 ;Rucakumugufi *et al.*, 2021).

C'est dans ce cadre que le choix de la filière de compostage s'impose dans le présent travail. Il permet de valoriser le compost destiné aux amendements des sols dont la qualité biologique et physico-chimique se détériore de manière significative suite aux déperditions de la matière organique des sols soumis à l'intensification agricole, à la mauvaise gestion des résidus de récolte, aux conditions thermiques favorables à la biodégradation de la matière organique, aux pertes en sols par érosion et à d'autres processus de dégradation d'origine naturelle et/ou humaine.

I.2. Compostage des déchets biodégradables

I.2.1. Définition

Partant du vrai sens du mot, le compostage est un processus naturel de dégradation ou de décomposition de la matière organique par les micro-organismes dans des conditions bien définies. Ces matières organiques, telles que les résidus de culture, les déchets animaux, les restes alimentaires et autres déchets biodégradables appropriés peuvent être appliqués aux sols en tant que fertilisant, une fois le processus de compostage terminé (Misra, 2005).

Selon la nature du processus de décomposition le compostage est classé en deux catégories :

- le compostage anaérobie

-le compostage aérobie.

a) Compostage anaérobie

Lors du compostage anaérobie, la décomposition se produit quand l'oxygène (O) est absent ou présent en quantité limitée. Dans ce processus, les microorganismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires comme du méthane, des acides organiques, du sulfure d'hydrogène et d'autres substances. En l'absence d'oxygène, ces composés s'accumulent et ne sont pas métabolisés. Un grand nombre de ces composés ont des odeurs fortes et certains d'entre eux présentent une phytotoxicité (Misra, 2005). Comme le compostage anaérobie est un processus s'effectuant à basse température, les germes pathogènes ne sont pas affectés. Ses inconvénients priment sur les avantages comparablement au processus de compostage en aérobie, en raison que le processus prend beaucoup de temps avec peu d'activités microbiennes et la perte d'éléments nutritifs au cours du processus.

b) Compostage aérobie

Le compostage aérobie est défini comme étant un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobie, entraînant une montée de la température qui permet d'éliminer les germes pathogènes et conduisant à l'élaboration d'une matière organique (Holford, 1997). Au cours de ce processus, les micro-organismes aérobie décomposent la matière organique et produisent du gaz carbonique (CO₂), de l'ammoniac, de l'eau, de la chaleur et de l'humus, qui est le produit organique final. Le produit ainsi obtenu est appelé compost (FAO, 2003; Misra, 2005).

I.2.2. Avantages du compostage

Le compost est une source importante de matière organique. La matière organique du sol joue un rôle important dans la durabilité de la fertilité, et donc pour une production agricole durable. En plus d'être une source d'éléments nutritifs pour les cultures, la matière organique améliore les propriétés biologiques et physico-chimiques du sol (Charnay, 2005).

Selon EPA (Environmental Protection Agency, USA), le compostage permet de réduire la quantité de déchets organiques envoyés en décharge ou à l'incinérateur. Cette réduction a un impact direct sur la diminution des déchets solides, un problème majeur dans de nombreuses régions du monde. En compostant, les déchets organiques sont transformés en un produit utile, plutôt que d'encombrer les sites d'enfouissement et de contribuer à l'émission de gaz à effet de serre (Holford , 1997).

Le compostage possède des avantages suivants :

➤ **Sur l'environnement :**

- Par rapport à la réduction des déchets : le compostage permet de détourner environ 50 % des déchets ménagers de la décharge, en particulier les restes alimentaires et les déchets de jardin (Charnay, 2005).

-Par rapport à la Réduction des émissions de gaz à effet de serre : contrairement à la dégradation des déchets organiques dans les décharges, qui produit du méthane, un gaz à effet de serre puissant, le compostage est un processus aérobie qui produit moins de méthane et donc réduit l'impact environnemental (Holford , 1997).

➤ **Sur le sol :**

Par rapport à l'amélioration de la fertilité du sol , le compost enrichit le sol en matière organique, améliore sa structure et sa fertilité, et encourage une activité biologique bénéfique (Paul , 2014). Il intervient notamment dans :

-L'amélioration de la structure du sol : le compost améliore la structure du sol en augmentant la porosité, ce qui permet une meilleure aération, une meilleure rétention d'eau et une meilleure capacité à drainer l'excès d'eau.

-L'apport de nutriments : le compost est une source naturelle de nutriments comme l'azote, le phosphore et le potassium, qui sont essentiels pour la croissance des plantes.

-L'amélioration de la rétention d'eau : les sols enrichis en compost retiennent mieux l'humidité, ce qui est particulièrement important dans les zones où l'irrigation est nécessaire.

-La facilitation de la biodiversité du sol : le compost stimule l'activité des micro-organismes bénéfiques, des vers de terre et d'autres organismes du sol qui améliorent la santé du sol en décomposant les matières organiques et en enrichissant la terre.

Suite à ces améliorations, le sol :

- devient plus résistant aux agressions telles que la sécheresse, les maladies et la toxicité,

- aide la culture à mieux prélever les éléments nutritifs,

-présente un cycle nutritif de bonne qualité en raison d'une activité microbienne vigoureuse.

Ces avantages se manifestent par une réduction des risques pour les cultures, des rendements plus élevés et une réduction des dépenses des agriculteurs pour l'achat d'engrais minéraux (Soudi, 2001; FAO, 2003; Paul ., 2014).

I.2.3. Les principaux paramètres à contrôler lors du compostage

Le phénomène de compostage a lieu spontanément dans le milieu naturel, de façon non optimale, avec une répartition de la chaleur trop hétérogène. Pour utiliser ce procédé à l'échelle industrielle, il est donc nécessaire de connaître parfaitement les différents facteurs physicochimiques et microbiologiques intervenants (Chennaoui *et al.*, 2016).

Deux principales catégories de paramètres interviennent lors du procédé de compostage :

-Les paramètres liés à la nature et à la composition du substrat. La teneur en eau, le pH, le rapport Carbone/Azote (C/N) ainsi que la granulométrie en font partie

-Les paramètres de suivi du procédé : la température, la présence d'oxygène et également la teneur en eau. Les différentes techniques de compostage permettent d'améliorer et d'accélérer le processus de dégradation naturelle des matières fermentescibles. Pour ce faire, on cherche à "doper" l'activité des micro-organismes en optimisant l'offre en substances nutritives et en régulant les conditions de pH, de température, d'humidité et d'aération (Koldzi, 2011). Un procédé de compostage optimal correspond à une fermentation réalisée dans les conditions les plus propices au développement de la flore bactérienne.

Pour vérifier ces conditions, les principaux paramètres à suivre pendant le procédé sont les suivants :

I.2.3.1. La teneur en eau

La décomposition de la matière organique est inhibée si la teneur en eau baisse en dessous de 30%. Au contraire, si elle dépasse 70 %, l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose. Selon Mustin (1987), l'optimum de la teneur en eau se situe entre 50% et 60 %. La teneur en eau ou humidité (H %) du substrat conditionne l'activité des microorganismes. La teneur optimale dépend de la densité du milieu, qui est fonction de l'état physique et de la nature du substrat. Elle est sensible à deux phénomènes ayant des effets complémentaires, d'une part, la dégradation de la matière organique provoquant une libération d'eau et d'autre part, une évaporation de l'eau sous l'effet de l'énergie calorifique libérée par la fermentation.

L'humidité semble être le paramètre ayant la plus grande influence. Cela suggère un contrôle du procédé par l'humidité et non comme habituellement par la température.

I.2.3.2. L'aération

L'aération régulière constitue une des pratiques essentielles dans le processus de compostage, en particulier dans les systèmes à compostage aérobie. L'objectif principal de ces opérations est d'assurer une oxygénation suffisante du tas, indispensable à l'activité des microorganismes aérobies qui dégradent la matière organique (Meena, 2021). En effet, un manque d'oxygène peut entraîner une fermentation anaérobie, libérant des gaz malodorants comme le méthane (CH₄) et le sulfure d'hydrogène (H₂S), tout en ralentissant la décomposition des matières (Diaz, 2009). En l'absence d'un bon aération, le processus de compostage peut devenir incomplet, produisant un amendement immature, parfois phytotoxique. (Ndayishimiye *et al.*, 2023)

I.2.3.3. Retournements

Le retournement mécanique permet non seulement de rétablir un équilibre en oxygène, mais aussi d'homogénéiser les températures, l'humidité et les matières en décomposition, favorisant ainsi une minéralisation uniforme et rapide (Bernal *et al.*, 2009). De plus, les retournements permettent de diminuer l'excès de chaleur et d'éliminer la vapeur d'eau et les autres gaz piégés. Ils permettent également d'éliminer des phytotoxines nuisibles aux plantes (Tiquia *et al.*, 1997).

Le nombre et la fréquence des retournements varient selon la méthode de compostage, la taille du tas, le type de matières utilisées et les conditions climatiques.

Un retournement hebdomadaire est recommandé au cours de la phase thermophile active (30–45 premiers jours), période où la demande en oxygène est la plus élevée (Ndayishimiye, 2023; Tiquia *et al.*, 1997). La fréquence peut être réduite au fur et à mesure que le processus entre dans la phase mésophile et de maturation. (Ndayishimiye, 2023)

I.2.3.4. Température

Une température minimale est nécessaire à l'activité des micro-organismes et à la dégradation. Selon Stentiford (1996), une température supérieure à 55°C permet l'hygiénisation, entre 45 et 55°C, elle favorise la biodégradation et qu'entre 35 et 40°C elle améliore la diversité des microorganismes. Une température voisine de 20°C ou supérieure à 82°C inhibe, voire arrête cette activité microbienne. Les variations des montées en température sont fonction de l'aération et de la composition du substrat. Il renseigne également sur la qualité du processus de dégradation : un épuisement en oxygène peut ainsi être décelé puis corrigé par des apports complémentaires (retournement) (Liang *et al.*, 2003).

Les phases du processus de compostage

- **La phase mésophile** : C'est la phase initiale de compostage. La présence de matière organique fraîche et biodégradable entraîne une colonisation du milieu par les micro-organismes mésophiles (bactéries et champignons essentiellement) ; leur activité engendre une montée en température et un dégagement important de dioxydes de carbone.
- **La phase thermophile** : Au cours de cette phase la température peut atteindre des valeurs de 60°C voire 75°C. L'azote minéralisé sous forme d'ion ammonium (NH_4^+) peut être volatilisé sous forme d'ammoniac (NH_3) dans certaines conditions, ainsi que l'évaporation d'eau, sont plus importantes au cours de cette phase. La libération de CO_2 peut entraîner, à la fin des phases thermophiles, jusqu'à 50% de perte en poids sec. Les hautes températures caractérisant la phase thermophile ne concernent que le centre du tas (Znaïdi, 2002).
- **La phase de refroidissement** : La diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables provoque un ralentissement de l'activité microbienne. La chaleur générée par la dégradation microbienne est alors inférieure aux pertes dues aux échanges surfaciques et à l'évaporation, entraînant un refroidissement du compost.

Cette phase de refroidissement peut être très progressive ou au contraire très rapide en fonction des conditions climatiques ou de la taille du tas de compost (Znaïdi, 2002). Au cours de cette phase, des micro-organismes mésophiles recouvrent à nouveau le compost. Cette phase est marquée par un pH qui se stabilise.

- **La phase de maturation** : Dans cette phase finale du processus de décomposition. La température baisse jusqu'à atteindre la même température du sol, selon le climat entre 15 et 25°C (Znaïdi, 2002). Cette phase présente peu d'activités microbiennes (recolonisation par des champignons) mais est adaptée à la colonisation par le macrofaune, en particulier les lombrics lorsque ceux-ci sont présents dans l'environnement du tas (Straimer *et al.*, 2015).

Quand le compost est mûr, le tas devient moins biologiquement actif bien que des organismes mésophiles recolonisent le compost ; le matériau devient brun foncé à noir et les particules sont plus petites et plus homogènes (structure finement granuleuse, et la texture ressemble à celle d'un sol) (Misra, 2005). Selon la littérature, un test de maturité est aussi un facteur qui permet de reconnaître un compost mûr.

La littérature montre que le C/N est aussi un indicateur important de la maturité du compost. Il a été établi qu'un rapport C/N voisin de 10-15 correspond à un compost mature.

1.2.3.5. pH

Le pH des suspensions de solides (déchets en phase de décomposition aérobie, compost mûr) varie entre 5 et 9.

a) Une phase acidogène produit au début du processus de dégradation : production d'acides organiques et de dioxyde de carbone (CO₂) par les bactéries acidogènes, décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial.

b) La seconde phase correspond à une alcalinisation : hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH₃) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques (Nelson et sommers, 1990).

Le pH optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat. Le suivi du pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique (Mustin, 1987).

I.2.3.6. Conductivité électrique

La conductivité électrique n'est que rarement mentionnée dans la littérature sur le compost. Pourtant elle est directement liée à la salinité et traduit donc un potentiel de phytotoxicité.

Dans leur étude (Jimenez et García, 1992) attribuent une inhibition de la germination du cresson à la forte conductivité (4 mS.cm^{-1}) d'un compost d'ordures ménagères. L'évolution de la conductivité, c'est à dire l'évolution de la concentration en sels, s'explique par la combinaison de trois phénomènes. La minéralisation de la matière organique lors du compostage entraîne une augmentation de la concentration en sels et donc une augmentation de la conductivité. Mais elle peut être modérée voire annulée par le lessivage des sels lorsque les andains de composts sont sujets aux précipitations ainsi que par une diminution de la rétractibilité des sels due à leur fixation plus importante sur la matière organique stabilisée. C'est pour cela que la conductivité électrique n'évolue pas dans le même sens en fonction des études (Avnimelech *et al.*, 1996) mesurent une diminution de la conductivité de 8 mS.cm^{-1} à 4 mS.cm^{-1} . Ajoutons que la conductivité électrique est mesurée sur extrait et qu'elle est très sensible au rapport d'extraction et la température à laquelle est réalisée cette extraction. Cela rend difficile la comparaison de résultats issus de travaux différents (Francou, 2003).

I.2.3. 7. Rapport C/N

Selon Larbi (2006), le rapport C/N est un paramètre important influencé d'une part par la composition des intrants, et d'autre part par son degré de maturation. Si le rapport C/N d'un compost est très élevé, il risque d'immobiliser l'azote du sol, ses microorganismes l'utilisent pour dégrader les substances ligneuses. Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme source protéique. Le procédé de compostage entraîne une décomposition de la M.O, donc une consommation de l'azote et du carbone, correspondant à la diminution du rapport C/N. Ce rapport exprime la proportion entre le carbone et l'azote biodisponible. Il dépend de la composition intrinsèque du substrat à composter.

De nombreux auteurs déterminent des valeurs optimales de ce rapport C/N qui peut varier de 25 à 45 en début de compostage pour les ordures ménagères hétérogènes (Sadaka et Engler, 2003), alors que le rapport minimum C/N des déchets verts est proche de 30. La valeur de 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets urbains, si non les micro-organismes passent par plus de cycles d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost.

De même, si ce rapport est trop faible, une perte excessive en azote ammoniacal risque d'entraîner une diminution du pH.

Il est donc important de connaître le rapport C/N initial des déchets afin de constituer un mélange optimal en ajoutant la quantité d'éléments déficitaires pour assurer une dégradation idéale et homogène sur l'ensemble du processus (Charnay, 2005).

I.2.3.8. Teneur en matière organique totale (M.O.T)

La matière organique est la matière spécifique des êtres vivants végétaux et animaux. En raison de sa richesse en carbone, la matière organique est appelée matière carbonée. Elle constitue l'humus. Elle est composée d'éléments principaux (C, H, O, N) et d'éléments secondaires, (S, P, K, Ca, Mg) (Mustin, 1987). La minéralisation du compost correspond à une diminution de la M.O.T au cours de la dégradation biologique du substrat. Cette diminution est variable et dépend des conditions de réalisation du processus de dégradation mais également de la durée du procédé. Les pertes en matière organique totale au cours du procédé peuvent atteindre 20 à 60% en poids de la M.O initiale.

I.2.3.9. Eléments traces métalliques (ETM)

L'accumulation de grandes teneurs en éléments traces métalliques dans les sols constitue une source importante de pollution de l'environnement et peuvent constituer une menace pour la santé humaine (Tshala *et al.*, 2017). La présence de métaux dans les déchets est principalement due à leur utilisation dans la fabrication industrielle de divers produits (piles, ustensiles de cuisine, peintures, encres, composants électroniques) ou à leur présence dans divers matériaux d'emballage (boîtes conjointes, emballages des jus, papier, carton, plastiques) (Koledzi, 2014).

Certains éléments sont indispensables aux processus biologiques donc, à la production agricole végétale et animale : ce sont les oligoéléments (Zn, Cu,.). D'autres éléments (Cd, Pb, Ni) ne jouent aucun rôle utile. Mais, ils sont tous potentiellement polluants. Cela dépendra de leur concentration dans le milieu considéré (sols, air, eau, sédiments) (Douma, 2013). Une carence ou un excès de ces éléments peuvent entraîner des effets néfastes sur l'environnement et la santé (Casas, 2005)

I.3. Phosphore et son impact dans l'agriculture

I.3.1. Phosphates naturels

Les phosphates naturels sont des minerais contenant des composés riches en phosphore, en particulier sous forme de phosphate de calcium. Ils se trouvent dans des roches phosphatées et sont principalement utilisés comme fertilisants dans l'agriculture pour fournir du phosphore, un nutriment essentiel à la croissance des plantes (Van den Berghe, 1993).

Les phosphates naturels sont extraits sous forme de roches phosphatées et sont ensuite traités pour produire des fertilisants.

I.3.2. Solubilité des phosphates naturels

Le Phosphore est moins disponible dans les sols Burundais. En effet, 99% des sols du Burundi ont une faible ou très faible disponibilité en phosphore. Cela est le même scénario dans toutes les zones agroécologiques sauf les dépressions du nord où ce pourcentage est de 90% (Tiessen, 2009).

La disponibilité du phosphore est un problème généralisé où presque tout le Burundi montre au moins une faible disponibilité de cet élément. Cette faible disponibilité est en partie liée au pH qui est généralement acide. Les corrections nécessaires insisteront sur l'apport du phosphore sous formes minéral et organo-minéral, la correction du pH et l'apport de la matière organique (Nduwimana, 2013).

I.3.3. Importance des déchets organiques biodégradables dans l'amélioration du teneur en phosphore

Les déchets organiques biodégradables peuvent effectivement influencer la teneur en phosphore du sol, mais l'impact dépend de plusieurs facteurs, notamment du type de déchets, de leur processus de décomposition et de la manière dont ils sont intégrés dans le sol comme compost ou matière organique (Holford , 1997).

Les déchets organiques biodégradables, tels que les restes alimentaires, les déchets de jardin, ou le fumier, sont riches en matière organique. Lors de leur décomposition, des micro-organismes du sol (bactéries, champignons, vers de terre) dégradent cette matière organique en éléments plus simples. Cela libère progressivement des nutriments comme l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres micronutriments dans le sol. Lorsque ces composés se décomposent, le phosphore est libéré sous une forme minérale (principalement le phosphate), ce qui augmente la disponibilité du phosphore dans le sol pour les plantes (Brinton, 2000; Paul , 2014).

La qualité et la quantité de déchets compostés, le compost obtenu doit contenir non seulement du phosphore sous forme organique, mais également du phosphore inorganique qui peut être plus facilement disponible pour les plantes. Le phosphore organique est progressivement transformé en phosphore minéral, une forme que les plantes peuvent absorber plus facilement (Compaoré *et al.*, 2001; Tiessen, 2009).

La décomposition des matières organiques peut également aider à séquestrer le phosphore sous une forme plus biodisponible, réduisant ainsi la fixation du phosphore dans des formes insolubles notamment dans les sols acides ou riches en fer et aluminium (Tiessen, 2009).

Bien que les déchets organiques libèrent du phosphore au fur et à mesure de leur dégradation, la quantité totale de phosphore libérée dépend de la quantité et de la nature des déchets utilisés

Les microbes de solubilisation des phosphates sont importants pour améliorer la disponibilité du phosphore et la transformation du phosphate insoluble (le phosphate de roche). L'utilisation de bactéries solubilisant au phosphate comme inoculant a été proposée comme alternative pour augmenter la disponibilité du phosphore dans les sols et les engrais de compostage (Tiessen, 2009).

I.3.4. Impact du phosphore dans l'agriculture

Le phosphore est un élément essentiel dans l'agriculture en raison de son rôle crucial dans la croissance des plantes. Il intervient dans de nombreux processus biologiques vitaux, et son utilisation en tant qu'engrais améliore la production agricole et la santé des sols (Vance ., 2001).

Le phosphore est un composant clé qui est impliqué dans la production d'énergie à travers l'ATP une molécule essentielle pour la photosynthèse et les processus métaboliques des plantes. Le développement des racines chez une plante est favorisé par la présence du phosphore dans le sol. Cela permet une meilleure absorption des nutriments et de l'eau (Dubuisson, 2016). La maturation des fruits et des graines dépend de la quantité du phosphore disponible pour la plante, notamment dans les régions du Burundi où les sols sont souvent acides et pauvres en matière organique. Le phosphore contribue à un meilleur rendement des cultures (ISABU, 2022).

En ce qui concerne l'amélioration de la qualité du sol, le phosphore améliore la fertilité du sol en stimulant l'activité microbienne bénéfique. Cependant, les sols peuvent parfois manquer de phosphore biodisponible, ce qui nécessite l'ajout d'engrais phosphatés.

En revanche, un sol bien phosphoré devient aéré et retient l'eau ce qui est crucial pour la santé des plantes. Il contribue aussi à maintenir l'équilibre du pH du sol favorisant l'absorption d'autres nutriments. Dans un pays comme le Burundi, où l'érosion du sol et la dégradation des

terres sont des problèmes majeurs, l'utilisation de phosphore peut contribuer à restaurer la fertilité des sols dégradés.

L'apport d'engrais phosphatés permet de restaurer la productivité des sols, en particulier dans les zones où les sols ont été épuisés par des pratiques agricoles intensives sans fertilisation (Nduwimana, 2013).

L'usage d'engrais phosphatés permet d'augmenter significativement les rendements agricoles. En effet le phosphore reste un des trois macronutriments (avec l'azote et le potassium) pour les plantes, et sa disponibilité dans le sol est un facteur limitant pour la production agricole dans de nombreuses régions (ISABU, 2022; Roose *et al*, 2018).

Selon le Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage du Burundi (2017), "Stratégie Nationale de Fertilisation et de Gestion Durable des Sols". Ce document stratégique du gouvernement du Burundi souligne l'importance de la gestion durable des sols et de l'usage raisonné des fertilisants, notamment le phosphore, pour soutenir l'agriculture nationale : le phosphore contribue à la résistance des plantes aux maladies et au stress environnemental. Il renforce les parois cellulaires des plantes et joue un rôle dans la gestion du stress oxydatif. Il est un nutriment essentiel pour le cycle des éléments nutritifs dans l'écosystème agricole ; aide à maintenir un sol fertile et assure une production alimentaire durable (Nduwimana, 2013).

I.3.5. Plantes dépendantes du phosphore pour une bonne production

Le phosphore est un nutriment essentiel pour de nombreuses cultures agricoles au Burundi, surtout pour celles qui dépendent du développement des racines et de la production de fruits et graines. En particulier, des cultures comme le haricot, le riz, le manioc et le maïs bénéficient directement de l'apport en phosphore pour assurer des rendements élevés et une meilleure qualité de produit. Cependant, étant donné les limitations d'accès aux engrais et les carences en phosphore dans de nombreuses régions du Burundi, une gestion adéquate et un meilleur accès aux fertilisants sont cruciaux pour garantir une agriculture productive et durable (Zink , 2004).

Selon les données et recherches menées par l'ISABU et d'autres organismes impliqués dans l'agriculture au Burundi, la quantité moyenne de phosphore dans les sols burundais varie en fonction des types de sols, de la gestion agricole, et des zones géographiques.

Le rapport publié par MINAGRIE en collaboration avec l'ISABU portant sur l'étude cartographique de la fertilisation des sols burundais en 2022 montre que plusieurs cultures au

Burundi dépendent du phosphore particulièrement en raison de son rôle dans le développement des racines, la floraison, la maturation des fruits et la résistance au stress (ISABU, 2022).

a) Le Maïs (*Zea mays*)

Le maïs est l'une des cultures vivrières les plus importantes au Burundi, en particulier pour l'alimentation et comme source de revenu. Le phosphore est un nutriment crucial pour le développement des racines, ce qui permet aux plantes de mieux absorber l'eau et les nutriments, favorise la photosynthèse et la maturation des épis (Gichuru, 2014).

Les données expérimentales provenant de la variété de maïs (*zea mays*) cultivée sous quatre concentrations d'azote (N) et de trois concentrations de phosphore (P) au cours des saisons principales et mineures de 2014 sur deux sites d'Ejura, au Ghana, ont été utilisées pour évaluer l'influence du phosphore et de l'azote sur le rendement, l'absorption d'éléments nutritifs et l'efficacité de son utilisation. Le maïs a besoin d'une quantité de 40 à 60 kg/ha de phosphore facilement absorbable (Gichuru, 2014). Une carence en phosphore peut limiter la croissance du maïs et affecter négativement les rendements.

b) Le haricot (*Phaseolus vulgaris*)

Le haricot est également une culture de base au Burundi, souvent cultivé à petite échelle par les familles pour la consommation domestique et pour la vente. Une variation de 20 à 40 kg/ha de phosphore suffit pour une culture de haricot.

Le phosphore aide à améliorer la germination et la croissance des racines, favorise une meilleure fixation de l'azote ainsi que le développement des gousses et des graines (FAO, 2014).

c) Le Riz (*Oryza sativa*) :

Le riz est une autre culture importante, surtout dans les zones où l'irrigation est pratiquée. Le phosphore est essentiel pour le développement des racines, la floraison et la production de graines, ce qui influence directement le rendement du riz (Ethridge, 2009)

d) La Patate douce (*Ipomoea batatas*)

La patate douce est une culture vivrière importante au Burundi, souvent cultivée dans des sols pauvres en nutriments. Le phosphore est nécessaire pour la croissance des racines et des

tubercules, favorise la photosynthèse et améliore la résistance aux maladies (Zapata et Roy, 2004).

e) Le Manioc (*Manihot esculenta*)

Le manioc, une culture fondamentale au Burundi pour les racines comestibles, bénéficie grandement de l'application de phosphore. Le phosphore aide au développement des racines souterraines, qui sont la partie comestible de la plante (Zapata et Roy, 2004).

f) Les Légumineuses (*Arachis hypogea* - *Glycine max* - Soja)

Les légumineuses, telles que les arachides et le soja, jouent un rôle important dans les systèmes agricoles du Burundi. Le phosphore est essentiel pour la fixation de l'azote, un processus qui permet aux légumineuses de produire leurs propres nutriments en association avec des bactéries spécifiques (FAO, 2003; Nduwimana, 2013).

Selon les résultats et les recherches menées par l'ISABU et d'autres organismes impliqués dans l'agriculture au Burundi, la quantité moyenne de phosphore dans les sols burundais varie en fonction des types de sols, de la gestion agricole, et des zones géographiques.

La plupart de ces sols ont 39kg/ha de phosphore total en moyenne dont 19kg/ha sont les seuls qui sont facilement absorbés par les plantes ; alors que le document "Stratégie Nationale de Fertilisation et de Gestion Durable des Sols" élaboré par le Ministère de l'agriculture et l'élevage donne des valeurs nécessaires en phosphore respectivement pour le maïs 40 à 60kg/ha ; le haricot 20 à 40kg/ha ; le manioc 20 à 40kg/ha ; le patate douce 20 à 40kg/ha ; le riz 50 à 80kg/ha et les légumineuses 20 à 30 kg/ha (FAO, 2014; Gichuru *et al*, 2014; ISABU, 2022). Cela traduit que dans les sols burundais, le phosphore disponible pour ces plantes se trouve en dessous de la moyenne pour certaines plantes en vue de leur meilleur développement. D'où la nécessité d'améliorer la quantité du phosphore disponible pour les plantes.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

II.1. Localisation de la zone d'étude

Le compostage a été réalisé dans un espace libre, sous un hangar en tôles, construit dans la commune Gihanga de la province Bubanza. Ce site de compostage a comme coordonnées géographiques : 29°14 ' de longitude ; 3°11' de latitude et une altitude de 821m. Sa topographie est relativement plate avec des altitudes variant autour de 800 m, les températures moyennes annuelles oscillent entre 22 °C et 28 °C, avec des pics pouvant dépasser 30 °C durant la saison sèche.

II.2. Méthodologie

La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur une approche expérimentale et analytique permettant d'évaluer l'impact du co-compostage des phosphates naturels de Matongo avec des pailles de riz et différents adjuvants organiques sur la disponibilité du phosphore. Cette approche comprend plusieurs étapes essentielles allant de la préparation des composts (système des caissières) à l'analyse des paramètres physico-chimiques. L'analyse de la teneur en éléments traces métalliques (ETM) de ces composts a été faite au LASPA de l'ISABU et d'autres paramètres physicochimiques ont été analysés au laboratoire de chimie à l'UB.

II.2.1. Identification des intrants et matériels utilisés

Les intrants ou déchets faisant l'objet de cette étude sont des déchets solides fermentescibles issus de l'agriculture, les adjuvants organiques (déchets animaux) et les phosphates naturels. Ces intrants sont constitués par des pailles de riz ; du *Tithonia diversifolia* ; des bouses de vaches, des fientes de poules, du fumier de porcs et les phosphates naturels de Matongo.

Le choix de ces déchets est guidé par leur aptitude de décomposition, leur complémentarité en matières carbonées et azotées, leurs abondances surtout dans la zone agricole de Bubanza et leurs potentiels d'avoir une valeur agronomique élevée.

Les déchets et adjuvants utilisés dans le compostage ont été collectés dans la localité de Buringa en commune Gihanga de la province Bubanza. Les bouses de vaches ; les fientes de poules et les fumiers de porcs ont été ajoutés comme adjuvants pour accélérer le processus de compostage.

Des différents types de phosphates naturels récoltés dans la commune Matongo de la province Kanyanza broyés et tamisés avec le tamis de 200mm ont été ajoutées aux déchets au cours de la construction des andains servant de compostage pour notre étude.

Ils s'agissent notamment : (i) des phosphates de couleur jaune (des phosphates récoltés à la surface et sont aussi appelés des phosphates superficiels), (ii) des phosphates de couleur grise récoltés en profondeur (à plus de 15cm) et, (iii) des phosphates complexes issus du mélange des phosphates superficiels et phosphates de profondeur.

Les outils tel que : un hangar couvert de tôles, caisses-compostières ; un râteau, un Marteau, un tamis, une pelle, une fourche, un seau, un arrosoir, des bidons, une balance de cuisine, et une sonde de température ont été utilisés pour monter des andains et faire le suivi du processus de compostage.

Les phosphates naturels de Matongo utilisés dans le présent travail sont présentés dans les figures 1 et 2 ci-dessous :



Figure 1: Aspect physique des phosphates superficiels de Matongo



Figure 2: Aspect physique des phosphates de profondeur de Matongo

II.2.2. Méthode de compostage et construction des andains

Dans des caissières sous un hangar couvert de tôles, la méthode de compostage en andain aéré par couches superposées avec alternances des fractions compostables a été utilisée. Pour évaluer l'effet des adjuvants sur la décomposition des déchets et la minéralisation de certains éléments comme le phosphore en particulier, huit andains ont été monté à base de différents substrats suivant les proportions mentionnées dans le *Tableau 1*.

Tableau 1: Proportions des masses des intrants mélangés pour monter les andains

Intrant	Paille de riz (%)	Tdiv (%)	BV (%)	Fp (%)	Fporc (%)	Ps (%)	Pp (%)	Pmel (%)
E101	50	10	30	-	-	-	-	10
E205	50	10	-	-	30	-	-	10
E308	50	10	-	30	-	-	-	10
E450	60	10	30	-	-	-	-	
E591	60	10	-	-	30	-	-	
E603	60	10		30		-	-	
E708	50	10	30	-	-		10	
E805	50	10	30	-	-	10	-	

E(101) :E échantillon ,(101) :code d'un compost ; Bv : bouses de vaches ; Fp : fientes de poules ; Fporc : fumier de porc ; Ps : phosphates superficiels ; Pp : phosphates de profondeur ; P mél : phosphates mélangés

La superposition des couches avec alternances des fractions compostables pour construire des andains de bas en haut a été conçue comme suit : Fraction de pailles de riz, *Tithonia diversifolia* et, on a ajouté les adjuvants organiques pour les andains E450 -E591- E603, tandis que pour les andains E101 – E205 - E308 - E708 - E805, aux fractions précédentes, on a terminé par des couches de phosphates naturels de Matongo.

La Figure 3 présente le schéma de superposition des couches des différentes fractions utilisées au cours du compostage.

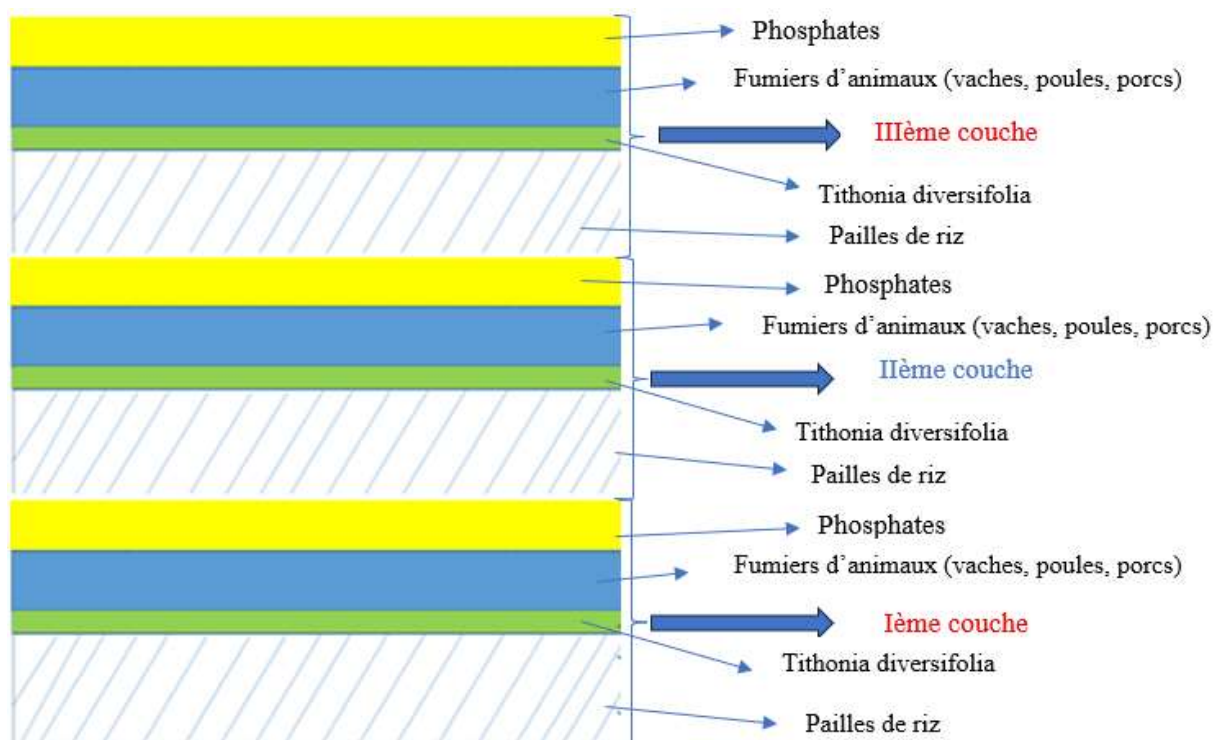


Figure 3: Schéma de superposition des couches des différentes fractions utilisées au cours du compostage

Après la construction de chaque couche, on arrosait avec l'eau de forage. Ainsi, pour la première et la deuxième couche, nous avons arrosé avec 8L chacune et, la dernière couche (3^{ème} couche) a été arrosée avec 16L selon (Chennaoui *et al.*, 2016; Compaoré et Nanéma, 2010). Des retournements hebdomadaires suivis d'arrosage sont effectués.

II.2.3. Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico chimiques des composts obtenus après compostage ont été analysés au laboratoire d'analyse chimique du département de chimie à l'université du Burundi et au laboratoire d'analyse des sols et des produits agro-alimentaires à l'ISABU

II.2.3.1. Humidité (en %)

Elle a été mesurée sur les intrants et sur les composts mûrs par la méthode AFNOR NF U44-171 (1996) (Charnay, 2005).

L'échantillon frais contenue dans des creusets en porcelaine a été pesé à l'aide d'une balance analytique à 0,1 mg près et la masse mesurée est notée M1. Cette masse est introduite dans une étuve portée à 105°C pendant 24h. La deuxième pesée (M2) a été effectuée après refroidissement de l'échantillon à température ambiante dans un dessiccateur. La procédure continue jusqu'à avoir une masse constante. Le séchage dure une période comprise entre 24h et 48h.

Le taux d'humidité est obtenu sur base de cette formule : $W (\%) = \frac{(M1-M2)}{M1} \times 100$ (1)

Avec : - W (%) : taux d'humidité en pourcentage

- M1 : la masse initiale de l'échantillon frais

-M2 : la masse de l'échantillon séché

II.2.3.2. Matière organique totale (MOT)

La matière organique totale est calculée après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24h d'un échantillon broyé puis tamisé à 800 µm et calcination dans un four porté à 550°C pendant 4h (Chennaoui *et al.*, 2016) . La matière organique a été mesurée sur les intrants et sur les composts mûrs.

Le taux de la (MOT) est donné par la formule : $(MOT\%) = \frac{(M1-M2)}{M1} \times 100$ (2)

D'où

-M1 : masse de l'échantillon après séchage à l'étuve

-M2 : masse de l'échantillon après calcination.

-(MOT%) : taux de la matière organique exprimée en pourcentage

II.2.3.3. pH

Le pH a été déterminé selon la norme ISO 10-390 à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA Instruments, modèle HI 223 muni d'une électrode combinée, sur une suspension de compost dans 5 fois son volume d'eau (Chennaoui *et al.*, 2016)

II.2.3.4. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique a été déterminée sur les intrants et sur les composts produits à l'aide d'un conductimètre de marque Consort C6010. La conductivité électrique reflète le degré de salinité du matériau produit et indique ses possibles effets phytotoxiques sur la croissance des plantes (Ben M'Barek, 1989; Chennaoui *et al.*, 2016). La suspension a été obtenue par mélange d'échantillon et d'eau dans les proportions 1:10 (poids : volume d'eau) (Roig, 2004).

II.2.3.5. Phosphore

❖ Phosphore total (P₂O₅)

Le phosphore a été déterminé après minéralisation par voie sèche à 550°C avec un dosage Spectrophotométrique (Dubuisson, 2016).

A l'aide des dilutions, une série de solutions étalons a été préparée et a permis d'établir une courbe d'étalonnage qui a servi au calcul des concentrations des échantillons après avoir mesuré l'absorbance à 420 nm grâce au spectrophotomètre.

La concentration en phosphore, exprimée en ppm est donnée par la relation :

$$P(\text{ppm}) = \frac{X.Y.Z}{A} \quad (3)$$

Avec : x : la concentration (en ppm) lue au spectrophotomètre, Y : la dilution, Z : le volume de la solution mère, A : le poids de l'échantillon

❖ Phosphore Soluble (Méthode Olsen)

L'extraction du phosphore soluble est réalisée avec NaHCO₃ et le dosage par un système Spectrophotométrique ; ISO 11263.

Pour établir la courbe d'étalonnage, les solutions étalons ont été mesurées au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 650nm. La concentration en phosphore soluble, exprimée en ppm est donnée par la relation (3) utilisée aussi pour le phosphore total

II.2.3.6. Teneur en Azote total khidjeldhal (NTK)

L'azote total sur les intrants comme sur les composts mûrs a été mesuré par la méthode Kjeldahl selon la norme AFNOR ISO 11261 sur des échantillons séchés à 105°C puis finement broyés et tamisés à 800 µm (Charnay, 2005).

La teneur en NTK dans l'échantillon est déterminée selon la formule ci-après :

$$\text{NTK (\%)} = \frac{1,4008 (y - Bl) \cdot N \cdot fk \cdot \frac{V1}{V2}}{P} \quad (4)$$

Où :- v1 est le volume (ml) du jaugé (en général 250ml), v2 est le volume (ml) de prise pour analyse (en général 25ml), Y est le volume (ml) d'une solution titrée par H₂SO₄ 0,05 N, Bl est le volume moyen de H₂SO₄ 0,05 N nécessaire pour titrer les blancs, P est le poids de l'échantillon (en g), N est la normalité de l'acide sulfurique utilisé, fk est le facteur de correction.

II.2.3.7. Teneur en carbone organique total (COT)

Elle est déterminée par la méthode d'oxydation de Walkley et Black également utilisée par le Centre d'Expertise du Québec ; M.A. 405-C.1.1 (CEAEQ, 2014). La méthode consiste à l'oxydation à froid du carbone organique avec du dichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) dans un milieu acide en présence de l'acide sulfurique. Après la réaction, on procède au titrage de l'excès de dichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon ce qui permet d'établir la concentration de COT (Bahadori et Tofighi, 2016). Le pourcentage de carbone dans l'échantillon exprimé en % est déterminé comme suit :

$$\text{COT (\%)} = \frac{(A - B) \cdot 10 \cdot 0,004 \cdot 100}{P} \quad (5)$$

Où : C : Concentration de carbone organique total (% C)

A : Volume de sulfate ferreux utilisé pour le témoin (ml)

B : Volume de sulfate ferreux utilisé pour l'échantillon (ml)

10 : Volume de bichromate ajouté initialement

0,004 : Nombre de g de Carbone par ml de bichromate

P : poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g)

100 : Facteur pour obtenir un pourcentage.

II.2.3.8. Teneur en potassium (K)

Le dosage du potassium est réalisé suivant le protocole de la méthode d'analyse ISO 11460 (Tahraoui, 2013). L'échantillon est d'abord mis en solution par attaque acide (minéralisation) : après séchage et broyage des échantillons.

La concentration en potassium, exprimée en % est donnée par relation :

$$K (\%) = \frac{(A-B) \cdot 39,09 \cdot N \cdot \frac{V_1}{V_2}}{P} \cdot 100 \quad (5)$$

Où

V1 est le volume (ml) du jaugé (500 ml), V2 est le volume (ml) de prise pour analyse (50ml)

K est la teneur du potassium, A est le volume de NH₄SCN utilisé pour le témoin (ml)

B est le volume de NH₄SCN utilisé pour l'échantillon (ml), N est la normalité de l'H₂SO₄ utilisé, P est le poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g), 100 est le facteur pour obtenir le pourcentage.

II.2.3.9. Dosage d'éléments -traces métalliques (ETM)

Le dosage d'éléments traces métalliques a été effectué au Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agro-alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) par la méthode de spectrométrie d'absorption atomique (SAA).

Les éléments -traces métalliques recherchés sur les composts produits sont : Plomb (Pb) ; Nickel (Ni) ; Cobalt (Co) ; Zinc (Zn) ; Cadmium (Cd) et Cuivre (Cu). Le spectrophotomètre d'absorption atomique qui a été utilisé est le spectrophotomètre d'absorption atomique SAA-Flamme de type PERKIN-ELMER ANALYST 400 et le logiciel d'intégration des résultats était WINLAB 32AA FLAM.

-Processus de minéralisation des éléments.

1,5g de chaque échantillon finement broyé a été pesé dans des creusets en porcelaine puis ces échantillons ont été mis au four à 450 °C pendant 24heures. Après refroidissement, 5 ml d'acide nitrique 1M sont ajoutés à la cendre obtenue puis porté à l'évaporation sur un bain marie à sable. Au résidu est ajouté 5 ml d'acide chlorhydrique 0,1M puis est remis au four à 400°C pendant 30 min. Le résidu final est récupéré avec 10 ml d'acide chlorhydrique 1M puis versé dans une fiole de 50 ml.

Le creuset est rincé deux fois avec 10 ml de l'acide chlorhydrique. La fiole est complétée à 50 ml avec l'acide chlorhydrique.

Le témoin a été préparé de la même manière et dans les mêmes conditions.

-Méthode de dosage : spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

Le spectrophotomètre d'absorption atomique qui a été utilisé est le spectrophotomètre d'absorption atomique SAA-Flamme de type PERKIN-ELMER ANALYST 400 et le logiciel d'intégration des résultats était WINLAB 32AA.

Un faisceau de lumière monochromatique de fréquence telle qu'il soit absorbable par l'élément à doser est envoyé dans une vapeur atomique de cet élément. La mesure de l'intensité lumineuse avant et après le passage dans la vapeur permet de déterminer le pourcentage de l'absorption.

Dans des conditions bien déterminées, celui-ci est fonction non seulement de la concentration en atomes de la vapeur atomique, qui n'a pas grand intérêt, mais surtout de la concentration de la solution ou du produit initial que l'on cherche à déterminer. Pour obtenir ce résultat, il faut produire un faisceau incident suffisamment intense. Mais, il est nécessaire également que le mode de production de la vapeur atomique soit bien précisé.

Lors du dosage des éléments minéraux, les longueurs d'onde, le débit d'acétylène et d'air pour chaque type d'élément minéral étaient déjà définies sur le spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA).

Après avoir constaté que la courbe d'étalonnage est linéaire et que la lampe correspondant de l'élément à doser a atteint son énergie maximale, les solutions contenant les cendres des échantillons ont été amenées afin de lire leur concentration en cet élément minéral.

II.2.4. Test de phytotoxicité

Le test de phytotoxicité a été réalisé afin de vérifier si les composts produits présentent des effets négatifs sur la germination et la croissance des graines de maïs et d'arachides. Ce test permet de s'assurer que les composts ne contiennent pas de substances toxiques pouvant inhiber la germination ou affecter le développement des jeunes plantules.

-Préparation de l'Extrait de Compost

L'extrait de compost est préparé selon la méthode DI.VA. P.R. A, (1998) décrite par : Une proportion 1/ 5,7 (M / V) (compost (g de matière sèche) / eau distillée (ml)) est préparée pour chaque type de compost. Une suspension de compost a été préparée en mélangeant 21g de compost avec 120 ml d'eau distillée.

Le mélange a été centrifugé pendant 15minutes à une vitesse de 600 tours par minute puis filtré sur papier filtre lent pour obtenir un extrait aqueux, la solution a été laissée au repos durant 2 heures pour assurer un mélange équilibré.

La solution mère de chaque échantillon de compost a été diluée avec de l'eau distillée pour avoir les doses de 25% : 25%EC+75%E , 50% :50%EC+50%E , 75% :75%EC+25E et 100%EC.

-Mise en Place du Test

750 graines de maïs et/ ou d'arachide ont été sélectionnées et désinfectées avec une solution de NaClO 5% pour éviter les contaminations fongiques et puis elles sont trempées dans l'eau distillée pendant 12h avant de les mettre en germination dans les boîtes de pétri.

Deux groupes ont été constitués :

Groupe témoin : graines arrosées avec de l'eau distillée.

Groupe testé : graines arrosées avec l'extrait de compost.

10 graines par boîte constituent une répétition, chaque boîte de pétri est imbibée avec 5 ml de l'extrait aqueux du compost (3 boîtes pour chaque dilution et par compost), faisant ainsi un total de 72 boîtes pour les six composts et 5 ml d'eau distillée ont été ajoutés pour les boîtes qui constituent de témoin.

Les graines ont été placées sur du papier filtre humide dans des boîtes de Pétri et incubées à l'air ambiante pendant 72heures le maïs et 48heures pour les arachides.

Le nombre de graines germées a été compté et les longueurs des racines pour les gaines de maïs et des radicules pour les graines d'arachides ont été mesurées.

$$\text{➤ Taux de germination : TG(\%)} = \frac{N_{gg}}{N_{gs}} \times 100 \text{ (Chennaoui } et al., 2016) \text{ (6)}$$

D'où : N_{gg} : nombre de graines germées ; N_{gs} : nombre de graines semées ; 100 : facteur de pourcentage

L'indice de germination a été obtenu par application de la formule suivante :

$$IG (\%) = \frac{(N_{gg} \cdot L_r) \cdot 100}{N_{ggt} \cdot L_t} \quad (7)$$

D'où : N_{gg} : nombre de graines germées, L_r : longueur moyenne des racines pour les différentes doses des échantillons, N_{ggt} : nombre de graines germées pour le témoin

- L_t : longueur moyenne des racines pour le témoin

On note que :

Si $IG < 50 \%$: forte phytotoxicité

Si $50 \% \leq IG < 80 \%$: phytotoxicité modérée

Si $IG \geq 80 \%$: absence de phytotoxicité (Warman, 1999).

II.2.5. Méthodes de traitements des données.

Le logiciel Excel 2013 a été utilisé pour faire des calculs et les graphiques.

Pour référencer les documents consultés, le logiciel Zotero a été utilisé.

Les résultats d'analyses des différents composts ont été comparés aux normes reconnues internationalement pour la qualité des composts agricoles. Ces normes sont notamment :

- EAS 977:2019/EAC : East African Standards (Arik *et al.*, 2020)

-NFU 44-051 : (Afnor, 2006)

-NFU 44-095 : (Afnor, 2002)

-CCME : (Council, 2005)

CHAPITRE III : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. Caractérisation physico-chimique des intrants

La caractérisation physico-chimique des intrants nous indique la teneur en éléments dans chaque déchet et donne une idée sur les proportions à utiliser pour produire un compost de qualité.

Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques des intrants

Intrant	Paille de riz	B. V	Tithonia diversifolia	F poule	F porc	Phosphates naturels		
						P s	P p	P mél
Humidité : W (%)	18,48	75,3	82,62	65,81	62,68	-	-	-
M.S%	81,51	24,67	17,38	34,05	37,25	-	-	
M.O. T%	82	62,15	72	62,56	70,53	-		-
pH	5,21	7,03	6,92	7,08	6,84	5,89	5,3	5,68
CE (mS/cm)	9,80	4,55	10,13	5,98	5,21			
K (%)	1,89	2,12	1,42	2,08	1,96	0,240	0,132	0,073
P ₂ O ₅ (%)	0,91	2,37	1,281	2,335	2,184	25,33	13,753	17,85
P soluble dans H ₂ O (%)						0,019	0,015	0,016
COT%	24,76	42,65	39,45	38,24	28,44	0,079	0,066	0,072
N total%	0,60	2,12	2,31	2,42	2,19	0,038	0,032	0,035
C/N	41,26	20,11	17,07	15,80	12,98	2,078	2,062	2,057

B. V= Bouses de vaches ; F poules = fientes de poule ; F porc = fumier de porc ;

P s= phosphates naturels superficiels ; P p = phosphates naturels de profondeur ; P mél = mélange des phosphates superficiels et de profondeur

Les caractéristiques physico-chimiques des intrants montrent des variations importantes selon leur nature. Des intrants constitutifs des andains utilisés durant le compostage montre que ces intrants sont riches en MO. En outre, les pailles, la bouse de vache, la fiente de poule, le fumier de porc et le *Tithonia diversifolia* ont respectivement 82%, 62,15%, %, 62,56%, 70,53% et 72% de matière organique. La paille de riz, avec un taux de matière sèche (MS) élevé (81,51 %) et un rapport C/N de 40,58, présente une lente décomposition, ce qui limite sa minéralisation rapide.

En revanche, les bouses de vache, les fientes de poule et le fumier de porc ont des taux de MS plus faibles (24,67 % à 37,25 %) et des rapports C/N plus bas, favorisant une dégradation plus rapide et un apport efficace en azote.

Le pH varie de légèrement acide (5,21 pour la paille de riz) à légèrement alcalin (7,08) pour les fientes de poule), ces valeurs influent ainsi la disponibilité des nutriments. La conductivité électrique est plus élevée dans la paille de riz et le *Tithonia diversifolia*, indiquant une forte concentration en sels minéraux. En ce qui concerne le potassium (K), les fientes de poule et la bouse de vache en contiennent davantage, ce qui en fait de bons amendements pour la fertilité des sols.

Les phosphates naturels se distinguent par leur forte teneur en P_2O_5 (13,75 % à 25,33 %), bien que leur fraction soluble dans l'eau soit très faible, limitant leur biodisponibilité immédiate. Le mélange de phosphates semble offrir un compromis entre les sources superficielles et profondes. Ainsi, une combinaison judicieuse de ces intrants peut optimiser la fertilité des sols tout en favorisant une libération progressive des nutriments.

III.2. Evolution de la température au cours du compostage

Pendant le processus du compostage, les valeurs journalières de la température pour les huit andains ont été enregistrées. Les résultats des températures relevés durant le déroulement du processus de compostage sont présentés dans la figure 4 ci-dessus.

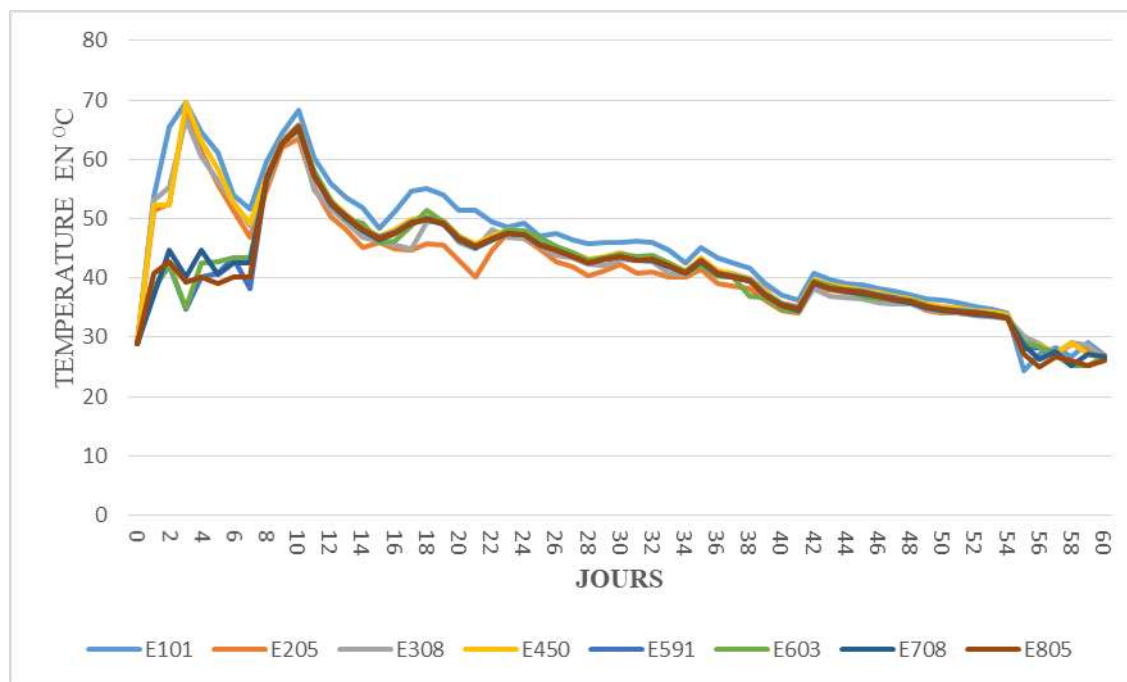


Figure 4: Evolution de la température durant le processus de compostage pour les huit andains

L'évolution de la température durant le compostage suit une courbe typique avec une phase mésophile initiale à 29°C, une montée rapide en phase thermophile a atteint 69,6°C dans 5 jours, puis a connu une baisse progressive vers la maturation.

Les températures maximales ont varié selon les traitements, avec E603, E450 et E591 atteignant des niveaux élevés, favorisant la décomposition rapide de la matière organique et l'hygiénisation du compost. En revanche, des composts enrichis avec les phosphates naturels ont montré des montées plus lentes, suggérant des différences dans la composition des intrants ou l'aération. Vers la fin du processus, la température redescend à environ 28-35°C, indiquant une stabilisation et une maturation du compost.

III.3. Evolution de l'aspect physique des andains et processus de la minéralisation des éléments

Lors du processus de compostage, est une succession de transformations biologiques, physiques et biochimiques qui modifient progressivement l'aspect des matières organiques initiales a été observée.

Les évolutions visuelles telles que la réduction du volume, le noircissement du matériau ou l'homogénéisation de la texture, les microorganismes décomposeurs qui sont le reflet d'une intense activité microbienne responsable de la dégradation des matières carbonées et azotées se sont manifestés. Le suivi de l'évolution physique des andains, couplé à des interventions techniques telles que l'arrosage et le retournement régulier ont constitué une méthode simple mais efficace pour juger du bon déroulement du processus de compostage jusqu'à sa phase de maturation.

La figure 5 illustre l'évolution de l'aspect physique des andains et l'effet des microorganismes dans la dégradation des matériaux compostés.



Figure 5: Evolution de l'aspect physique de l'andain lors du processus de compostage

(1) andain initial ; (2) Andain en processus de minéralisation ; (3) Exemples d'une espèce de microorganismes décomposeurs ; (4) processus d'arrosage ; (5) processus de retournement.

III.4. Evaluation de la qualité physique des composts obtenus

Les propriétés physiques des composts obtenus sont de textures granuleuses, d'odeur de terre, de couleur noir. La figure 6 ci-dessous illustre l'aspect physique des composts mûrs.



Figure 6: Aspect physique des composts produits

III.5. Caractérisation physicochimique des composts produits.

La caractérisation des composts produits se fait pour se rassurer que les composts sont mûrs et ne peuvent pas présenter des risques dans le milieu. Les résultats de la caractérisation des composts produits sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous

Source	E101	E205	E308	E450	E591	E603	E708	E805
pH	8,32	8,26	8,33	9,01	8,98	8,68	9,16	8,92
C.E (mS/cm)	2,355	3,91	2,32	3,01	5,46	3,03	3,94	3,19
K%	2,26	2,08	1,59	2,68	2,60	2,49	3,58	2,62
P₂O₅ (%)	3,56	2,99	3,42	1,05	0,88	0,69	3,12	3,14
Psol dans H₂O %	1,53	1,25	1,36	0,39	0,308	0,26	1,49	1,55
P sol dans C₆H₈O₇ %	2,18	2,13	1,96	0,5	0,39	0,31	2,16	2,09
COT%	11,82	13,02	10,03	13,31	15,48	12,21	10,01	12,44
MOT%	31,46	29,91	30,42	35,28	44,52	34,80	25,29	32,25
N total%	0,86	1,11	1,10	1,06	1,3	1,14	0,94	0,96
C/N	13,74	11,72	9,12	12,55	11,9	10,71	10,64	12,95

Tableau 3:Caractérisation physicochimique des composts produits

Le C/N stable avoisinant de 10 et le pH comprise entre 7 et 9 sont des caractéristiques à en tenir compte pour un compost mûr (Rucakumugufi *et al.*, 2021).

Le rapport C/N est l'un des paramètres indicateurs de la maturité du compost, oscille entre 9,12 et 12,95, confirme une bonne stabilisation et une maturité des composts, avec une minéralisation progressive de l'azote. L'azote total varie entre 0,86 % et 1,3 %, avec des valeurs relativement proches pour tous les composts.

Le pH des composts varie entre 8,26 et 9,16, indique une alcalinité modérée à élevée, favorable à la stabilisation de la matière organique cela est due à l'aération ou le retournement du compost favorisant la libération de CO₂ dissous, ce qui réduit l'acidité carbonique et augmente le pH. La hausse du pH traduit une intense activité microbienne dégradant les protéines, avec libération d'ammoniac et réduction des acides organiques parfois amplifiée par la présence des calcaires phosphatés.

La conductivité électrique allant de 2,315 à 5,46 mS/cm, reflète la concentration en sels solubles, avec des valeurs plus élevées pour certains composts comme E450, ce qui peut influencer la salinité du sol après application. La teneur en potassium (K) varie entre 1,59 % et 3,84 %, les composts E708 et E450 présentent des niveaux plus élevés, favorables à la croissance des plantes.

Le P₂O₅ oscille entre 0,69 % et 3,99 %, avec des valeurs particulièrement élevées dans E205 et E101, montre l'efficacité de l'ajout de phosphates naturels de Matongo. Cependant, sa solubilité dans l'eau reste relativement faible (0,26 % à 1,55 %), suggérant une disponibilité progressive pour les plantes.

La solubilité dans l'acide citrique varie de 0,31 % à 2,18 %, cela confirme que la majeure partie du phosphore est sous une forme moins immédiatement assimilable mais activable dans le sol.

En ce qui concerne la matière organique totale (MOT), les valeurs varient entre 25,29 % et 44,52 % traduisent une bonne stabilité organique, avec un maximum atteint par le compost E591.

III.6. Comparaison de quelques caractéristiques physicochimiques des composts obtenus aux valeurs limites des normes de qualité et les résultats d'autres chercheurs

Le tableau 4 présente une comparaison des résultats d'analyses physico-chimiques des composts obtenus au cours de cette étude avec les valeurs limites fixées par certaines normes de qualité (notamment EAS 977 :2019/EAC, NFU 44-051 et NFU 44-095).

Les résultats des composts obtenus sont aussi confrontés aux seuils normatifs et aux résultats d'autres recherches antérieures comme ceux publiés par Garba *et al.* (2020), Van den Berghe (1993) et Rucakumugufi *et al.* (2022), cela permet de situer la qualité des composts dans un contexte à la fois réglementaire et scientifique. Cette approche permet également d'identifier les composts les plus prometteurs sur le plan agronomique.

Tableau 4: Comparaison de quelques caractéristiques physicochimiques des composts obtenus aux valeurs limites des normes de qualité et les résultats d'autres chercheurs.

SOURCE	pH	K (%)	P ₂ O ₅ (%)	P soluble dans H ₂ O (%)	P soluble dans C ₆ H ₈ O ₇ (%)	MS (%)	COT (%)	MOT (%)	N total (%)	N+P+K (%)	C/N
E101	8,32	2,26	3,56	1,53	1,96	92,31	11,82	31,46	0,98	6,11	12,83
E205	8,26	2,08	2,99	1,25	2,13	89,64	13,02	29,91	1,11	6,74	11,69
E308	8,33	1,59	3,42	1,36	2,18	91,49	9,14	30,42	1,10	6,12	9,12
E450	9,01	2,68	1,05	0,39	0,5	89,05	13,31	35,28	1,06	4,79	12,56
E591	8,98	2,60	0,88	0,38	0,39	90,86	15,48	44,52	1,3	4,78	11,95
E603	8,63	2,49	0,69	0,26	0,31	92,69	12,21	34,80	1,14	4,32	10,82
E708	9,18	2,58	3,12	1,49	2,16	92,34	10,01	25,29	0,99	5,98	10,42
E805	8,92	2,62	3,14	1,55	2,09	90,58	12,44	32,25	0,96	6,57	12,95
EAS 977:2019/EAC	≥6,0 ≤9,5	≥ 0,5	≥ 0,5			≥40		≥20	≥ 1	≥4	≥9,1 ≤20,1
NFU44-051		<3	≥3			>30		>20	<3	≥7	≥9,1 ≤20,1
NFU44-095		<3	≥3			>50		>20	<3	≥7	≥8 ≤20
(Garba <i>et al.</i> , 2020)	8,45	-	3,668	1,691	-	-	13,26	33,80	1,16		11,68
(Van den Berghe, 1993)	8,86	2,48	3,890	1,589	-	90,44	12,09	28,65	1,04	6,41	10,51
(RUCAKUMUGUFI <i>et al.</i> , 2021)	8,4	1,67	0,13			81,55	15,84	45,01	1,03	2,79	14,04

L'analyse des composts issus du co-compostage de pailles de riz, de *Tithonia diversifolia*, d'adjuvants organiques variés (bouse de vaches, fumier de porc, fientes de poules), avec ou sans phosphates naturels, révèle une composition physicochimique globalement favorable à une valorisation agricole.

Les valeurs de pH varient entre 8,33 et 9,32 et indiquent des composts globalement alcalins. Un pH légèrement alcalin (8-9) est favorable pour limiter la volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac (Roig, 2004). En présence de phosphates naturels dans certains composts, le pH tend à augmenter légèrement, car ces phosphates sont souvent basiques ou faiblement solubles et libèrent des ions qui neutralisent les acides ce qui pourrait expliquer cette alcalinité. Cela dépend aussi de la matière organique et des réactions microbiennes (Nziguheba, 1998). Les composts alcalins favorisent ainsi une meilleure disponibilité du phosphore. Les valeurs de pH restent acceptables pour un usage agricole, bien que légèrement élevées pour E450 et E708.

Le rapport C/N, oscille entre 9,12 et 12,95, se situe dans l'intervalle optimal pour un compost mûr, apte à libérer progressivement les éléments nutritifs au sol. Ce paramètre est essentiel car s'il est trop élevé, ralentit la minéralisation des éléments tandis que quand il est trop bas, il peut indiquer une instabilité biologique comme la dit (Rucakumugufi *et al.*, 2022). Le bon équilibre du C/N favorise non seulement une meilleure assimilation des nutriments par les plantes, mais également une transformation efficace du phosphore organique en formes assimilables, notamment dans les composts enrichis (Sadaka et Engler, 2003).

La matière organique totale (MOT) est globalement élevée dans tous les composts (comprise entre 25,29 % et 44,52 %), elle traduit une richesse en composés humiques et en carbone stable. Selon Compaoré (2010), une teneur élevée de MOT joue un rôle fondamental dans la rétention et la disponibilité du phosphore, car la matière organique améliore la complexation des ions P, réduit leur lessivage, et facilite leur mise à disposition sous forme soluble (notamment dans l'eau et dans l'acide citrique). Ainsi, une MOT bien représentée contribue non seulement à la structure du sol, mais agit aussi comme réservoir actif de phosphore biodisponible.

Pour le K% tous les composts ont des teneurs en potassium comprises entre 1,59% et 2,68%. Les normes indiquent un seuil de 1% minimum et 3% maximum, les composts sont conformes, bien que certains approchent la limite supérieure.

Selon les normes EAS 977 :2019, NFU 44-051 et NFU 44-095, la MS du compost doit être supérieure respectivement à 40% 30% et à 50%. Tous les composts produits dans notre travail remplissent ces critères, indiquant une bonne déshydratation et stabilité, donc ils répondent aux normes en termes de MS et d'humidité.

Les valeurs du P_2O_5 dans les composts varient entre 0,69 % (E603) et 3,56 % (E205). Comparées aux normes de l'EAS 977:2019, NFU 44-051 et NFU 44-095 qui recommandent une teneur inférieure à 3 %, seuls les composts E205 et E308 dépassent cette limite. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Garba *et al.* (2020) avec 3,668 % et Van Den Berghe (1993) avec 2,89 %. Cela montre une bonne richesse en phosphore, particulièrement dans les composts enrichis. Cependant, pour que le phosphore soit réellement assimilable par les plantes, il doit être sous une forme soluble (Hammond, 1996). Le phosphore soluble dans l'eau est très faible dans tous les composts (0,26 % à 1,55 %), ces valeurs indiquent une faible biodisponibilité immédiate du phosphore aux plantes. En revanche, le phosphore soluble dans l'acide citrique ($C_6H_8O_7$) varie de 0,31 % (E603) à 2,18 % (E308 et E708), ce qui signifie que la majorité du phosphore devient progressivement disponible grâce à l'activité microbienne. En comparaison avec les valeurs des composts étudiés par Garba *et al.* (2020) et Van Den Berghe (1993), l'utilisation des phosphates naturels de Matongo a permis d'atteindre des niveaux de phosphore similaire. Les composts produits dans notre étude présentent des caractéristiques physico-chimiques globalement supérieures à celles des composts décrits par Rucakumugufi *et al.* (2022), en particulier en ce qui concerne la teneur en phosphore et l'efficacité fertilisante globale.

Les résultats des composts produits par Rucakumugufi *et al.*, 2022 bien qu'ayant une bonne stabilité organique (MOT entre 33,55 % et 45,01 %) et un rapport C/N optimal (12,82–14,04), montrent des teneurs très faibles en P_2O_5 (0,12–0,13 %). Cette carence peut s'expliquer par l'absence d'enrichissement en phosphates naturels dans leur formulation. En effet, ces composts sont élaborés uniquement à partir de déchets organiques ménagers, sans ajout de sources minérales, ce qui limite leur valeur phosphatée.

A l'inverse, les composts issus de cette étude ont été formulés à base de pailles de riz, de *Tithonia diversifolia* et d'adjuvants organiques (déjections d'élevage), avec intégration ciblée de phosphates naturels. Cette approche a permis d'obtenir des teneurs en phosphore total significativement plus élevées, atteignant jusqu'à 3,56 % (E101), et des valeurs de phosphore soluble dans l'eau et dans l'acide citrique allant jusqu'à 1,55 % et 2,18 % respectivement, elle indique aussi une meilleure biodisponibilité du phosphore pour les plantes.

III.7. Evaluation de l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les composts obtenus

Selon Lompo *et al.* (2007), l'apport de phosphate naturel accroît davantage les teneurs de phosphore total et ce dû à l'action des anions organiques (citrate et oxalate) provenant de la décomposition de la matière organique à partir d'un certain degré d'humification.

L'incorporation du compost pourrait libérer lentement le phosphore sous l'activité des micro-organismes et l'augmentation de l'activité de la phosphatase ce qui entraîne une plus grande minéralisation.

Un graphique de comparaison des résultats de teneur en phosphore a été fait pour les témoins et les composts enrichis avec les phosphates naturels de Matongo afin d'évaluer les différences de disponibilité du phosphore dues à cet enrichissement.

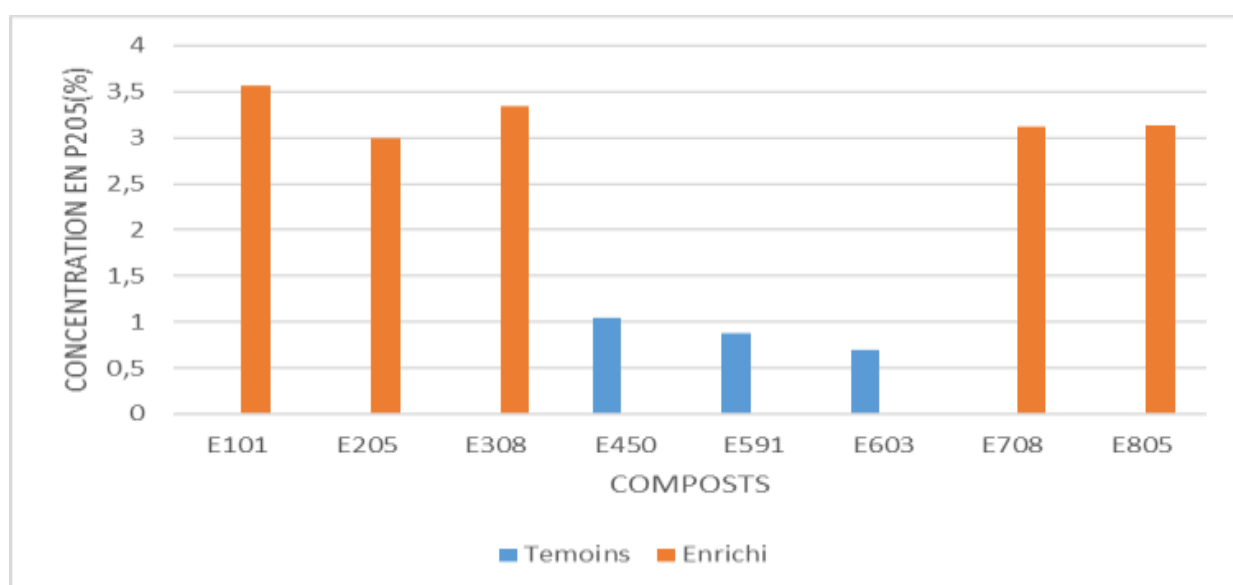


Figure 7: Teneur en P₂O₅ des composts témoins et enrichis

Les résultats du présent travail montrent une nette différence entre les composts témoins et les composts enrichis en termes de teneur en P₂O₅. Les composts témoins présentent des valeurs relativement faibles, variant de 0,69% (E603) à 1,05% (E450). En outre les composts enrichis affichent des concentrations nettement supérieures, allant de 2,99% (E205) à 3,56% (E101). En effet, une comparaison entre les composts ayant des formulations identiques en termes de biomasse organique, mais différant uniquement par la présence ou l'absence de phosphates naturels, montre des écarts notables. Le compost E101 présente une teneur en phosphore total

de 3,56 % contre seulement 1,05 % pour le compost E450, formulé avec les mêmes intrants organiques mais sans phosphates.

Cette différence correspond à une augmentation de 239 % du phosphore total liée à l'apport des phosphates naturels. De même, le compost E205 contient 2,99 % de P_2O_5 , contre 0,88 % pour E591 (sans phosphates), soit une hausse de 218,4 %. Le compost E308 (enrichi) atteint 3,42 % de P_2O_5 contre 0,69 % pour E603, cela traduit une augmentation de 226 %. Enfin, la comparaison entre le compost E805 (phosphates naturels superficiels) et E450 (même base organique sans phosphates) montre une augmentation de 199 % en P_2O_5 (passant de 1,05 % à 3,14 %). Ces résultats mettent clairement en évidence l'impact décisif de l'enrichissement minéral sur l'accroissement de la teneur en phosphore dans les composts, démontrant ainsi l'intérêt agronomique de l'ajout ciblé de phosphates naturels de Matongo dans les processus de co-compostage.

Les phosphates naturels de Matongo constituent une source de phosphore minéral peu soluble à l'état brut, mais leur interaction avec la matière organique lors du compostage favorise leur transformation en formes plus accessibles aux plantes. Cela a été aussi approuvé par Van Den Berghe (1993) lors de son étude portant sur l'efficacité de la roche phosphatée de matongo sur une culture de pomme de terre à Rabiro (0,16% de P soluble dans H_2O pour le compost témoin et 1,589% après incorporation des phosphates de matongo)

Dans les composts témoins, la fraction soluble dans l'eau est relativement faible, comprise entre 0,26% (E603) et 0,39% (E450). Cependant, dans les composts enrichis, elle est nettement supérieure, atteignant des valeurs comprises entre 1,25% (E205) et 1,55% (E805), une augmentation significative a été opérée entre les composts ayant la même base organique mais différant uniquement par l'ajout de phosphates naturels. Les composts E101 et E450, E205 et E591, E308 et E603 et enfin E805 et E450 ont montré respectivement des fractions hydrosolubles de (5,6) , (3,3) , (5,2) et (3,97) fois plus élevée que son équivalent non enrichi.

L'amélioration de la solubilité du phosphore dans l'eau est attribuée à l'action des matières organiques utilisées dans le co-compostage. La *Tithonia diversifolia*, en se décomposant, libère des acides organiques qui jouent un rôle fondamental dans la solubilisation du phosphore minéral (Nijimbere *et al.*, 2023). De plus, la décomposition de la matière organique produit du CO_2 et des acides humiques, qui forment des complexes avec les phosphates naturels de Matongo, facilitant ainsi leur dissolution.

III.8. Evaluation des critères d'innocuité des composts produits

III.8.1. Composition en éléments traces métalliques des composts produits

L'évaluation des métaux lourds dans le compost est essentielle pour garantir sa qualité environnementale et son innocuité lorsqu'il est utilisé comme amendement organique en agriculture. Une accumulation excessive de métaux lourds dans le sol peut entraîner des effets toxiques pour les cultures, les microorganismes et même les consommateurs par la chaîne alimentaire. Les éléments traces métalliques analysés dans notre travail sont le zinc, le cadmium, le cuivre, le nickel, le cobalt et le plomb.

Les résultats de la caractérisation de ces éléments sont présentés dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5: Teneurs en métaux lourds des composts produits et leur comparaison aux valeurs limites des normes de qualité et aux résultats d'autres chercheurs

Elément	Zn mg/kg	Co mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg	Pb (mg/kg)
E101	34,8	12,2	10,4	≤ 5	< 2,5	Excessivement élevée
E205	69,7	12,2	12,9	≤ 5	< 2,5	Excessivement élevée
E308	48,0	13,2	21,6	≤ 5	< 2,5	Excessivement élevée
E450	11,1	8,54	12,6	≤ 5	< 2,5	< 6
E591	58,7	20,7	16,7	≤ 5	< 2,5	< 6
E603	10,1	15,3	13,8	≤ 5	< 2,5	< 6
E708	48,7	13,6	23,5	≤ 5	< 2,5	Excessivement élevée
E805	66,6	18,0	20,3	≤ 5	< 2,5	Excessivement élevée
NFU44-051	< 600	-	<300	< 60	<3	< 180
NFU44-095		<30	<300	< 50	<3	<180
CCME	<500	< 50		< 70	<2,5	<150
EAS 977:2019	<1000		<300		<3	<100
(Garba <i>et al.</i> , 2020)	19		2,74	-	<1	31,8
(Getahun <i>et al.</i> , 2012)	128,6	11,3	<1	39	0,17	22,5
(Bustamante, 2008)	140	14,3	36	28		
(Rucakumugufi <i>et al</i> , 2022)	35,2	3,57	4,3	3,58	0,25	<4

CCME : Conseil Canadien du Ministère de l'Environnement

Les valeurs moyennes de concentrations en Cd, Zn, Co, Ni et le Cu (tableau 8) sont proches des résultats trouvés par, Garba (2020), Bustamante (2008) et Getahun *et al.* (2012).

Elles sont très faibles et bien en dessous des seuils réglementaires à l'exception des teneurs en plomb qui se montrent bien supérieures aux normes de qualité telles que proposées par la NFU44-051, NFU44-095 et le CCME. Comparativement aux résultats des analyses physicochimiques tel que rapportées par Rucakumugufi *et al.*, (2022) pour des composts produits localement sans adjonction de phosphates naturels, les teneurs en métaux sont très faibles : 35,2 mg/kg pour le Zn, 4,3 mg/kg pour le Cu, 3,58 mg/kg pour le Ni, 0,25 mg/kg pour le Cd et Pb <4 mg/kg. Ces niveaux sont encore plus bas que ceux de nos composts enrichis, ce qui s'explique par la nature des intrants utilisés (déchets organiques ménagers et végétaux locaux, sans apport de minéraux exogènes susceptibles d'augmenter la concentration en ETM).

III.8.2. Evaluation de la phytotoxicité des composts produits.

Les tests de phytotoxicité évaluent la maturité du compost en étudiant son effet sur la faculté germinative des cultures (Warman, 1999). A cet effet, le taux de germination (TG) et l'indice de germination (IG) sont analysés sur deux espèces de culture : les grains de maïs (*Zea mays L.*) et les grains d'arachide (*Arachis hypogea L.*).

Après une incubation de 72 heures pour les graines de maïs et 48 heures pour les graines d'arachides, les résultats obtenus sont illustrés à la figure 7.



Graines de maïs

Graines d'arachides

Figure 8: Photos d'illustration des graines de maïs et d'arachides en germination

Les résultats obtenus du taux de germination et d'indice de germination des graines d'arachides après 48heures et celles du maïs après 72 heures sont présentés dans le tableau 8 ci-dessus :

Tableau 6: Taux de germination et indice de germination des graines d'arachides et de maïs

Types de Graines	Dose		25%	50%	75%	100%	
	Ech						
GRAINES D'ARACHIDES	101	TG	36,5±0,001	28,22±0,996	25±0,010	23,48±0,024	
		IG	43,42 ±1,353	36,49±1,555	29,31±2,045	25,06±4,002	
	205	TG	38,24 ±0,131	30,51 ±0,453	26,69 ±0,235	24,24 ±0,064	
		IG	40,98 ±1,555	36,65 ±4,320	28,415 ±0,353	26,44 ±0,071	
	308	TG	57,5±3,535	47,5±3,535	45±000	27,5±3,535	
		IG	57,195±4,32	38,750±1,766	50,480±9,164	21,805±2,326	
	450	TG	85,795±6,427	65±000	70,5±3,535	47,5±3,535	
		IG	74,725±7,64	83,810±3,691	52,535±9,072	32,23±2,843	
	591	TG	75±7,071	62,5±3,535	67,5±3,535	52,5±3,535	
		IG	87,345±9,66	84,325±13,85	56,275±8,44	36,750±7,863	
	603	TG	70±000	70±7,071	57,5±3,535	55±000	
		IG	77,5± 3,535	62,5±0,00	46,230±5,812	27,200±5,374	
	708	TG	35±7,071	30±7,071	25±000	22,5±3,535	
		IG	39,445±4,744	29,915±4,150	30,275±2,439	25,700±4,101	
	805	TG	40±6,010	30±000	30±7,071	25±000	
		IG	45,44±1,081	42,65±3,68	34,16±1,65	24,53±2,363	
	GRAINES DE MAÏS	101	TG	55,651 ±0,000	40,210 ±2,934	25 ±000	22,002 ±0,00
			IG	58,98 ±1,65	45,98 ±0,439	26,85 ±1,081	25,45 ±0,710
205		TG	54,21 ±3,691	39,90 ±3,353	23,5 ±0,112	22,5 ±0,026	
		IG	60,24 ±0,480	41,86 ±0,042	28,29 ±0,003	26,218 ±4,10	
308		TG	55±7,07	62,5±3,535	62,5±10,60	57,5±3,535	
		IG	66,340±3,945	52,145±1,534	62,675±6,112	48,190±7,396	
450		TG	92,5±3,535	87,5±10,60	85±000	82,5±3,535	
		IG	147,745±10,344	111,965±5,480	91,225±5,112	80,460±2,934	
591		TG	95±7,071	85±14,14	77,5±24,74	77,5±24,748	
		IG	134,355±1,265	104,370±8,230	87,620±2,432	74,720±8,711	
603		TG	97,5±3,535	100±000	85±7,071	85±7,071	
		IG	99,205±1,195	82,085±40,199	89,205±12,240	79,295±2,382	
708		TG	67,5±3,535	52,5±17,67	62,5±10,60	5,5±3,535	
		IG	65,450±5,034	52,975±5,904	55,985±9,086	55,890±6,434	
805		TG	70±000	70±7,071	57,5±3,535	50±7,071	
		IG	64,95±7,785	56,60±3,362	55,605±6,99	52,292±3,91	

La comparaison des IG et TG des graines de maïs et d'arachides a été fait selon les différentes doses des composts produits. Les résultats sont présentés à la figure 9

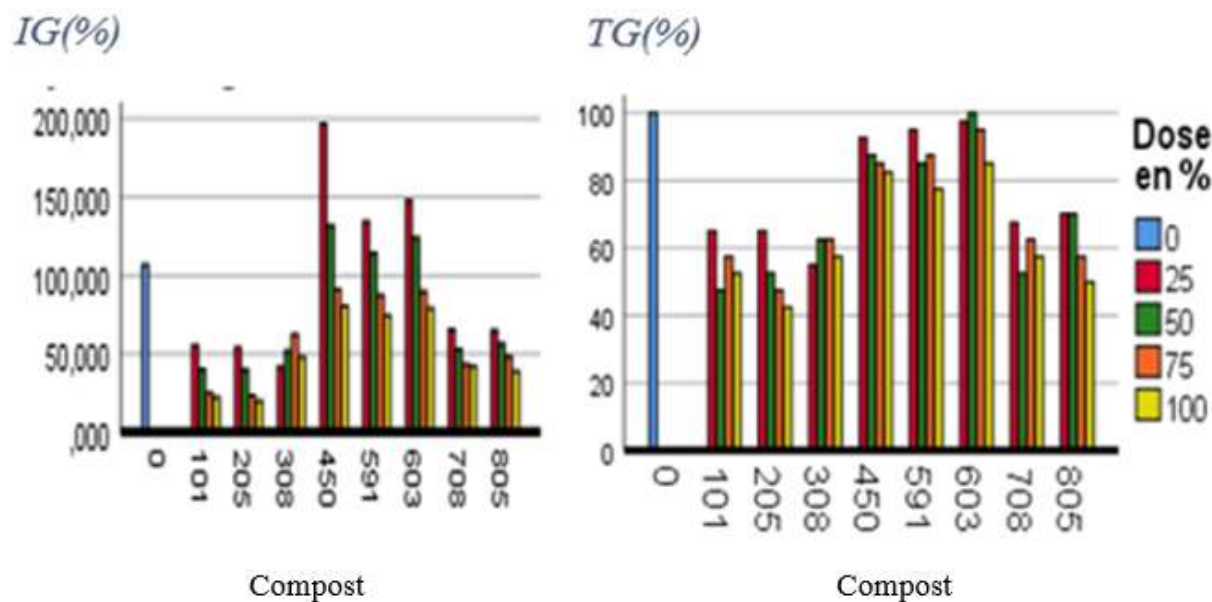


Figure 9: IG (%) et TG (%) des graines de maïs et d'arachides

❖ Taux de Germination (TG)

Le taux de germination (TG) détermine le pourcentage de graines ayant germé et permet d'évaluer l'impact des composts sur la viabilité des graines.

Les résultats ont montré que :

- Pour les graines d'arachides :

A la dose 100% de compost, le TG chute significativement pour tous les composts cela confirme une forte toxicité à haute dose. Cette dose est répulsive (figure 8)

A 25% de compost, les composts E450 (85 %) et E591 (77,5 %) ont les TG les plus élevés, c'est un environnement favorable à la germination.

-Pour les graines de maïs :

A la dose 50% et 75%, les TG restent moyennement élevées, en particulier pour E450 les graines ont germé à plus de 50%, ce qui signifie un effet positif sur la germination du maïs.

A la dose 25% de compost, E603 (87,5 %) et E450 (92%) montrent un TG élevé, ce qui indique un bon apport en nutriments sans effet toxique. Elle est la meilleure dose présentant moins d'effet toxique pour la germination des graines testées

Les composts enrichis sont les moins favorables, ils présentent des TG bas comparablement aux composts témoins notamment pour les arachides.

❖ **Indice de Germination (IG)**

- Pour les graines d'arachides :

Le compost E450 présente l'Indice de Germination le plus élevé, démontrant son efficacité à favoriser la germination des graines d'arachide. A l'inverse, les composts enrichis affichent les valeurs d'IG les plus faibles, suggérant une possible phytotoxicité. A une concentration de 50%, on observe une diminution progressive de l'IG, ce qui pourrait indiquer un effet inhibiteur à des doses supérieures. A la dose de 25%, les valeurs d'IG sont élevées ce qui indique une meilleure dose, favorable aux cultures

-Pour les graines de maïs :

A une concentration élevée (100%), tous les composts entraînent une réduction de l'Indice de Germination (IG), mettant en évidence l'impact négatif d'un excès de compost, susceptible de provoquer un effet phytotoxique. Les valeurs obtenues restent très faibles (entre 21,8% et 36,7%), confirmant que des doses trop élevées inhibent la germination des graines.

A 75% de compost, l'IG continue de diminuer par rapport à ceux de 50% et de 25%, avec un effet inhibiteur particulièrement marqué pour les composts enrichis, contrairement aux composts témoins.

A une dose de 50%, bien que l'IG enregistre une légère baisse, les valeurs restent relativement élevées, ce qui suggère que ces composts contribuent à améliorer la germination des graines de maïs.

A une dose de 25 %, l'Indice de Germination (IG) est particulièrement élevé, notamment pour les composts E450 (147,745 %) et E591 (134,355 %), ce qui suggère un effet stimulant sur la germination. Les composts à base de bouse de vache se révèlent les plus efficaces, offrant des conditions favorables à la germination lorsqu'ils sont appliqués à faible dose (25 %).

Le maïs montre une meilleure tolérance aux composts que l'arachide, affichant des valeurs d'IG et de Taux de Germination (TG) globalement plus élevées.

Les composts témoins apparaissent les plus bénéfiques pour la germination des deux cultures, tandis que les composts enrichis présentent une phytotoxicité marquée.

Ainsi, une dose de 100% est répulsive tandis que pour optimiser la germination et favoriser la croissance des cultures, l'application du compost devrait être ajustée à une dose de 25 %.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

A. Conclusion générale

Cette étude a porté sur l'amélioration de la teneur en phosphore des composts grâce au co-compostage des pailles de riz, des adjuvants organiques et des phosphates naturels de Matongo. Les analyses réalisées ont confirmé la pertinence des hypothèses initiales, révélant une amélioration notable des propriétés agronomiques des composts enrichis, particulièrement en matière de concentration en phosphore total et en phosphore soluble, indicateurs clés de leur valeur fertilisante.

Les composts témoins, sans ajout de phosphates naturels, présentent des teneurs relativement faibles en P_2O_5 , variant de 0,69 % (E603) à 1,05 % (E450). En revanche, les composts enrichis affichent des concentrations significativement plus élevées, allant de 2,99 % (E205) à 3,56 % (E101). Cette augmentation s'accompagne d'une hausse du phosphore soluble dans l'eau (1,55 %) et dans l'acide citrique (2,18 %), améliorant ainsi sa biodisponibilité. De plus, les formes solubles ont été multipliées par 3 à 6 fois, illustrant une meilleure assimilation du phosphore. Le compostage favorise la minéralisation du phosphore sous l'action des microorganismes, améliorant ainsi sa disponibilité.

L'ajout de déjections animales joue un rôle essentiel dans ce processus. Une analyse comparative des adjuvants organiques met en évidence des performances variables selon le type de déjection utilisé. La bouse de vache se démarque comme le meilleur adjuvant grâce à sa richesse en matière organique stable, son rapport C/N équilibré (entre 11,69 et 11,95), propice à la minéralisation, et sa capacité à faciliter la solubilisation du phosphore en synergie avec les phosphates naturels.

Cependant, une limite importante a été identifiée lors de l'analyse des éléments traces métalliques (ETM). Les composts témoins (E450, E591 et E603) contiennent des concentrations détectables mais faibles (<6 mg/kg).

Ainsi, bien que cette étude démontre le potentiel du co-compostage comme stratégie d'amélioration de la teneur en phosphore par l'enrichissement des composts avec des phosphates naturels, la présence excessive de plomb constitue un obstacle à leur application.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier l'origine de cette contamination et développer des solutions permettant de stabiliser ou de décontaminer ces composts avant leur utilisation dans une agriculture durable.

B. Contributions

- Éviter l'application des composts enrichis tant que leur innocuité vis-à-vis des métaux lourds n'est pas confirmée, même si leur richesse en phosphore est avérée.
- Développer des protocoles de stabilisation ou de réduction des métaux lourds en identifiant l'origine de la contamination et explorer des solutions de décontaminer les composts avant leur utilisation pour une agriculture durable
- Étendre la recherche sur les interactions entre matière organique et phosphates naturels de matongo à travers d'autres types de résidus agricoles et adjuvants, afin d'optimiser les formulations selon les ressources disponibles localement, les conditions climatiques et les facteurs édaphiques du pays.

Références bibliographiques

1. Afnor, B. (2002). Du déchet à l'amendement organique : mesurer la qualité des composts : Produits résiduaire organiques – Spécifications et marquage. 20. **Consulté le 30/6/2025**
2. Afnor, B. (2006). NFU 44-051. Amendements organiques, dénominations, spécifications et marquages. www.afnor.org: //Association Française de Normalisation, 34 p
3. Arik, M., Bamenyekanye, E., Fimbo, A., Kabatende, J., Kijo, A. S., Simai, B., Siyoi, F., Azatyan, S., Ambali, A., & Cooke, E. (2020). Optimizing the East African Community's catalogue of east african standards : A roadmap for the future. *PLoS medicine*, 17(8), e1003129.
4. Avnimelech, Y., Bruner, M., Ezrony, I., Sela, R., & Kochba, M. (1996). Stability Indexes For Municipal Solid Waste Compost. *Compost Science & Utilization*, 4(2), 13-20. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1996.10701825>
5. Bahadori, M., & Tofighi, H. (2016). A Modified Walkley-Black Method Based on Spectrophotometric Procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(2), 213-220. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1118118>
6. Barles . S. (2005). *L'invention des déchets urbains : France, 1790-1970—Sabine Barles—Google Livres.*
7. Ben M'Barek. (1989). Évaluation de la maturité et de la qualité chimique des substrats de croissance À base de methacompost avicole pour une meilleure exploitation. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/295>. journal P-issn 1112-3680 / E-issn 2521-9782
8. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
9. Bertolini, G. (1998). Collecte selectives multi-materiaux : Approche des coûts de tri (en centre de tri). *Soil Biology and Biochemistry*, 122(1), 13-20.
10. Brinton, W. F. (2000). Compost quality standards and guidelines : An international view. Woods End Research Laboratory Inc., ME, 10, p26.

11. Bustamante. (2008). L'agriculture biologique et l'agriculture traditionnelle : Une alternative interculturelle Lettres vertes. Revue latino-américaine d'études socio-environnementales. <http://ojs.freddyguerrero.com/index.php/letrasverdes/article/view/844>
12. Casas, S. (2005). Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen [PhD Thesis, Université du Sud Toulon Var]. <https://theses.hal.science/tel-00009551/>
13. CEAEQ. (2014). Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). (2014). Détermination du carbone total – Méthode par combustion sèche. MA. 405 – C.1.1, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), Québec—Recherche Google. <https://www.google>. MA.405-C.1.1,Rev 3 **Consulté le 15/6/2025**
14. Charnay, F. (2005). Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : Élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost [These de doctorat, Limoges]. <https://theses.fr/2005LIMO0035>. 49, 88-96
15. Chennaoui, M., Salama, Y., Makan, A., & Mountadar, M. (2016). Valorisation Agricole D'un Compost Produit À Partir Du Compostage En Cuve Des Déchets Municipaux. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(35), 247. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n35p247>
16. Compaoré, E., Fardeau, J.-C., Morel, J.-L., & Sedogo, M. P. (2001). Le phosphore biodisponible des sols : Une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures*, 10(2), Article 2.
17. Compaoré, E., & Nanéma, L. S. (2010). Compostage et qualité du compost de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Tropicultura*, 28(4), 232-237.
18. Council, C. (2005). Guidelines for Compost Quality. https://www.topspray.com/wp-content/uploads/2020/06/compostgdlns_1340_e-1.pdf
19. Diaz. (2009). Chapitre 5 Systèmes utilisés dans le compostage—Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S147874820780008X>
20. Douma, N. T. (2013). Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie [PhD Thesis, Limoges]. <https://theses.fr/2013LIMO4038>
21. Dubuisson. (2016a). Phosphore du sol. [html/https://books.google\(fertilisation.edu.fr/nutrition des plantes\)](http://html/https://books.google(fertilisation.edu.fr/nutrition%20des%20plantes)).

22. Dubuisson. (2016b). Religion and Magic in Western Culture—Daniel Dubuisson—Google Livres. <https://books.google.bi/books?hl>
23. Ethridge, D. (2009). Research in the department of agricultural and applied economics at texas tech university; one historical perspective. *Sciences Naturelles et Appliquees* 25(1), 19-23
24. FAO. (2003). Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. <https://www.fao.org/4/y5104f/y5104f05.htm>
25. FAO. (2014). Effet des différents taux de chamage sur les caractéristiques des grains communs du sol, p et les caractéristiques agronomiques des haricots communs dans l'est de l'Ouganda. <https://ir.busitema.ac.ug/handle/20.500.12283/4132>
26. Garba, O., Mella, M. T., Kiari, S. A., & Grema, M. H. I. (2020). Valorisation de glume de mil et balle de riz par compostage : Caractérisations physico-chimiques des composts.
27. Getahun, T., Nigusie, A., Entele, T., Gerven, T. V., & Bruggen, B. V. der. (2012). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.05.007>
28. Ghazi, I. E., Berni, I., Menouni, A., Amane, M., Kestemont, M.-P., & Jaafari, S. E. (2020). Etude de la relation entre l'exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier et l'incidence des pathologies respiratoires au niveau de la ville de Meknès, Maroc.
29. Gichuru. (2014). L'effet des engrais au phosphore et à l'azote sur le rendement des grains, l'absorption d'éléments nutritifs et l'efficacité de l'utilisation de deux variétés de maïs (zee mays L.) nourries à l'état de pluie à Haplic Lixisol dans la zone de transition forêt-savannah du Ghana. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-016-0073->
30. Gouvernement du Burundi. (2021). Code de l'environnement de la République du Burundi. **Consulté le 05/4/2025**
31. Hammond. (1996). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable: Test de solubilité. <https://www.fao.org/4/y5053f/y5053f08.htm>
32. Holford I. (1997). Compostage des déchets solides issu des grandes entreprises de transformation des produits alimentaires en Californie. <https://www.publish.csiro.au/sr/s96047>

33. ISABU. (2022). Cartographie de la Fertilité des Sols du Burundi et des Besoins des Principales Cultures Vivrières en éléments Nutritifs (2022^e éd.). <https://hub.ifdc.org/items/4a9d40ec-424c-4152-8af4-c5fcea7960b6>
34. ISTEEBU. (2011). Burundi-Enquête Nationale Agricole 2011-2012-Data catalog. <https://www.google.com/search?C2011> **Consulté le 05/4/2025**
35. Jemali. (1996). Étude du compostage et des possibilités de valorisation agricole du compost de L'U.T.O.M. de la wilaya de rabat-Salé. <https://toubkal.imist.ma/handle/123456789/7815>
36. Jimenez, E. I., & García, V. P. (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, ecosystems & environment*, 38(4), 331-343.
37. Koledzi, K. E. (2011). Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo) : Approche méthodologique pour une production durable de compost [PhD Thesis, Limoges]. <https://theses.fr/2011LIMO4002>
38. Koledzi, K. E., Baba, G., Matejka, G., Ludington, G., Segbeaya, K. N., Tchangbedji, G., Pilabana, A., & Morizot, G. (2012). Conception, installation et fonctionnement d'une installation décentralisée de tri-compostage de résidus solides urbains dans les quartiers de Lomé. *Environnement, Ingénierie & Développement*. <https://eid.episciences.org/7852>
39. Laaref Abdelmadjid, Benjedah Abdennour, Meddour, R., & Misseraoui Mohamed Amine. (2020). Principales causes de la pollution toxique. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33243.39207>
40. Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource technology*, 86(2), 131-137.
41. Lompo, F., Bonzi, M., Bado, B. V., Gnankambary, Z., Ouandaogo, N., Sedogo, M. P., & Yao-Kouame, A. (2007). Effets des modes de gestion de la fertilité sur la solubilisation des phosphates naturels dans un lixisol en zone nord soudanienne du Burkina Faso. *Sciences Naturelles et Appliquées*, 29(1 et 2), 37-55.
42. Meena. (2021). Synthèse verte de nanoparticules à l'aide d'extraits de plantes : Une revue—*Environmental Chemistry Letters*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01074-x>

43. Misra. (2005). "Green" composites from recycled cellulose and poly(lactic acid): Physico-mechanical and morphological properties evaluation | Journal of Materials Science. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-005-1998-4>
44. Mizero, M., NDIKUMANA, T., & JUNG, G. (2015). Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura. Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité, 1(1-7). <https://orbi.uliege.be/handle/2268/220775>
45. Mulungula. (2013). #7832—Essai de compostage comme voie de valorisation des déchets ménagers solides dans la ville de Bukavu au sud-Kivu (RD Congo). <https://eid.episciences.org/7832>
46. Mustin, M. (1987). Le compost: Gestion de la matière organique. <https://www.sidalc.net/search/Record/unfao%3A634274/Description>
47. Ndayishimiye. (2023). Optimisation des pratiques de retournement dans le compostage de biomasses locales au Burundi. Revue Burundaise des Sciences Agronomiques, 6(2), 40–51.
48. Nduwimana, O. (2013). Evaluation de la fertilité des sols burundais. Sciences Agronomiques, 3, 18-21.
49. Nelson. (1982). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter—Nelson—1982—Agronomy Monographs—Wiley Online Library. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
50. Nelson et sommers. (1990). Effects of Humidity and Contaminant Concentration on Respirator Cartridge Breakthrough: American Industrial Hygiene Association Journal: Vol 51, No 4. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15298669091369547>
51. NIJIMBERE, S., KWIZERA, C., IRAKOZE, W., MBONIHANKUYE, C., & NSHIMIRIMANA, B. (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 rendement d'amarante au Burundi. Afrique SCIENCE, 22(6), 44-56.
52. Nziguheba. (1998). Franches de phosphore dans le sol et adsorption affectées par les sources organiques et inorganiques—Plante et sol. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004389704235>

53. PAPAB. (2020). Projet d ' Appui à la Productivité Agricole au Burundi (PAPAB) : Activités et résultats du projet en 2019. <https://aidstream.org> > **Consulté le 15/6/2025**
54. Paul A. (2014). Accumulation de composés aliphatiques dans le sol avec augmentation de la température annuelle moyenne—ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0146638014001843>
55. Rafolisy, T., Thuriès, L., Técher, P., Moussard, G. D., & Paillat, J.-M. (2015). Co-compostage de boues de laiterie et de fumier de bovins à l'Ile de la Réunion : Hygiénisation, pertes de nutriments et homogénéité du compost produit. Publisher: Presses agronomiques de Gembloux. <https://agritrop.cirad.fr>
56. Rocher. (2008). Les contradictions de la gestion intégrée des déchets urbains : L'incinération entre valorisation énergétique et refus social | Cairn.info. <https://shs.cairn.info/revue-flux1-2008-4-page-22?lang=fr>
57. Roig. (2004). Application des bio solides. Réponse du sol à différents degrés de stabilisation de la matière organique traitée—Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X0300182X>
58. Roose, E., & Isabelle., khuyanta. (2015). Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : Contribution à l'agroécologie. *Agriculture, ecosystems & environment*, 38(2), 15-18.
59. Rucakumugufi, D., Dieng, M., Ntakarutimana, V., Sambe, F. M., Bigumandondera, P., & Diop, C. M. (2021). Co-compostage des déchets solides ménagers avec les déjections d'élevage : Optimisation du rapport C/N des substrats de départ. *Afrique Science*, 18(2), 94-107.
60. Rucakumugufi, D., Nkurunziza, E., Bigumandondera, P., Kaboneka, S., & Diop, C. M. (2022). Influence du rapport C/N des intrants sur la qualité du compost produit. *Afrique Science* 20(6)(2022),14-26.ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>
61. Sadaka, S. S., & Engler, C. R. (2003). Effects of Initial Total Solids on Composting of Raw Manure with Biogas Recovery. *Compost Science & Utilization*, 11(4), 361-369. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2003.10702146>
62. Saidi-Boulahia. (2018). Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation | *Journal of Renewable Energies*. <https://revue.cder.dz/index.php/rer/article/view/712>
63. Soudi, B. (2001). Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost : Cas de petites et moyennes communes au Maroc. 10.

64. Straimer, J., Gnädig, N. F., Witkowski, B., Amaratunga, C., Duru, V., Ramadani, A. P., Dacheux, M., Khim, N., Zhang, L., Lam, S., Gregory, P. D., Urnov, F. D., Mercereau-Puijalon, O., Benoit-Vical, F., Fairhurst, R. M., Ménard, D., & Fidock, D. A. (2015). K13-propeller mutations confer artemisinin resistance in *Plasmodium falciparum* clinical isolates. *Science*, 347(6220), 428-431. <https://doi.org/10.1126/science.1260867>
65. Tiessen. (2009). Information sur les mécanismes de transformation insoluble des phosphates induits par les interactions des microbes composés pendant le compostage—Sciences de l'environnement et recherche sur la pollution. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13113-3>
66. Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y., & Hodgkiss, I. J. (1997). Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter. *Bioresource Technology*, 62(1-2), 37-42.
67. Tshala, U. J., Kitabala, M. A., Tunda, M. J.-P., Mufind, K. M., Kalenda, M. A., Kapele, K. G., & Nyembo, K. L. (2017). Vers une valorisation des déchets ménagers en agriculture (péri) urbaine à Kolwezi : Caractérisation et influence de la saisonnalité. *Journal of Applied Biosciences*, 112, 11072-11079.
68. Van den Berghe. (1993). Efficacité de la roche phosphatée de Matongo au travers d'un compostage sur une culture de pomme de terre sur un sol acide de Rapiro (Burundi). <https://scholar.google.com>
69. Vance P. (2001). Fixation azotonique symbiotique et acquisition de phosphore. La nutrition végétale dans un monde de déclin des ressources renouvelables et la physiologie des plantes—Oxford Academic. <https://academic.oup.com/plphys/article-abstract/127/2/390/6103258>
70. Warman, P. R. (1999). Evaluation of Seed Germination and Growth Tests for Assessing Compost Maturity. *Compost Science & Utilization*, 7(3), 33-37. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701972>
71. Zapata, E., & Roy, R. N. (2004). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-fao-it-20.500.14283-Y5053F/Description>
72. Zink J. (2004). Influence de la nutrition sur l'excrétion d'azote, de phosphore, de cuivre et de zinc des porcs, et sur les émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et

d'odeurs | INRAE Productions Animales. <https://productions-animales.org/article/view/3332>

73. Znaïdi, A. (2002). Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes [PhD Thesis, Mediterranean Agronomic Institute of Bari]. <https://orgprints.org/3064/>

ANNEXES

A. Détermination des paramètres physico-chimiques

A.1. Humidité et Matière sèche (MS)

Principe : L'analyse de l'humidité dans les matières organiques repose sur les méthodes de la détermination de la teneur en eau de l'échantillon. (Nelson et Sommers, 1990)

La méthode d'analyse de la matière sèche (MS) dans les végétaux consiste au séchage de l'échantillon choisi dans un four à température contrôlé et précis (105°C) pendant 24h à 48h. Après séchage et refroidissement, la matière sèche est calculée à partir de la différence de poids.(Nelson, 1982)

Mode opératoire selon AFNOR NF U44-171(1996)

- Pesage d'une masse M_1 de l'échantillon frais contenue dans des creusets en porcelaine ;
- Introduction de cette masse(M_1) dans une étuve portée à 105°C pendant 24h ;
- Pesage d'une nouvelle masse M_2 après refroidissement à température ambiante dans un dessiccateur ;
- La procédure continue jusqu'à avoir une masse constante

A.2. Le pH

Le pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique des déchets à composter. Lors de la dégradation aérobie, on distingue deux phases :

La phase acidogène : se produit au début du processus de dégradation et est caractérisée par une diminution de pH vers $\text{pH} = 6$. La diminution du pH est la conséquence de la production d'acides organiques et de dioxyde de carbone(CO_2) par les bactéries acidogènes à l'origine de la décomposition du matériel organique complexe(Chennaoui et al., 2016).

La phase d'alcalinisation : qui est le résultat d'une part, d'une production ammoniacale à partir de la dégradation des amines protéiques lors du processus d'ammonification et d'autre part d'une libération des bases auparavant intégrées à la matière organique(Meena, 2021).

Mode opératoire : Selon la norme ISO 10-390

A.3. Matière organique totale (MOT)

Le rôle de la matière organique dans le sol est très essentiel. En plus de la structuration du sol, elle améliore la capacité d'échange cationique constituant ainsi un réservoir de fertilisants. Elle améliore également la capacité de rétention en eau du sol et en conséquence les relations sol-plante-eau.(Koledzi et *al.*, 2012).

La minéralisation importante de la matière organique entraîne une diminution des teneurs en matières organiques au cours du compostage. Les composts se caractérisent donc par des teneurs en matière organique inférieures à celles des déchets bruts(Koledzi et *al.*, 2012).

Mode opératoire

-Le broyage préalable de l'échantillon et le tamisage à l'aide des tamis de 800 μ m d'ouverture ;

-Etuvage de l'échantillon à 105°C pendant 24h et après on pèse l'échantillon pour obtenir la masse M_1 ;

-Ensuite, on fait la calcination de l'échantillon (de masse M_1) à 550°C pendant 4heures et on pèse l'échantillon pour avoir la masse M_2 ;

A.4. Phosphore

❖ Phosphore totale (P_2O_5)

Principe : le dosage est doté par le principe de la formation du complexe phospho-vanado-molybdiqque de couleur jaune lu au spectrophotomètre à 420nm.(Dubuisson, 2016)

-Mode opératoire

2g de l'échantillon ont été pesés dans des creusets en porcelaine et mis dans un four à 400°C pendant 18 à 24h et la cendre récupérée a été attaquée avec 3,5ml d'acide nitrique par 1g d'échantillon. Puis on a procédé à une filtration lente pour avoir des solutions mères

A partir des solutions -mères, 3 dilutions ont été préparées (1/50 ; 1/20 ; 1/100) dans des jaugés appropriés (100ml) au moyen des pipetes

Rincer les jaugés avec de l'eau distillée au moyen d'un jet de pissette

Ajouter une quantité de la solution vanado-molybdique équivalent à 1/10 de la capacité du jaugé

Porter à volume avec de l'eau distillée

Boucher et agiter

Lire après 30 minutes au minimum au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 420 nm, après avoir passé la courbe d'étalonnage

❖ **Phosphore Soluble (Méthode Olsen)**

-principe :

L'acide phosphorique est extrait par l'oxalate d'ammonium. Le rapport compost/solution est égal à 1/25. Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe de l'acide phosphorique et de l'acide molybdique. Dans la solution d'oxalate d'ammonium contenant un phosphate, l'addition d'un réactif sulfomolybdique et d'une solution d'acide ascorbique provoquée, par chauffage, le développement d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en ortho phosphate.

-Mode opératoire :

Peser 4 g de compost broyé et passé au tamis de 2 mm et introduire dans un flacon de 150/200 ml environ.

Ajouter 100 ml d'une solution d'oxalate d'ammonium 0.2 N et de pH 6.5 à 7.0.

Agiter pendant 2 heures ; puis filtré.

Recueillir la solution dans un flacon de 100 ml.

Prélever 1.5 ml de la prise d'essais dans une fiole de 25 ml.

Ajouter 2 ml de réactif sulfomolybdique et 6.5 ml d'une solution à 1 g/l d'acide ascorbique.

Passer les fioles au bain marie bouillant pendant 10 à 12 min

Laisser refroidir

Passer à spectrophotométrie à 650 nm

A.5. Azote totale (méthode Kjeldahl)

- Principe de la méthode Kjeldahl(Charnay, 2005)

Le principe consiste à détruire la matière organique par l'action de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur chimique. L'azote organique est alors converti en azote minéral sous forme de sulfate d'ammonium. La solution sulfurique est rendue fortement alcaline puis l'ammoniac est déplacé par un excès de soude caustique par entraînement à la vapeur. L'ammoniac (NH₃) distillé est recueilli dans l'acide borique additionné d'indicateurs et puis titré par l'acide sulfurique de normalité 0,05N et de facteur de correction donné.

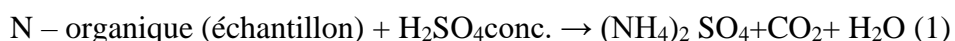
- Mode opératoire :

Le dosage de l'azote total par la méthode Kjeldahl comporte 3 phases à savoir : la minéralisation, la distillation et le titrage.

1° Une minéralisation par attaque acide

Dans un ballon Kjeldahl de 500 ml, introduire 1g de poudre fine de l'échantillon, ajouter 25 ml d'acide sulfurique concentré et une cuillère d'un mélange du CuSO₄ ; K₂SO₄ et FeSO₄ (catalyseur chimique). Rincer les parois du ballon au moyen d'un jet de pissette et chauffer sous hotte jusqu'à l'apparition d'une coloration bleue-verte de la solution et à la réduction au minimum de cette précédente.

Cette étape se résume par la réaction chimique ci-après

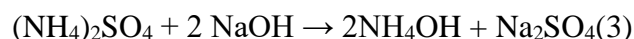


2° Neutralisation et distillation

Après refroidissement et dilution avec au moins 300 ml d'eau distillée, ajouter à la solution obtenue 1g de thiosulfate de sodium. Ensuite, apprêter l'appareillage de distillation par entraînement à la vapeur puis en inclinant le ballon, ajouter un excès de NaOH 50% (au minimum 75 ml) jusqu'à l'obtention du milieu basique. Connecter le ballon à l'appareil de distillation tel que l'extrémité du réfrigérant plongé dans une solution de 50 ml d'acide borique 2% à laquelle quelques gouttes d'indicateurs (méthyl rouge et vert de bromo-crésol) ont été additionnées. La distillation se fait en chauffant modérément et régulièrement.

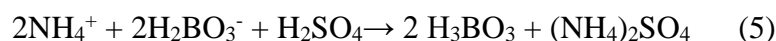
L'entraînement de l'ammoniac se produit assez rapidement et il faut continuer la distillation jusqu'à ce que le volume de la solution borate atteigne au moins 150 ml.

Les réactions mises en jeu dans cette phase sont :



3 °Titrage

Après la distillation, le titrage avec l'acide sulfurique de normalité 0,05N a été effectué jusqu'au point final de l'indicateur et puis enregistrer le volume de l'acide utilisé en (ml). Cette phase se résume par la réaction suivante :



Coloration bleue coloration rouge

4° Calcul du facteur de correction (fk)

Prélever 3ml de la solution Na_2CO_3 et titrer par H_2SO_4 de normalité N en présence de phénolphtaléine jusqu'à virage du rouge à l'incolore. Soit V le volume de H_2SO_4 ajouté, le facteur correctif fk est donné par la relation : $\text{fk} = \frac{3\text{ml} \times 0,05}{V \cdot N}$ Le calcul de ce facteur de correction a montré que $\text{fk} = 1$.

A.6. Dosage du Carbone organique total (méthode de Walkley et Black)

- Principe (Bahadori & Tofighi, 2016)

Le carbone organique total dans les solides peut être déterminé par titrage. Pour ce faire, une solution de bichromate de potassium est ajoutée à un échantillon en présence d'acide sulfurique.

Après la réaction, le dosage de la quantité de bichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon permet d'établir la concentration de carbone organique total.

- Mode opératoire

Peser environ 0,25 g du compost dans une fiole conique de 250ml et y ajouter 10ml de bichromate de potassium 1N.

Ajouter 20 ml d'acide sulfurique concentré et placer un verre de montre sur la fiole conique.

Agiter vigoureusement pendant une minute et laisser reposer pendant 30minutes.

Rincer le verre de montre et ajouter 150 ml d'eau déminéralisée, 10 ml d'acide phosphorique concentrée et 10 à 15 gouttes de la solution indicatrice de ferroïne.

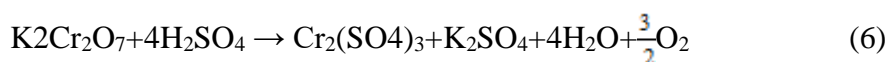
Titre l'excès de bichromate de potassium avec la solution de sulfate ferreux 0,5N, lors de l'apparition de la coloration turquoise titrer lentement jusqu'à la coloration finale brune.

Noter le volume utilisé.

Faire le témoin suivant la même procédure sans l'échantillon.

En considérant les concentrations de sulfate ferreux et du bichromate de potassium, chaque ml de bichromate de potassium qui réagit correspond à 3 mg de Carbone. Sachant que l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium est à 77%, le facteur correctif est déterminé par la relation suivante : $0,003 \times \frac{100}{77} = 0,004$.

Les équations de la réaction sont :



A.7. Dosage de Potassium (%)(Rafolisy *et al.*, 2015)

Le principe de dosage du potassium est basé sur la précipitation des ions chlorures liés au potassium par un excès de la solution titrée de nitrate d'argent et dosage de l'excès d'AgNO₃ avec une solution de Thio cyanate d'ammonium NH₄SCN de titre connu en présence d'alun ferrique comme indicateur coloré.

- Mode opératoire

Peser 1,5g de l'échantillon broyé et tamisé à 500 µm. Introduire la prise d'essai dans une fiole de 500 ml contenant déjà 200 ml d'eau distillée.

Agiter énergiquement pendant 30 min.

Compléter au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Homogénéiser et filtrer sur un filtre ordinaire en éliminant les premiers millilitres du filtrat.

Pipeter 50 ml du filtrat et le mettre dans un erlenmeyer de 250 ml. Ajouter 10 ml d'AgNO₃ (0,1N) et 10 ml d'Alun ferrique. Titrer avec NH₄SCN jusqu'au virage du blanc au rouge brun. Réaliser le blanco de la même manière.

B. Evolution de la température au cours du processus de compostage

Tableau 7: suivi de l'évolution journalière de la température

Jours	E101	E205	E308	E450	E591	E603	E708	E805
0	29	29	29	29	29	29	29	29
1	53,8	51,4	53,1	52,2	38,4	38,2	37,2	40,8
2	65,5	52,5	55,3	52,3	42,2	42,4	44,7	42,7
3	69,5	68,7	66,8	69,6	34,8	35	40,2	39,3
4	64,6	61,4	60,6	63	40,1	42,6	44,8	40,1
5	61,06	55,8	56,3	58,4	40,9	42,8	40,5	39
6	53,9	51,4	52,8	52,7	43,3	43,5	42,5	40,1
7	51,7	46,8	48,9	49,3	38,2	43,5	42,5	40,2
8	59,7	54,9	55,8	57,3	57,0	56,3	56,7	56,8
9	64,3	62,1	63,1	63,2	62,9	62,8	62,6	62,7
10	68,2	63,6	65	65,9	65,6	64,9	65,3	65,4
11	60,2	55,4	54,8	57,8	57,5	58,1	57,2	57,3
12	55,9	50,3	51,6	53,1	52,8	53,2	52,5	52,6
13	53,5	48,1	49,4	50,8	50,5	50	50,2	50,3
14	51,9	45,2	46,8	48,6	48,2	49,3	48,0	48,1
15	48,3	45,9	46,3	47,1	46,8	45,9	46,5	46,6
16	51,1	45	45,5	48,1	47,7	46,2	47,5	47,6
17	54,7	44,8	45	49,8	49,4	48,9	49,2	49,3
18	55	45,8	49,5	50,4	50,1	51,4	49,8	49,9
19	53,9	45,5	49,4	49,7	49,4	49,5	49,1	49,2
20	51,3	42,9	46,1	47,1	46,8	46,8	46,5	46,6
21	51,4	40,1	45,0	45,8	45,4	45,2	45,2	45,3
22	49,4	44,7	48,1	47,1	46,7	46,5	46,5	46,6
23	48,6	47,6	46,9	48,1	47,8	48,1	47,5	47,6
24	49,2	46,6	46,6	47,9	47,6	48	47,3	47,4
25	47,1	45	45,4	46,1	45,7	46,9	45,5	45,6

Essai d'amélioration de la teneur en phosphore des composts produits par co-compostage des pailles de riz et d'adjuvants organiques avec les phosphates naturels de Matongo

26	47,6	42,7	43,9	45,2	44,8	45,4	44,6	44,7
27	46,4	41,9	43,5	44,2	43,8	44,3	43,6	43,7
28	45,8	40,3	42,4	43,1	42,7	42,9	42,5	42,6
29	46,1	41,3	42,1	43,7	43,4	43,5	43,1	43,2
30	46	42,4	43,2	44,2	43,9	44	43,6	43,7
31	46,3	40,7	43,0	43,5	43,2	43,6	42,9	43,0
32	46,1	41,1	42,8	43,6	43,3	43,8	43,0	43,1
33	44,8	40,2	40,8	42,5	42,2	42,6	41,9	42,0
34	42,5	40,1	40,6	41,3	41,0	40,8	40,7	40,8
35	45,2	41,5	42,5	43,4	43,0	42,1	42,8	42,9
36	43,3	39	40,4	41,2	40,8	40,3	40,6	40,7
37	42,6	38,7	40,1	40,7	40,3	40,1	40,1	40,2
38	41,7	38,3	40,0	40	39,7	36,9	39,4	39,5
39	39,1	36,3	38,1	37,7	37,4	36,6	37,1	37,2
40	37,2	34,5	35	35,9	35,5	34,8	35,3	35,4
41	36,3	34,1	34,5	35,2	34,9	34,4	34,6	34,7
42	40,8	38,5	38,2	39,7	39,3	39,5	39,1	39,2
43	39,7	37,9	36,9	38,8	38,5	38,6	38,2	38,3
44	39,1	37,6	36,6	38,4	38,0	38	37,8	37,9
45	38,8	37,2	36,4	38	37,7	36,8	37,4	37,5
46	38,1	36,8	35,8	37,5	37,1	36,4	36,9	37,0
47	37,7	36,1	35,6	36,9	36,6	36,4	36,3	36,4
48	37,1	35,8	35,6	36,5	36,1	36,3	35,9	36,0
49	36,5	34,6	34,8	35,6	35,2	35,4	35,0	35,1
50	36,2	34,1	34,2	35,2	34,8	34,4	34,6	34,7
51	35,8	34	34,0	34,9	34,6	34,2	34,3	34,4
52	35,1	33,9	33,6	34,5	34,2	33,9	33,9	34,0
53	34,8	33,7	33,5	34,3	33,9	33,9	33,7	33,8
54	34,1	33,5	33,2	33,8	33,5	33,4	33,2	33,3
55	24,4	29,2	30,1	28,7	28,1	29,1	28,7	27,2
56	27,2	28,9	28,9	28,7	28,2	28,5	26,2	25,1
57	28,3	27	26,9	27,4	27,4	26,9	27,7	26,7
58	26,7	29	29,1	29,2	25,2	25,2	25,2	26
59	29,2	28	28,6	27,2	25,3	25,2	27,2	25,3
60	27	26,9	26,4	26,2	26,2	26,8	26,7	26,1

Tableau 8 : Comparaison des résultats de concentrations en phosphore des composts enrichis et les composts témoins

Source		P total (%)	P soluble dans l'eau (%)	P soluble dans l'acide citrique (%)
Composts Témoins	E450	1,05	0,39	0,5
	E591	0,88	0,33	0,39
	E603	0,69	0,26	0,31
Composts Enrichis	E101	3,56	1,53	2,18
	E205	2,99	1,25	2,03
	E308	3,42	1,36	1,96
	E708	3,12	1,49	2,16
	E805	3,14	1,55	2,09

Tableau 9 : Critères d'innocuité et valeurs limites des normes standards de qualité d'un bon compost

Paramètre Normes	N+P+K (%)	C/N	Zn mg/kg	Co mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg
NFU44-051	≥7	≥9,1≤20	< 600	-	<300	< 60	<3	< 180
NFU44-095	-	≥9,1≤20	<600	<30	<300	< 50	<3	<180
CCME	≥7	≥8≤20	<500	< 50	-	< 70	<2,5	<150
EAS 977:2019	>4	≥8≤20	<1000	< 60	<300	< 70	<3	<100

C. Entretien des andains lors du compostage (Retournements des andains)

Essai d'amélioration de la teneur en phosphore des composts produits par co-compostage des pailles de riz et d'adjuvants organiques avec les phosphates naturels de Matongo



Figure 10 : Photos d'illustration des retournements lors du compostage