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

Détermination de la valeur fertilisante de quelques fumiers organiques appliqués au Burundi

Havugiyaremye, Isaïe; Sous la direction de : Prof. Christophe Niyungeko

2025-10
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2161

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

UNIVERSITÉ DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

DETERMINATION DE LA VALEUR FERTILISANTE DE QUELQUES FUMIERS ORGANIQUES APPLIQUÉS AU BURUNDI

Par

Isaïe HAVUGIYAREMYE

MÉMOIRE

Présenté en vue d'obtention
du diplôme de Master en Sciences Chimiques
Spécialité : Contrôle et Analyses Chimiques

_____

Sous la direction de :

Prof. Christophe NIYUNGEKO

Bujumbura, Octobre 2025

MEMBRES DU JURY

Président : Prof. Aloys KATIHABWA

Directeur : Prof. Christophe NIYUNGEKO

Secrétaire : Dr. Sylvestre NDAYIRAGIJE

Membre : Dr. Manassé NIHORIMBERE

DEDICACE

A mes parents,

A mon épouse : Scholastique HAKIZIMANA,

A mes enfants : - Kessie Charbelle DUSHIME

- Marie Laurie Keita IRISHURA
- Ange Bernice IRAKOZE

A mes frères et sœurs,

A tous ceux qui me sont chers,

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la santé, la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ma formation et réaliser ce travail de recherche. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Christophe NIYUNGEKO, qui a accepté de diriger ce travail. Ses conseils éclairés, ses critiques constructives et ses qualités humaines ont été d'une aide précieuse tout au long de ce parcours. Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Je remercie sincèrement l'ensemble du corps académique de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi, et tout particulièrement les enseignants du Département de Chimie, pour la qualité de la formation dispensée tout au long de mon cursus. Mes remerciements vont aussi aux techniciens des laboratoires de chimie et Sciences de la terre (LACHISTE) pour leur appui technique. Je n'oublie pas mes amis, collègues et camarades étudiants avec qui j'ai partagé ces deux années d'études. Leur soutien moral et matériel, leur collaboration et encouragements ont été d'un grand réconfort dans la réalisation de ce travail. Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à mon épouse Scholastique HAKIZIMANA, à mes parents, à mes enfants : Kessie Charbelle DUSHIME, Marie Laurie Keita IRISHURA et Ange Bernice IRAKOZE ainsi qu'à mes frères et sœurs pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mes études.

Isaïe HAVUGIYAREMYE

RESUME

La baisse de la fertilité des sols au Burundi, aggravée par l'acidité et la rareté des intrants minéraux, impose le recours à des fertilisants organiques. Cette étude évalue la valeur agronomique de cinq fumiers d'élevage (chèvre, lapin, porc, poule et vache) analysés au laboratoire LACHISTE de l'Université du Burundi. Les paramètres étudiés incluent la matière sèche et organique, le pH, la conductivité électrique, les teneurs en N, P et K, le rapport C/N, la cellulose brute et le coefficient équivalent engrais (CEE).

Les résultats révèlent que le fumier de poule présente un pH de 8,03 ± 0,05, une teneur élevée en matière sèche (81,11 ± 0,01 %) et en matière organique (44,93 ± 0,02 %), ainsi qu'une forte concentration en azote (1,93 ± 0,01 %) et en potassium (1,72 ± 0,00 %). Ces caractéristiques en font un amendement particulièrement performant. Le fumier de lapin, avec un pH de 10,51 ± 0,05 et une conductivité électrique de 4,36 ± 1,7 mS/cm, peut toutefois réduire l'efficacité des apports azotés par volatilisation d'ammoniac et perturber l'équilibre biologique du sol. Tous les fumiers analysés présentent un rapport C/N compris entre 10 et 13, indiquant une bonne minéralisation, particulièrement rapide dans le cas du fumier de porc. Le fumier de vache se distingue par sa teneur en phosphore (0,63 ± 0,01 %), tandis que celui de chèvre offre un profil plus équilibré mais globalement moins riche en nutriments.

L'analyse des corrélations met en évidence une relation positive entre le pH et la conductivité électrique : une hausse du pH entraîne une augmentation de la salinité. De plus, la matière organique, le carbone et l'azote sont fortement corrélés entre eux, tandis que la cellulose brute est inversement associée à la matière minérale.

Globalement, le fumier de poule apparaît comme le plus complet, riche en azote, potassium et matière organique, avec le CEE le plus élevé (2,276). Le fumier de vache se démarque par son apport élevé en phosphore assimilable (CEE total = 2,016). Le fumier de porc présente un bon équilibre NPK (CEE total = 1,784), adapté à différentes cultures. Les fumiers de chèvre et de lapin, moins concentrés en éléments fertilisants (CEE total de 1,196 et 0,640 respectivement), possèdent une valeur agronomique plus limitée, mais restent utiles comme amendements pour améliorer la structure du sol.

L'application comparée au maïs et à la tomate confirme que le fumier de poule couvre les besoins nutritifs avec des doses modérées (13–16 t/ha pour le maïs, 15–20 t/ha pour la tomate). Les fumiers de porc et de vache apparaissent comme de bonnes alternatives (23-28t/ha pour le maïs, tandis que ceux de chèvre et de lapin nécessitent un complément minéral.

Mots clés :

Fertilité des sols, fumure organique, valeur fertilisante, coefficient équivalent engrais

ABSTRACT

Declining soil fertility in Burundi, compounded by acidity and the scarcity of mineral inputs, requires the use of organic fertilizers. This study evaluates the agronomic value of five livestock manures (goat, rabbit, pig, chicken, and cow) analyzed at the LACHISTE laboratory of the University of Burundi. The parameters studied include dry and organic matter, pH, electrical conductivity, N, P, and K contents, C/N ratio, crude fiber, and fertilizer equivalent coefficient (CEE).

The results reveal that chicken manure has a pH of 8.03 ± 0.05, a high dry matter (81.11 ± 0.01%) and organic matter (44.93 ± 0.02%) content, as well as a high nitrogen (1.93 ± 0.01%) and potassium (1.72 ± 0.00%) concentration. These characteristics make it a particularly effective amendment. Rabbit manure, with a pH of 10.51 ± 0.05 and an electrical conductivity of 4.36 ± 1.7 mS/cm, can, however, reduce the effectiveness of nitrogen inputs through ammonia volatilization and disrupt the soil's biological balance. All the manures analyzed have a C/N ratio between 10 and 13, indicating good mineralization, particularly rapid in the case of pig manure. Cow manure stands out for its phosphorus content (0.63 ± 0.01%), while goat manure offers a more balanced profile but is generally less nutrient-rich.

Correlation analysis highlights a positive relationship between pH and electrical conductivity: an increase in pH leads to an increase in salinity. Furthermore, organic matter, carbon, and nitrogen are strongly correlated with each other, while crude fiber is inversely associated with mineral matter.

Overall, chicken manure appears to be the most complete, rich in nitrogen, potassium, and organic matter, with the highest CEE (2.276). Cow manure stands out for its high content of available phosphorus (total CEE = 2.016). Pig manure has a good NPK balance (total CEE = 1.784), suitable for various crops. Goat and rabbit manures, which are less concentrated in fertilizing elements (total CEE of 1.196 and 0.640 respectively), have more limited agronomic value but remain useful as amendments to improve soil structure. Comparative application to corn and tomato confirms that chicken manure covers nutrient requirements with moderate doses (13–16 t/ha for corn, 15–20 t/ha for tomato). Pig and cow manures appear to be good alternatives (23–28 t/ha for corn, while goat and rabbit manures require a mineral supplement.

Keywords:

Soil fertility, organic manure, fertilizer value, fertilizer equivalent coefficient

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY i

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES SIGLE ET ABREVIATION ix

LISTE DES TABLEAUX x

LISTE DES FIGURES xi

AVANT PROPOS xii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE 4

I.1. Matière organique 4

I.1.1. Définition 4

I.1.2. Evolution de la matière organique dans le sol 4

I.1.3. Influence de la matière organique sur les propriétés du sol 4

I.1.4. Rôles des Matières Organiques dans les sols 5

I.2. La fertilisation organique 5

I.2.1. Amendements organiques 5

I.2.2. Engrais organiques 5

I.2.3. Différents types d'apports organiques exogène au sol 6

I.2.4. Les facteurs influençant la composition chimique des fumiers 7

I.2.5. Valeur fertilisante du fumier 7

I.3. Les fertilisants organo-minéraux 8

I.3.1. Efficacité agronomique et disponibilité des nutriments des fertilisants FOMI 9

I.3.2. Effets des fertilisants FOMI sur la santé et la fertilité des sols 10

I.4.Comparaison de l'effet de la fertilisation organique, organo-minéral et minérale sur les propriétés du sol 10

I.5. Les paramètres à évaluer pour le fumier 12

I.5.1. Paramètres physico-chimiques 12

I.5.2. Paramètres chimiques 12

I.5.3. Composition en éléments fertilisants 13

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE 14

II.1. Type de fumier étudié 14

II.2. Echantillonnage et préparation de l'échantillon 14

II.3. Méthodes utilisées pour la caractérisation des fumiers 14

II.3.1. Détermination de la matière sèche 15

II.3.2. Détermination de la matière organique 15

II.3.3.Détermination du pH 16

II.3.4.Détermination conductivité électrique 16

II.3.5. Dosage de l'azote 16

II.3.6. Détermination du rapport C/N 17

II.3.7. Détermination de la cellulose brute 18

II.3.8. Détermination de la teneur en phosphore total 18

II.3.9. Détermination de la teneur en phosphore assimilable 18

II.3.10. Détermination de la teneur en potassium 19

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION 20

III.1. Paramètres physico-chimiques 20

III.2. Paramètres chimiques 21

III. 3. Composition en éléments fertilisants 22

III.4. Teneurs en matière sèche (MS), matière organique (MO) et matière minéral (MM) 22

III.5. Le pH 23

III.6. Conductivité électrique 24

III.7. Rapport C/N 25

III.8. Teneur en azote 26

III.9. Teneur en phosphore 27

III.10. Teneur en potassium 28

III.11. Corrélation des caractéristiques analytiques des 5 types de fumiers 29

III.12. Coefficient Equivalent Engrais pour différents types de fumier analyses 31

III.13. Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation du maïs et de la tomate 32

III.13.1. Besoins en éléments nutritifs pour la culture du maïs et de la tomate 32

III.13.2. Quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins en éléments fertilisant pour le maïs et la tomate 33

III.13.3.Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation du maïs 33

III.13.4.Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation de la tomate 34

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 37

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 40

LISTE DES SIGLE ET ABREVIATION

AFNOR : Association Française de Normalisation

C /N : Rapport carbone/ azote

CEE : Coefficient Équivalent Engrais

CEE-K_2O : Coefficient équivalent engrais de potassium

CEE-N : Coefficient équivalent engrais de l'azote

CEE-P_2O_5 : Coefficient équivalent engrais de phosphore

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

COMIFER : Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

CRAAQ : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec

CRSNE : Centre de Recherche en Sciences Naturel et de l'Environnement

F.C : Fumier de chèvre

F.L : Fumier de lapin

F.Por : Fumier de porc

F.Pou : Fumier de poule

F.V : Fumier de vache

FAO : Food and Agriculture Organisation

FOMI : Fertilisant organo-Minéral

GFOR : Guide de la Fertilisation Organique à la Réunion

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

ISO : International Organization for Standardization

ITAVI : Institut Technique de l'Aviculture

ITCMI : Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles

ITRACOM : International Trading Company.

LACHISTE : Laboratoire de chimie et sciences de la terre

M.M : Matière minérale

M.S : Matière sèche

MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

MINEAGRIE : Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage

P_{ass} : Phosphore assimilable

P_{tot} : Phosphore total

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Effet des engrais organiques 7

Tableau I.2. Comparaison entre les engrais organiques, minéraux et organo-minéraux 11

Tableau III.1. Résultats pour les paramètres physico-chimiques 20

Tableau III.2. Résultats pour les paramètres chimiques 21

Tableau III.3.Teneurs en éléments fertilisants de différents types de fumiers 22

Tableau III.4. Corrélations entre les différents paramètres des 5 types de fumiers étudiés. 30

Tableau III.5. Coefficient d'efficacité agronomique pour N, P_2O_5 et K_2O 31

Tableau III.6. Coefficient Équivalent Engrais (CEE) pour différents fumiers étudies 31

Tableau III.7. Besoin du maïs et de la tomate en élément fertilisant (en kg/ha) 32

Tableau III.8. Teneurs en éléments fertilisants disponible à la plante dans les différents types de fumiers (kg/t) 33

Tableau III.9. La quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins du maïs par hectare 34

Tableau III.10. La quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins de la tomate par hectare 35

Tableau III.11. Comparaison des doses optimales et des compléments nécessaires pour différents fumiers étudiés pour la culture de maïs et de tomate 36

LISTE DES FIGURES

Figure II.1. Photos des différents échantillons 14

Figure III.1. Comparaison de la matière sèche(MS), la matière minérale (MM) et la matière organique (MO) en fonction du type de fumier 23

Figure III.2. Variation du pH en fonction du type de fumier 24

Figure III.3. Variation de la conductivité en fonction du type de fumier 25

Figure III.4. Variation du rapport C/N en fonction du type de fumier 26

Figure III.5. Variation de la teneur en azote en fonction du type de fumier 27

Figure III.6. Variation de la teneur en P en fonction du type de fumier 28

Figure III.7. Variation de la teneur en K en fonction du type de fumier 29

AVANT PROPOS

Le présent mémoire, intitulé « DETERMINATION DE LA VALEUR FERTILISANTE DE QUELQUES FUMIERS ORGANIQUES APPLIQUES AU BURUNDI », s'inscrit dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Chimiques, spécialité Contrôle et Analyses Chimiques. L'objectif général de ce travail est d'estimer le coefficient équivalent engrais afin d'évaluer la valeur fertilisante des cinq types de fumier issus d'animaux couramment élevés au Burundi : la chèvre, le lapin, le porc, la poule et la vache. Cette étude prend appui sur le constat selon lequel les engrais organiques sont souvent épandus dans les champs sans connaissance précise de leur composition et de leur potentiel fertilisant. Or, ces engrais contiennent des éléments nutritifs essentiels qui peuvent contribuer significativement à la réduction des quantités d'engrais chimiques à appliquer, permettant ainsi de diminuer, voire d'éliminer, les coûts liés aux intrants agricoles. Les résultats obtenus dans ce travail visent à fournir aux agriculteurs burundais des informations utiles pour une gestion plus rationnelle et efficace de la fertilisation de leurs sols.

INTRODUCTION GENERALE

De 2009 à 2050, la population mondiale devrait atteindre 9,1 milliards d'individus, soit une augmentation de 34 % pendant cette période. L'essentiel de cette croissance démographique se concentrera dans les pays en développement (FAO, 2009). L'accroissement démographique exerce une forte pression sur les ressources naturelles. À cela s'ajoute la faible accessibilité des intrants agricoles et d'élevage, principalement en raison du faible pouvoir d'achat des producteurs (Gihimbare, 2011). Cette situation se traduit par une baisse de la productivité agricole, compromettant la capacité de répondre à la demande alimentaire croissante. En agriculture, le sol constitue un facteur clé de la production végétale. Un sol doté d'une bonne structure physique favorise la levée des cultures et le développement des systèmes racinaires, éléments déterminants pour une croissance harmonieuse des plantes. Il joue également le rôle de réservoir d'eau et de nutriments essentiels (Soltner, 2001). Par ailleurs, ses caractéristiques hydriques et mécaniques influencent considérablement le calendrier des travaux agricoles. L'état du sol influe également sur la présence de pathogènes telluriques, tels que les ravageurs ou les champignons (Brady & Weil, 2016). La majorité des fonctions agricoles (le maintien de la fertilité des sols, protection de la biodiversité, la gestion de l'eau, le stockage du carbone,...) sont étroitement liées au statut organique du sol, c'est-à-dire à la quantité, la nature et la répartition de la matière organique. Il est donc crucial d'en assurer le suivi pour préserver, voire améliorer, la qualité des sols (Laboubée, 2007).

Un sol est considéré comme fertile lorsqu'il est capable de fournir aux plantes, de manière suffisante, régulière et durable, les éléments nutritifs nécessaires (Brady & Weil, 2016). Cette capacité dépend largement de l'activité biologique du sol. Or, les pratiques agricoles actuelles tendent à appauvrir les sols. On privilégie l'alimentation des plantes par des engrais chimiques plutôt que de nourrir le sol pour qu'il puisse, à son tour, soutenir la plante (Lal, 2015). Cette approche a conduit à une réduction marquée de la biodiversité des sols et des systèmes de production végétale et animale (FAO, 2017).

En règle générale, les sols cultivés présentent des niveaux de matière organique nettement inférieurs à ceux des sols forestiers ou des prairies (Post & Kwon, 2000). Ces niveaux varient également en fonction des systèmes de culture mis en œuvre (Laboubée, 2007). Parmi les éléments nutritifs essentiels à la croissance et à la reproduction des plantes figurent le phosphore (P), l'azote (N) et le potassium (K). La succession des cultures entraîne une diminution progressive de la fertilité du sol, due à l'extraction continue de ces éléments ou à leur perte par érosion (Antoni, 2009).

Dans les sols acides, les cations basiques (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) sont souvent lessivés, laissant place aux cations acides (Al^{3+}, H^{+}). Cela réduit la capacité de rétention des cations utiles à l'agriculture, d'autant plus que la charge de surface du sol peut devenir positive en milieu très acide (Djondo, 1994). Parmi les contraintes agronomiques majeures figurent la faible fertilité des sols (notamment en raison de l'acidité et de la toxicité aluminique), le manque d'intrants et leur faible utilisation (FAO, 2017). Pour réduire les effets négatifs des engrais chimiques, les chercheurs recommandent de les associer à des amendements organiques et à des résidus de récolte. Cette combinaison permettrait la formation de complexes transitoires améliorant l'assimilation des ions, en particulier pour les engrais phosphatés, souvent peu efficaces dans les sols (Frossard et al., 1986).

Face aux effets environnementaux néfastes liés à l'usage excessif des engrais chimiques, une transition vers des sources alternatives de nutriments s'impose. L'emploi d'amendements organiques constitue une solution de plus en plus privilégiée par les agriculteurs, car leur incorporation dans le sol permet d'améliorer simultanément ses propriétés physiques, chimiques et biologiques (Goldberger, 2008). Par ailleurs, l'utilisation des fertilisants organo-minéraux représente une approche complémentaire efficace, puisqu'elle combine les avantages des matières organiques et minérales afin d'assurer une nutrition optimale des cultures et une amélioration durable de la santé des sols (Lima et al., 2023).

Des applications régulières de fumier, notamment sous forme solide, favorisent la rétention d'humidité, le recyclage des nutriments et rendent les cultures plus résilientes face aux stress climatiques comme la sécheresse ou les excès d'eau (FAO, 2015). Contrairement aux engrais chimiques, les fertilisants organiques issus des exploitations agricoles jouent un double rôle d'engrais et d'amendement, contribuant ainsi à l'équilibre et à la fertilité des sols (Francisco et al., 2023). L'absence d'apports organiques entraîne une perte importante du stock de matière organique du sol, ce qui aggrave la dégradation de sa qualité, en particulier en l'absence de solutions alternatives (Maltas et al., 2012). Dans cette perspective, les politiques agricoles de la sous-région (2018–2027) visent à promouvoir une économie agricole durable (MINEAGRIE, 2018).

Au Burundi, l'agriculture de subsistance mobilise 84 % de la population active, soit environ 1 740 546 ménages, et assure 95 % de l'approvisionnement alimentaire. Elle représente 39,6 % du PIB et constitue une source essentielle de matières premières pour l'agro-industrie. La superficie moyenne des exploitations est estimée à 0,27 ha par ménage (MINEAGRIE, 2018).

Toutefois, cette situation est entravée par divers défis structurels. En particulier, la majorité des agriculteurs ne disposent pas des moyens financiers nécessaires pour acquérir des engrais, ce qui explique la faible utilisation d'intrants minéraux. En 2017, l'utilisation d'engrais au Burundi n'était que de 12 kg/ha, un niveau nettement inférieur aux recommandations international, qui préconise entre 60 et 70 kg/ha afin d'atteindre la sécurité alimentaire régionale, sur la base de la moyenne mondiale et des besoins de croissance agricole en Afrique (MINEAGRIE, 2018; Morris et al., 2007).

Par ailleurs, si la valeur fertilisante des déjections animales est aujourd'hui mieux documentée, leur potentiel fertilisant reste encore insuffisamment exploré. Les recherches sur ce sujet demeurent limitées, et les valeurs fertilisantes des engrais organiques sont souvent sous-estimées dans les plans de fertilisation (Levasseur & Espagnol, 2009). Elles sont encore perçues principalement comme des améliorateurs de sol, sans tenir compte de leur contribution en nutriments, malgré leur usage empirique avéré par les éleveurs (Gueydon, 1992). Les rejets animaux, en particulier ceux des monogastriques, contiennent des proportions significatives de nutriments : entre 40 et 50 % de la matière organique et de l'azote ingérés, ainsi que 60 à 80 % du P_2O_5 et du K_2O, se retrouvent dans leurs excréments. Les bovins, quant à eux, rejettent plus de 70 % de l'azote et du phosphore, et plus de 90 % du potassium consommés. Chez les volailles, plus de 70 % de l'azote et du potassium ingérés sont excrétés (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006) . Connaître la composition des fumiers en éléments fertilisants tels que l'azote, le phosphore et le potassium est donc essentiel pour leur valorisation en agriculture. Les sols burundais sont majoritairement acides, ce qui limite leur fertilité (ISABU, 2012). Cette acidité rend nécessaire l'apport de matière organique externe (Soltner, 2001).

Le développement de l'élevage diversifié (bovins, caprins, porcins, volailles, etc.) est encouragé, tout en soulignant l'importance d'une gestion rigoureuse des déchets issus de ces exploitations. Ces déchets, et notamment les fumiers, représentent une ressource potentielle pour restaurer la fertilité des sols et augmenter les rendements agricoles. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre hypothèse de recherche : les principaux fumiers organiques appliqués au Burundi contiennent des quantités variables mais significatives d'éléments fertilisants utiles en agriculture. Ainsi, l'objectif général de ce travail est l'évaluation de la valeur fertilisante de cinq principaux types de fumiers organiques appliqués au Burundi à travers l'estimation de leur coefficient équivalent engrais.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Matière organique

I.1.1. Définition

La matière organique du sol regroupe l'ensemble des substances issues d'organismes vivants ou ayant vécu, comprenant les résidus végétaux et animaux à différents stades de décomposition, la microflore, la microfaune ainsi que les racines. Après une décomposition avancée, cette matière organique se transforme en humus, une substance brun foncé, poreuse et spongieuse, reconnaissable à sa texture légère et à son odeur caractéristique de terre (Laboubée, 2007)

I.1.2. Evolution de la matière organique dans le sol

Les matières organiques se répartissent en 4 groupes selon le stade d'évolution (Laboubée, 2007) :

- les matières organiques vivantes, végétales et animales, qui englobent la totalité de la biomasse en activité,
- les débris d'origine végétale (résidus de végétaux ou exsudats) et animale (déjections, cadavres) regroupés sous le nom de « matières organiques fraîches »,
- des composés organiques intermédiaires, appelés matières organiques transitoires, provenant de l'évolution des matières organiques fraîches,
- des composés organiques stabilisés, les matières humiques, provenant de l'évolution des matières précédentes : les matières organiques stables

I.1.3. Influence de la matière organique sur les propriétés du sol

La matière organique du sol joue un rôle essentiel dans l'amélioration globale de la qualité des sols. Elle renforce à la fois leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Sur le plan physique, elle stabilise la structure du sol, accroît la porosité et la capacité de rétention en eau, tout en réduisant la densité apparente. Sur le plan chimique, elle augmente la capacité d'échange cationique (CEC), régule le pH, libère progressivement les nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium, et contribue à la fixation de certains métaux lourds. Enfin, sur le plan biologique, la matière organique stimule l'activité microbienne et la biodiversité du sol, favorisant ainsi la minéralisation et la disponibilité des éléments nutritifs (Six et al., 2002). Dans l'ensemble, elle constitue un levier fondamental pour maintenir une fertilité durable et renforcer la résilience des sols face aux variations climatiques.

I.1.4. Rôles des Matières Organiques dans les sols

Les matières organiques sont essentielles au maintien des fonctions du sol, notamment sa fertilité et sa résistance à l'érosion. Elles assurent aussi le pouvoir fixateur et tampon, limitant la pollution des eaux souterraines et superficielles. Une baisse ou un déséquilibre des stocks de matières organiques compromet ces fonctions vitales (Laboubée, 2007). Sur le plan agronomique, les matières organiques des sols jouent un rôle important dans la fourniture d'éléments nutritifs et a un pouvoir de rétention de l'eau, sur l'état structural du sol, l'accroissement du nombre de jours disponible pour effectuer les travaux culturaux et l'effet sur le parasitisme. Sur le plan environnemental, les matières organiques peuvent agir par la fixation des ions sur le complexe argilo - humique, par réduction de l'érosion du sol et par stockage du C dans le sol (Soltner, 1996).

I.2. La fertilisation organique

Le terme fertilisation organique, employée généralement pour les engrais organiques est synonyme de fumure organique, elle permet d'insister sur le double rôle de l'apport organique en agriculture : effet amendement et effet engrais (Francisco et al., 2023).

I.2.1. Amendements organiques

Les amendements améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Soltner, 1996). Le but de cet apport est l'obtention d'un produit stable riche en humus. Il s'agit des matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale fermentées ou fermentescibles destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de la matière organique du sol.

I.2.2. Engrais organiques

Ce sont des produits qui apportent du carbone organique et des éléments minéraux pour les plantes. Parmi ces éléments on distingue les éléments majeurs (absorbés en grande quantités, tels que l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, le calcium et le magnésium), les oligoéléments (nécessaires à faible dose, tels que le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, le bore, le molybdène et le vanadium) et les éléments utiles à certaines espèces végétales (le cobalt, le sodium, le chlore et la silice) (Mustin, 1987).

I.2.3. Différents types d'apports organiques exogène au sol

Les apports organiques regroupent diverses matières utilisées pour améliorer la fertilité des sols. On distingue notamment :

1. Le fumier : mélange de déjections animales et de litière, partiellement fermenté en étable ou en tas.
2. Le lisier : déjections liquides (urines + fèces) sans litière, souvent diluées par des eaux de pluie ou de lavage. Il contient parfois des débris alimentaires.
3. Les fientes : déjections pures de volailles, sans litière.
4. L'engrais vert : culture à croissance rapide enfouie sur place pour enrichir le sol, notamment en azote. Il protège aussi la structure du sol (Soltner, 1996)
5. Le compost : matière organique stabilisée, riche en humus, issue de la décomposition rapide de déchets agricoles, animaux ou ménagers (Mustin, 1987).
6. Les ordures ménagères : utilisables comme fertilisant après compostage, car à l'état brut elles peuvent provoquer une rétrogradation de l'azote, nuisible aux plantes (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006).

L'application d'engrais organiques exerce une influence multidimensionnelle sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Ces amendements, riches en matière organique et en nutriments, participent à la restauration de la fertilité tout en favorisant la durabilité des écosystèmes agricoles (Francisco et al., 2023). Le tableau I.1 synthétise les principaux effets des engrais organiques sur les différentes propriétés du sol et les bénéfices qui en découlent.

Tableau I.1. Effet des engrais organiques (Francisco et al., 2023)

Nature de la propriété du sol	Effet des engrais organiques	Bénéfices
Biologique	Stimule l'activité biologique du sol (vers de terre, biomasse microbienne)	Dégradation Minéralisation Réorganisation Humification Aération du sol Croissance des racines Augmentation de la biodiversité
Chimique	Dégradation, minéralisation	Fourniture d'éléments minéraux (N, P, K, oligo-éléments)
	Rétention des micropolluants organiques et des pesticides	Qualité de l'eau
Physique	Améliore la structure et la porosité	Infiltration de l'eau Stockage de l'eau
	Limite à l'érosion	Limitation du ruissellement Limitation de l'érosion Limitation du tassement/ compactage Réchauffement
	Augmente la rétention d'eau	Meilleure alimentation hydrique du sol

I.2.4. Les facteurs influençant la composition chimique des fumiers

La composition chimique du fumier est déterminée par plusieurs facteurs étroitement liés entre eux. Elle varie principalement selon l'espèce animale dont il provient, le type d'alimentation reçue, la nature de la litière utilisée, ainsi que les conditions de stockage et de traitement appliquées. Le climat influence également la conservation et la transformation des éléments nutritifs contenus dans le fumier. L'ensemble de ces facteurs conditionne la teneur en matière organique et en éléments minéraux essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et le calcium (Ca), qui jouent un rôle fondamental dans la fertilisation des sols et la nutrition des plantes (Bouajila et al., 2016).

I.2.5. Valeur fertilisante du fumier

La valeur fertilisante, correspond à la teneur en éléments nutritifs et leurs disponibilités sous des formes assimilables par les plantes c'est-à-dire sous forme minérale. La valeur fertilisante du fumier réside dans sa teneur en substances nutritives pour les plantes ainsi que la quantité de matière organique qu'il contient (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006). Les éléments fertilisants de fumier proviennent essentiellement des aliments consommés par les animaux.

Ces derniers n'utilisent qu'environ 25% des éléments nutritifs contenus dans les aliments, alors que 75% du contenu initial d'azote (N), du de phosphore P et de potassium (K), sont excrétés dans les fèces et les urines (CIRAD, 2003b).

La valeur fertilisante des matières organiques peut être estimée à l'aide d'un coefficient équivalent-engrais (CEE %)**,** qui exprime la part d'un élément (N, P_2O_5, K_2O, etc.) directement assimilable par les plantes, comme dans un engrais minéral (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006).

Ce coefficient permet ainsi de comparer l'efficacité des déjections animales à celle d'engrais minéraux rapidement disponibles (Desvignes & Bodet, 2000). Ces coefficients varient cependant avec de nombreux facteurs :

- ✓ Les cultures et leur capacité à absorber l'élément fertilisant au cours d'une période plus ou moins longue ;
- ✓ Les dates de l'apport organique, par rapport aux besoins de pointe de la culture ;
- ✓ Les conditions d'application (Matériel, Climat).

Les coefficients équivalent-engrais sont déterminés expérimentalement (Chabalier et al., 2006).

I.3. Les fertilisants organo-minéraux

Les fertilisants organo-minéraux représentent une stratégie de fertilisation avancée en agriculture. Ils sont le fruit de la combinaison contrôlée de matières organiques (résidus végétaux, fumier, composts, etc.) et de matières minérales (nutriments N-P-K de synthèse ou naturels). Ce mélange vise à mettre en commun les avantages des deux sources pour garantir une nutrition optimale des cultures et une amélioration durable de la santé des sols (Lima et al., 2023). En Afrique, les fertilisants organo-minéraux les plus répandus et les mieux documentés sont ceux produits par la société burundaise ITRACOM HOLDING Ltd., à travers ses filiales spécialisées. Au Burundi, la marque FOMI commercialise notamment FOMI IMBURA, FOMI BAGARA et FOMI TOTAHAZA, tandis que sa filiale tanzanienne, ITRACOM Fertilizers Limited, produit les formulations FOMI OTESHA, FOMI KUZIA, FOMI NENEPESHA, FOMI CANS, FOMI SUPA, entre autres. Ces produits sont fabriqués selon un procédé industriel rigoureux qui combine une matière organique compostée, essentiellement constituée de fumier de bovin collecté, trié, composté et stabilisé, avec un enrichissement minéral ciblé comprenant l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) ainsi que divers oligo-éléments essentiels au développement des cultures. Cette synergie entre une matrice organique stabilisée et des nutriments minéraux directement assimilables assure

une efficacité agronomique élevée, tout en contribuant à la restauration durable de la fertilité des sols par l'amélioration de la structure, de la porosité, de la rétention hydrique, de l'activité microbienne et de la teneur en carbone organique.

Les résultats de recherche menés récemment en Afrique de l'Est, notamment en Tanzanie et au Burundi, confirment la pertinence agronomique des organo-minéraux FOMI. Dans les essais sur tabac flue-cured conduits entre 2023 et 2025, l'application de FOMI SUPA combiné à FOMI CANS a permis d'obtenir des rendements de feuilles sèches supérieurs à ceux de l'engrais standard lors des saisons à fortes pluies, tandis que FOMI GREEN et FOMI NENEPESHA se sont révélés plus performants en conditions de pluviométrie modérée (Elimboto et al., 2025). De plus, une étude multisite réalisée au cours de la campagne 2023/2024 a montré que les fertilisants FOMI améliorent significativement le pH du sol et augmentent la teneur en carbone organique, en particulier aux doses les plus élevées de FOMI SUPA et de FOMI GREEN (Lisuma et al., 2025). Ces résultats soulignent la contribution stratégique des fertilisants organo-minéraux dans l'amélioration des sols acides et dégradés de la région et leur importance croissante dans les systèmes agricoles durables en Afrique de l'Est.

I.3.1. Efficacité agronomique et disponibilité des nutriments des fertilisants FOMI

La matrice organique se lie aux éléments minéraux. Elle permet une libération progressive des nutriments dans le sol, synchronisant mieux l'apport avec les besoins réels de la plante tout au long de son cycle de croissance. Des études montrent que cette libération lente et durable améliore l'indice d'efficacité de l'utilisation de l'azote par rapport aux engrais minéraux classiques, réduisant ainsi les pertes (Trinchera et al., 2011). Les résultats des essais FOMI corroborent cette observation : l'amélioration des rendements du tabac sous FOMI SUPA, FOMI CANS et FOMI GREEN est associée à une meilleure disponibilité continue des nutriments, même sous conditions climatiques contrastées (Elimboto et al., 2025). Dans les sols ferrallitiques d'Afrique de l'Est, le phosphore est fréquemment immobilisé par les oxydes de fer et d'aluminium, ce qui réduit fortement sa disponibilité pour les plantes. La matière organique incorporée dans les fertilisants organo-minéraux FOMI permet de limiter cette fixation en complexant ces éléments, maintenant ainsi le phosphore sous une forme plus facilement assimilable. Une récente étude (Lisuma et al., 2025) a démontré que les formulations FOMI augmentent significativement le pH du sol et réduisent l'aluminium échangeable, améliorant indirectement l'assimilation du phosphore et d'autres micronutriments essentiels.

I.3.2. Effets des fertilisants FOMI sur la santé et la fertilité des sols

Les fertilisants organo-minéraux jouent un rôle clé non seulement dans la nutrition des cultures, mais aussi dans la restauration et la conservation de la matière organique du sol, un pilier fondamental de la fertilité.

En effet, la matière organique stabilisée issue des amendements utilisés par FOMI améliore l'agrégation du sol en renforçant sa structure, augmente la porosité, renforce la capacité de rétention en eau, particulièrement importante dans les zones sujettes aux stress hydriques, stimule l'activité microbienne grâce à un apport constant de carbone assimilable, et exerce un fort pouvoir tampon qui contribue à stabiliser le pH du sol et à limiter son acidification. Une étude préliminaire (Lisuma et al., 2025) a démontré que l'application à doses élevées de FOMI SUPA et de FOMI GREEN induit une augmentation significative du carbone organique jusqu'à 20 cm de profondeur, soulignant l'impact positif de ces fertilisants sur la séquestration du carbone et l'amélioration durable de la qualité pédologique. Ces observations sont en accord avec les travaux de Uddin et al. (2025), qui montrent que les engrais organo-minéraux renforcent la résistance du sol à l'érosion et au lessivage, tout en atténuant l'effet acidifiant associé aux engrais minéraux. Cette capacité d'amélioration de la fertilité organique et chimique est d'autant plus importante dans les contextes des sols acides du Burundi et de Tanzanie, où l'utilisation exclusive d'engrais minéraux (N et P) a été démontrée comme accélérant la minéralisation de la matière organique et appauvrissant les réserves de carbone (Kaboneka et al., 2021). Par conséquent, les organo-minéraux produits par FOMI apparaissent comme une alternative agro-écologique durable, parfaitement adaptée aux contraintes pédologiques régionales, combinant restauration du sol, productivité et durabilité.

I.4.Comparaison de l'effet de la fertilisation organique, organo-minéral et minérale sur les propriétés du sol

Afin de mieux comprendre les différences entre les diverses formes d'engrais utilisées en agriculture, il est essentiel d'examiner leurs caractéristiques, leurs effets sur le sol ainsi que leur mode d'action. Les engrais se distinguent principalement par leur origine et leur composition, ce qui influence leur efficacité, leur impact environnemental et leur rôle dans la fertilité du sol (Sakrabani, 2024). Le tableau I.2 nous présente la comparaison entre les trois grandes catégories d'engrais : organiques**,** organo-minéraux **et** minéraux en mettant en évidence leur composition, leurs effets sur le sol, la vitesse de libération des nutriments, ainsi que leurs principaux avantages et limites.

Tableau I.2. Comparaison entre les engrais organiques, minéraux et organo-minéraux (Sakrabani, 2024)

Type d'engrais	Composition	Effets sur le sol	Libération des nutriments / vitesse d'action	Avantages	Limites / Inconvénients
Organique	Matières naturelles : fumier, compost, résidus de culture, bio-déchets	Améliore la structure du sol (agrégation, porosité, aération), augmente la matière organique, stimule la microflore	Lente ; libération progressive selon la décomposition microbienne	- Améliore fertilité et santé du sol à long terme - Valorisation des déchets organiques - Effet tampon du pH	- Teneur en nutriments moins concentrée et variable - Nécessite de grandes quantités - Effet lent sur rendement immédiat
Organo-minéral	Mélange de matières organiques + apport limité d'éléments minéraux (N, P, K)	Combine amélioration de la structure du sol et disponibilité rapide de certains nutriments	Mixte : fraction minérale → rapide ; fraction organique → lente	- Synchronisation avec les besoins des plantes - Réduction partielle de la dépendance aux minéraux - Valorisation des matières organiques	Complexité de formulation et stockage - Qualité variable selon la source organique
Minéral	Éléments nutritifs concentrés : NPK, oligo-éléments	Peu d'effet sur la structure du sol ; peut acidifier ou saliniser le sol si usage excessif	Rapide ; libération quasi immédiate	- Fournit rapidement des nutriments précis-Rendement immédiat	- Ne nourrit pas le sol à long terme - Risque de lixiviation et pollution des eaux - Dépendance énergétique pour production

I.5. Les paramètres à évaluer pour le fumier

L'analyse du fumier nécessite l'évaluation de plusieurs catégories de paramètres : les paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique, matière sèche, matière minérale, humidité, etc.), les paramètres chimiques (matière organique, carbone, cellulose brute, rapport C/N, etc.) ainsi que la composition en éléments fertilisants tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K),…)(AFNOR, 2005).

I.5.1. Paramètres physico-chimiques

La connaissance des propriétés physico-chimiques du fumier constitue un préalable essentiel pour évaluer sa qualité, son comportement après son incorporation au sol et son potentiel fertilisant. Parmi ces propriétés, le pH joue un rôle déterminant : il influence la solubilité et la disponibilité des nutriments, la minéralisation de la matière organique et l'activité microbienne. Un pH trop acide ou trop basique modifie notamment les formes de l'azote ammoniacal, affectant ainsi son comportement dans le sol (Brady & Weil, 2016).

La teneur en eau est un autre paramètre clé, car elle conditionne la concentration réelle en nutriments et sa vitesse de décomposition. Son contrôle est essentiel pour exprimer les résultats sur matière sèche et comparer de manière fiable des fumiers de différentes origines (Johannesson et al., 2017).

La conductivité électrique (CE), qui reflète la quantité de sels solubles, permet d'anticiper les risques de salinisation du sol et de stress osmotique pour les cultures. Elle est indispensable pour interpréter les réponses agronomiques des plantes et évaluer la sécurité d'utilisation du fumier (Bernal et al., 2009).

La proportion de matière minérale (cendres) renseigne quant à elle sur la part de nutriments non organiques et sur la qualité de la matière organique. Un taux élevé peut indiquer une contamination par le sol ou des matériaux inertes, affectant la valeur fertilisante et la capacité de minéralisation du fumier (Bernal et al., 2009).

De manière générale, la maîtrise de ces paramètres offre une vision globale de la composition du fumier et de son comportement dans l'environnement, permettant d'apprécier à la fois son efficacité agronomique et ses impacts potentiels (Bernal et al., 2009).

I.5.2. Paramètres chimiques

Les paramètres chimiques jouent un rôle crucial dans l'analyse du fumier, car ils influencent la dégradation de la matière organique, la libération des nutriments et l'impact environnemental de l'amendement (Biekre et al., 2018).

Les paramètres chimiques tels que la teneur en matière organique, le carbone total, la cellulose brute ou encore le rapport C/N constituent des indicateurs clés permettant d'apprécier la qualité du fumier, de prédire son comportement biogéochimique dans l'environnement et d'évaluer son potentiel agronomique (Brady & Weil, 2016).

La matière organique informe sur la capacité du fumier à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, notamment l'agrégation, la rétention hydrique et l'activité microbienne. Le carbone organique, composant central de cette matière organique, représente un indicateur majeur de la stabilité du fumier et de son aptitude à se minéraliser. Il constitue également la principale source d'énergie des micro-organismes impliqués dans la décomposition (Lal, 2004; Six et al., 2002).

La cellulose brute, qui correspond à la fraction fibreuse la plus résistante à la dégradation, permet d'estimer la vitesse de décomposition du fumier ainsi que sa capacité à produire un humus stable. Une proportion élevée de cellulose est généralement associée à une minéralisation lente et à une libération progressive des éléments nutritifs, tandis qu'une proportion faible favorise une décomposition rapide et une disponibilité accrue des nutriments à court terme (Bernal et al., 2009).

Le rapport C/N représente quant à lui est un paramètre déterminant dans l'anticipation de la dynamique de l'azote dans le sol. Il constitue un indicateur prédictif du processus de minéralisation ou d'immobilisation de l'azote après l'application du fumier. Ce rapport est fondamental pour évaluer le degré de maturité du fumier, ajuster les doses d'application, prévenir les déficiences azotées et modéliser le devenir de l'azote dans les systèmes de production agricole (Brady & Weil, 2016).

I.5.3. Composition en éléments fertilisants

L'analyse des teneurs en éléments fertilisants majeurs tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) constitue une étape incontournable sur la caractérisation des fumiers et leur impact agronomique. Ces nutriments déterminent en effet la valeur fertilisante réelle du fumier et conditionnent sa capacité à soutenir la croissance végétale. Leur quantification permet d'ajuster avec précision les doses d'application au sol, garantissant une fertilisation équilibrée tout en limitant les risques de carences ou de surcharges nutritives (Bernal et al., 2009; Brady & Weil, 2016).

De plus, la connaissance des niveaux de N, P et K est essentielle pour comprendre la dynamique biogéochimique des éléments dans le sol, notamment les processus de minéralisation, d'immobilisation et de libération progressive des nutriments (Brady & Weil, 2016).

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Type de fumier étudié

La figure II.1 nous montre les photos des échantillons de fumier de chèvres, de lapins, de poules, de porcs et de vaches.



F.C



F.L



F.Pou



F.Por



F.V

F.C : Fumier de chèvre ; F.L: Fumier de lapin ; F.Por: Fumier de porc ;
F.Pou : Fumier de poule F.V : Fumier de vache

Figure II.1. Photos des différents échantillons

II.2. Echantillonnage et préparation de l'échantillon

Les échantillons ont été acheminés au laboratoire en février 2025 depuis une ferme privée située en commune Gihanga à une latitude de -3,2156°, une longitude de 29,35570° et a une altitude de 813,3 m.

Afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des fumiers (Matière Sèche, Matière Minérale, pH, CE et Humidité), ainsi que les caractéristiques chimiques comprenant la Matière Organique (M.O), le pourcentage en carbone, le rapport C/N et la teneur en cellulose brute et en éléments fertilisants, particulièrement en N, K et P, des échantillons de chaque type de fumier ont été préparés pour analyse. Pour ce faire, les échantillons ont été broyés dans un mortier en bois, puis tamisés à 0,75 mm avant d'être soumis à l'analyse au laboratoire. Les donnes statistiques ont été analysées par le Logiciel SPSS.

II.3. Méthodes utilisées pour la caractérisation des fumiers

Toutes les analyses ont été faites dans le laboratoire de chimie et sciences de la terre (LACHISTE) de l'Université du Burundi. Les paramètres qui ont été analysés sont : la matière sèche, la matière organique, le pH, la conductivité électrique, la teneur en carbone, la teneur en azote, la teneur en phosphore, la teneur en potassium et le rapport C/N.

II.3.1. Détermination de la matière sèche

Pour déterminer la teneur en matière sèche, on a déterminé la teneur en humidité contenue dans les différents types d'échantillons de fumiers. La teneur en humidité des fumiers est déterminée par la perte de poids subie après séchage à une température de 105°C pendant 24 heures (AFNOR, 2017).

- ✓ **Teneur en Humidité :**

C'est la teneur en eau de l'échantillon après séchage dans l'étuve pendant 24 heures à 105°C.

$\%\ \text{Humudité} = \frac{P_E-(P_1-P_0)}{P_E} \times 100$

P_0: Poids de creuset vide ; P_1: Masse totale du résidu sec et du creuset après l'incinération ;

P_E: Prise d'essai

Le pourcentage de matière sèche est la différence entre le poids de la matière sèche et la masse de la matière non-sèche (hydratée). La détermination de la teneur en eau conditionne la précision des divers résultats analytiques qui sont rapportés à la matière sèche $\%\text{MS} = 100 - \%\ \text{Hum}\%$.

II.3.2. Détermination de la matière organique

La matière organique a été calculée après séchage des échantillons à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures et calcination dans un four de type Nabertherm portée à 550˚C pendant 4 heures (Chennaoui et al., 2016).

Le taux en MOT de l'échantillon est obtenu par cette formule : $MO(\%) = \frac{M_1-M_2}{M_1} \times 100$

Avec *MO* : taux de la matière organique totale ; M_1 : masse de l'échantillon après séchage à 105 °C ; M_2 : masse de l'échantillon après calcination à 550˚C et 100 : le facteur de pourcentage.

Pour l'évaluation du carbone à partir de la matière organique, il y deux facteurs qu'on peut utiliser.

- ✓ Le facteur 1,724 qui signifie que la matière organique contient 58% du carbone
- ✓ Le facteur 2,0 qui signifie que la matière organique contient 50% du carbone

La teneur en carbone organique et le rapport C/N sont correctement déterminés avec le facteur 2,0 mais nettement surévalués avec le facteur 1,724. En se basant de ce qui précède nous avons adopté le facteur 2,0 pour l'estimation du taux de carbone organique dans nos produits organiques.

II.3.3.Détermination du 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 fumier dans 5 fois son volume d'eau (Bokobana et al., 2017).

II.3.4.Détermination conductivité électrique

La conductivité électrique a été déterminée par un conductimètre à une température de 25°C avec un rapport sol/solution de 1/5 (Dupont & Martin, 2023).

II.3.5. Dosage de l'azote

L'azote a été dosé par la méthode Kjeldhal selon la norme AFNOR ISO 11261 sur des échantillons séchés à 105°C puis finement broyés et tamisés à 800 µm de mailles (Charnay, 2005; ISO, 1995).

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. Cette minéralisation serait due à une oxydation et réduction simultanées des substances. 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 (NH_3) distillé est recueilli dans l'acide borique additionné d'indicateurs et puis titré soit directement soit en retour par l'acide sulfurique de normalité et de facteur de correction donné (ISO, 1995).

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) Digestion ou minéralisation par attaque acide

Dans un ballon Kjeldahl de 500 ml, on introduit 1g de poudre fine de l'échantillon, on ajoute 25 ml d'acide sulfurique concentré et une cuillère d'un mélange catalyseur chimique ($CuSO_4$, K_2SO_4, $FeSO_4$). Ensuite on rince 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 :

N – organique (échantillon) + H_2SO_4conc. → $(NH_4)_2\ SO_4$+CO_2+ H_2O

(2) Neutralisation et distillation

Après refroidissement et dilution avec au moins 300 ml d'eau distillée, on ajoute à la solution obtenue 1g de thiosulfate de sodium. Ensuite, on apprête l'appareillage de distillation par entraînement à la vapeur puis en inclinant le ballon, on ajoute un excès de NaOH 50% (au minimum 75 ml) jusqu'à l'obtention du milieu basique. On connecte 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 :

N-Végétaux + $H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$

$(NH_4)_2SO_4 + 2\ NaOH \rightarrow 2NH_4OH + Na_2SO_4$

$NH_4OH + H_3BO_3 \rightarrow NH_4^+ + H_2O + 2H_2BO_3^-$

$2\ NH_4^+ + 2H_2BO_3^- + H_2SO_4 \rightarrow 2\ H_3BO_3 + (NH_4)_2SO_4$

$$N(\%) = \frac{14.008 \times (Y - Bl) \times N \times fk \times \frac{v_1}{v_2}}{P} \times 100$$

Où v_1 est le volume (ml) du jaugé (en général 250ml) ; v_2 est le volume (ml) de prise pour analyse (en général 25ml) ; Y est le volume (ml) d'une solution titrée par H_2SO_4 0,05 N ; *fk* est le facteur correctif de H_2SO_4 0,05 N ; Bl est le volume moyen de H_2SO_4 0,05 N nécessaire pour titrer les blancs ; P est le poids de l'échantillon (en g) ; N est la normalité de l'acide utilisé.

(3) Calcul du facteur de correction (*fk*) :

On prélève 3ml de la solution Na_2CO_3 et on titre par H_2SO_4 une fois normale 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 : $fk = \frac{3 \times 0.05}{v \times N}$

Le calcul de ce facteur de correction a montré que *fk* = 1

II.3.6. Détermination du rapport C/N

Le rapport C/N est déterminé à partir des teneurs en carbone et en azote, calculées dès l'obtention des résultats de ces deux paramètres.

II.3.7. Détermination de la cellulose brute

La teneur en cellulose est déterminée par une méthode conventionnelle : la méthode de WEENDE. Les matières cellulosiques constituent le résidu organique obtenu après deux hydrolyses à chaud, l'une en milieu acide, l'autre en milieu alcalin. La teneur en cellulose exprimée en pourcentage en masse rapporté au produit sec après dessiccation 105°C pendant 2 heures puis une incinération à 525°C pendant une heure, la teneur en cellulose brute exprimée en pourcentage par rapport au sec(Van Soest, 1963).

$$\%\mathrm{CB} = \frac{P_1 - P_2}{PRE} \times \frac{100}{MS} \times 100$$

CB : Cellulose brute ; P1 : Masse totale du résidu sec et du creuset avant incinération, en gramme ; P2 : Masse totale du résidu sec et de l'échantillon ; PRE : Masse de la prise d'essai, en grammes ; MS : Teneur en matière sèche de l'échantillon exprimée en %.

II.3.8. Détermination de la teneur en phosphore total

La teneur en phosphore total a été déterminée après minéralisation par voie sèche à 550°C avec un dosage colorimétrique. A l'aide de 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 échantillon après avoir mesuré l'absorbance à 700 nm grâce au spectrophotomètre de marque UV.MINI-1240 UV-VIS SPECTROPHOTOMETER SHIMADZU (Jemali et al., 1996). Les étalons ont été préparés à partir de KH_2PO_4.

II.3.9. Détermination de la teneur en phosphore assimilable

Le dosage du phosphore assimilable dans le fumier est fait par la méthode suivante : Le principe de la méthode repose sur une réaction colorimétrique entre les ions phosphate (PO_4^{3-}), le molybdate d'ammonium et le tartrate de potassium antimoniyle en milieu acide. Ce complexe phosphomolybdo-antimonie est réduit par l'acide ascorbique en un composé bleu (bleu de molybdène), mesuré par spectrophotométrie à 880 nm. La coloration bleue est proportionnelle à la concentration en phosphore dans l'échantillon (Murphy & Riley, 1962).

- ✓ **Mode opératoire**

Pour réaliser le dosage, on a commencé par préparer le filtrat issu de l'extrait de fumier, obtenu après agitation et filtration. Ensuite, on a prélève de 5 à 10 ml de cet extrait dans un tube propre. À ce volume, on a ajouté 2,5 ml de réactif mixte, composé de molybdate d'ammonium, de tartrate de potassium antimoniyle et d'acide sulfurique. On a ajouté ensuite 0,5 ml d'acide ascorbique, préparé frais le jour même. Le mélange est ensuite laissé réagir pendant 10 minutes

à température ambiante, permettant la formation du complexe coloré bleu de molybdène. Une fois ce temps écoulé, on mesure l'absorbance à 880 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Enfin, la concentration en phosphore est déterminée en comparant la valeur obtenue avec une courbe d'étalonnage établie à partir de solutions étalons de KH_2PO_4.

II.3.10. Détermination de la teneur en potassium

Le potassium a été déterminé par la méthode volumétrique (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'$AgNO_3$ avec une solution de Thiocyanate d'ammonium NH_4SCN de titre connu en présence du chlorure de fer comme indicateur coloré (Rodier et al., 2009).

- ✓ **Mode opératoire**

On a pesé 1,5g de l'échantillon préalablement broyé et tamisé à 0,75 µm, puis on a introduit la prise d'essai dans une fiole jaugé de 500 ml contenant 200 ml d'eau distillée.

Après une agitation énergique pendant 30 minutes, nous avons complété le volume jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. La solution obtenue a ensuite été homogénéisée, puis filtrée à l'aide d'un filtre ordinaire, en éliminant les premiers millilitres du filtrat.

On a pipeté 50 ml du filtrat et on l'a mis dans un erlenmeyer de 250 ml. Après ajout de d'$AgNO_3$ (0,1N) et 10 ml chlorure de fer ($FeCl_3$). Nous avons titré avec NH_4SCN jusqu'au virage du blanc au rouge brun. Nous avons réalisé le blanc de la même manière. La concentration en potassium, exprimée en % est donnée par la relation :

$$K(\%) = \frac{(A - B) \times 39.09 \times N \times \frac{v_1}{v_2}}{P} \times 100$$

Où v_1 est le volume (ml) du jaugé (500 ml) ; v_2 est le volume (ml) de prise pour analyse (50 ml) ; K est la teneur du potassium ; A est le volume de NH_4SCN utilisé pour le témoin (ml) ; B est le volume de NH_4SCN utilisé pour l'échantillon (ml) ; P est le poids de l'échantillon titré exprimé sur base sèche (g) ; 100 est le facteur pour obtenir le pourcentage.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Paramètres physico-chimiques

Le tableau III.1 présente les résultats des paramètres physico-chimiques mesurés.

Tableau III.1. Résultats pour les paramètres physico-chimiques

Paramètres	F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
pH	9,32±0,06	10,51±0,05	9,31±0,05	8,03±0,05	8,46±0,06
C.E (mS/cm)	2,16±0,02	4,36±1,7	1,45±0,02	1,56±0,02	1,48±0,01
MS(%)	53,90±0,01	49,83±0,01	49,19±0,13	81,11±0,01	36,19±0,01
MM(%)	33,96±0,01	29,50±0,01	27,90±0,01	36,19±0,00	9,37±0,00
Humidité(%)	46,07±0,01	50,17±0,01	50,89±0,01	18,87±0,02	63,80±0,02

Tous les fumiers présentent un caractère basique. Toutefois, le fumier de poule (pH = 8,03) et celui de vache (pH = 8,46) affichent des pH légèrement basiques, ce qui nous permet de dire qu'ils offrent une bonne stabilité chimique et une compatibilité favorable avec la plupart des sols agricoles (Brady & Weil, 2016). En revanche, les fumiers de lapin (pH = 10,51), de chèvre (pH = 9,32) et de porc (pH = 9,31) sont fortement basiques, ce qui suggère qu'ils peuvent limiter la disponibilité de certains éléments nutritifs (comme le fer ou le manganèse), réduire l'efficacité des apports azotés par volatilisation d'ammoniac et perturber l'équilibre biologique du sol (Bernal et al., 2009). Du point de vue de la conductivité électrique (CE), les fumiers de chèvre, de poule, de porc et de vache présentent une valeur inférieure à 4 mS/cm. Ils sont donc considérés comme des amendements de bonne qualité, sans risque majeur pour les cultures. En revanche, le fumier de lapin, dont la CE atteint 4,36 mS/cm, doit être utilisé avec prudence, notamment sur des cultures tolérantes au sel (Bernal et al., 2009; Pescod, 1992).

Le fumier de poule est le plus sec (81,11%), ce qui indique un faible taux d'humidité. À l'inverse, le fumier de vache a la plus faible MS (36,19%), donc il est le plus humide.

Le fumier de poule contient également le plus de MM (36,19%), ce qui signifie qu'il est riche en éléments minéraux. Le fumier de vache en contient le moins (9,37%), ce qui reflète une faible teneur en éléments minéraux.

L'humidité varie de façon inversement proportionnelle à la matière sèche. Ainsi, le fumier de vache, avec une humidité élevée (63,80 %), est le plus humide, tandis que le fumier de poule, avec seulement 18,87 % d'humidité, est le plus sec. Cette différence influence directement les conditions de conservation et la facilité de transport de ces fumiers.

III.2. Paramètres chimiques

Le tableau III.2 nous fournit les résultats pour les paramètres chimiques.

Tableau III.2. Résultats pour les paramètres chimiques

Paramètres	F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
MO(%)	19,96±0,04	20,50±0,01	21,19±0,01	44,93±0,02	26,81±0,01
C(%)	9,96±0,02	10,16±0,02	10,60±0,01	22,44±0,01	13,40±0,01
CB(%)	20,54±0,01	27,18±0,01	27,53±0,01	18,23±0,01	41,29±0,01
C/N (%)	12,00±0,01	12,39±0,01	10,00±0,01	11,62±0,01	12,64±0,01

Le tableau III.2 nous montre que la matière organique est la plus élevée dans le fumier de poule (44,93%) et la plus faible dans celui de chèvre (19,96%). Cela indique que le fumier de poule est particulièrement riche en matières organiques, donc potentiellement plus bénéfique pour améliorer la structure du sol (AFNOR, 2005).

Le carbone total suit une tendance similaire à la MO. Le fumier de poule (22,44%) et de vache (13,40%) sont les plus riches en carbone. Cela suggère un potentiel plus élevé de libération de nutriments à long terme.

La cellulose brute est très élevée dans le fumier de vache (41,29%) et de lapin (27,18%), indiquant une décomposition plus rapide, donc une libération plus rapide des nutriments dans le sol.

Le rapport C/N est un indicateur important pour estimer la vitesse de minéralisation de l'azote (Janssen, 1996). Tous les fumiers ont un C/N entre 10 et 13, ce qui est idéal pour une bonne minéralisation sans risque de faim d'azote pour les plantes (Soltner, 2001). Le fumier de porc a le rapport le plus bas (10,00), indiquant une décomposition rapide. Le plus élevé est celui de la vache (12,64), mais reste acceptable.

III. 3. Composition en éléments fertilisants

Les résultats de la teneur en éléments fertilisant (N-P-K) sont présentés dans le tableau III.3.

Tableau III.3.Teneurs en éléments fertilisants de différents types de fumiers

Paramètres	F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
N_{tot} (%)	0,83±0,01	0,82±0,01	1,06±0,02	1,93±0,01	1,06±0,01
P_{tot}(%)	0,84±0,01	0,14±0,01	0,17±0,01	0,55±0,01	0,89±0,01
P_{ass}(%)	0,14±0,01	0,07±0,01	0,13±0,01	0,14±0,01	0,63±0,01
K(%)	0,77±0,01	0,26±0,00	1,29±0,01	1,43±0,00	1,06±0,06
P_2O_5 (%)	0,32±0,02	0,16±0,02	0,30±0,02	0,32±0,02	1,44±0,02
K_2O (%)	0,92±0,01	0,31±0,00	1,55±0,01	1,72±0,00	1,27±0,07

Les résultats du tableau III.3 nous montrent que le fumier de poule est plus riche en azote (1,93%) par contre le fumier de chèvre et de lapin sont moins concentré en azote (0,83% et 0,82% respectivement). Le fumier de vache et de chèvre sont les plus riche en phosphore total ce qui fait que le fumier de vache soit plus riche en phosphore assimilable (0,63%) par rapport aux autres fumiers. Le fumier de lapin a une très faible teneur en phosphore. Quant au potassium nous observons une teneur élevé dans le fumier de poule (1,43%) et une basse teneur s'observe dans le fumier de chèvre (0,77%).

III.4. Teneurs en matière sèche (MS), matière organique (MO) et matière minéral (MM)

La figure III.1 montre que la teneur en MS est la plus élevée dans le fumier de poule (F.Pou) avec 81,11 % tandis que le fumier de vache (F.V) a une teneur en MS la plus faible **(**36,19 %**),** ce qui indique qu'il contient plus d'eau. La plus forte proportion de matière minérale se retrouve dans le fumier de poule (F.Pou**)** avec 36,19 %**,** suivi de près par le fumier de chèvre (F.C) à 33,96 %. Le fumier de vache (F.V) en contient le moins (9,37 %), ce qui pourrait indiquer une plus faible richesse en éléments minéraux. L**e** fumier de poule (F.Pou) présente aussi la plus forte teneur en matière organique **(**44,93 %**),** ce qui le rend très intéressant pour l'amendement organique des sols. Le fumier de chèvre (F.C) et le fumier de lapin (F.L) ont des teneurs similaires en MO **(**19,96 % et 20,50 % respectivement), tandis que le fumier de vache (F.V) est relativement riche en MO (26,81 %) malgré sa faible teneur en MS.

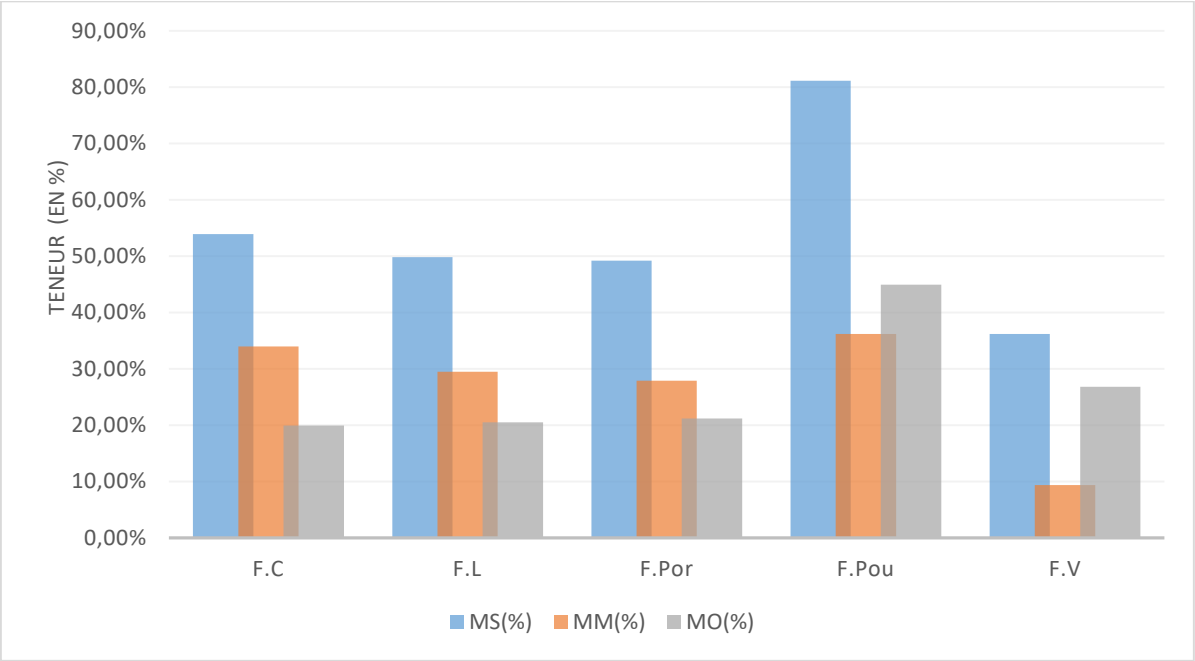


Figure III.1. Comparaison de la matière sèche(MS), la matière minérale (MM) et la matière organique (MO) en fonction du type de fumier

III.5. Le pH

La figure III.2 illustre les valeurs de pH mesurées pour cinq types de fumier : chèvre (F.C), lapin (F.L), porc (F.Por), poule (F.Pou) et vache (F.V). Selon la littérature, un fumier organique de bonne qualité présente généralement un pH compris entre 6,5 et 8,5 (FAO, 2003; Soltner, 2001). Dans ce contexte, il ressort que seuls les fumiers de poule (pH 8,03) et de vache (pH 8,46) se situent dans cette plage optimale. Ces valeurs traduisent une bonne stabilité chimique du fumier et une compatibilité favorable avec la plupart des sols agricoles. Leur caractère légèrement basique est bénéfique pour corriger l'acidité des sols tout en maintenant une activité biologique efficace (Brady & Weil, 2016). En revanche, les fumiers de chèvre (pH 9,32), de porc (pH 9,31) et surtout de lapin (pH 10,51) présentent des pH nettement supérieurs à la norme recommandée, les classant comme fumiers très alcalins. Un pH aussi élevé peut limiter la disponibilité de certains éléments nutritifs (comme le fer ou le manganèse), réduire l'efficacité des apports azotés par volatilisation d'ammoniac et perturber l'équilibre biologique du sol (Bernal et al., 2009). En plus, les ions basiques (Ca^{2+} et Mg^{2+}) former des complexes qui précipitent surtout avec les phosphates (PO_4^{3-}), les carbonates (CO_3^{2-}) et parfois les sulfates (SO_4^{2-}) et hydroxydes (OH^-), ce qui réduit la disponibilité du phosphore pour les plantes (Penn & Camberato, 2019).

Ainsi, bien que ces fumiers restent riches en éléments organiques, leur utilisation directe peut nécessiter des ajustements ou un compostage préalable afin de stabiliser leur pH et d'éviter tout effet négatif sur le sol ou les cultures.

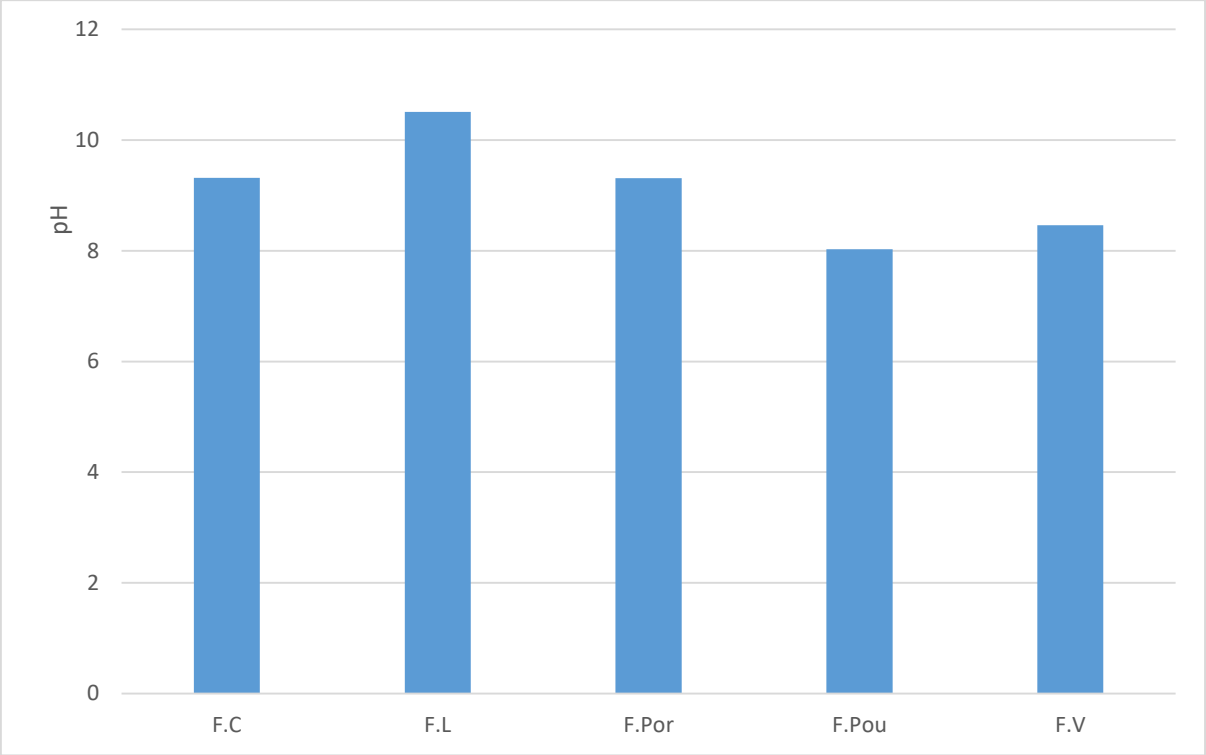


Figure III.2. Variation du pH en fonction du type de fumier

III.6. Conductivité électrique

D'après la littérature (Carmo et al., 2016), une conductivité électrique (CE) supérieure à 10 mS/cm peut présenter un risque pour les plantes. En revanche, une CE inférieure à 4 mS/cm reflète un fumier de bonne qualité, sans danger notable pour les cultures. Lorsque la CE se situe entre 4 et 8 mS/cm, l'utilisation du fumier reste possible mais doit être effectuée avec prudence, en particulier sur des espèces tolérantes au sel. Au-delà de 8 mS/cm, le fumier est considéré comme trop salé et présente un risque élevé de salinisation des sols et de toxicité pour les plantes (Pescod, 1992). Dans le cadre de la présente étude, la majorité des fumiers analysés affichent une CE inférieure à 4 mS/cm (Fig.III.3.), ce qui confirme leur bonne qualité agronomique. Seul le fumier de lapin, dont la CE atteint 4,36 mS/cm, se situe au-dessus du seuil de 4 mS/cm et doit, par conséquent, être utilisé avec précaution, en privilégiant les cultures tolérantes au sel (Pescod, 1992).

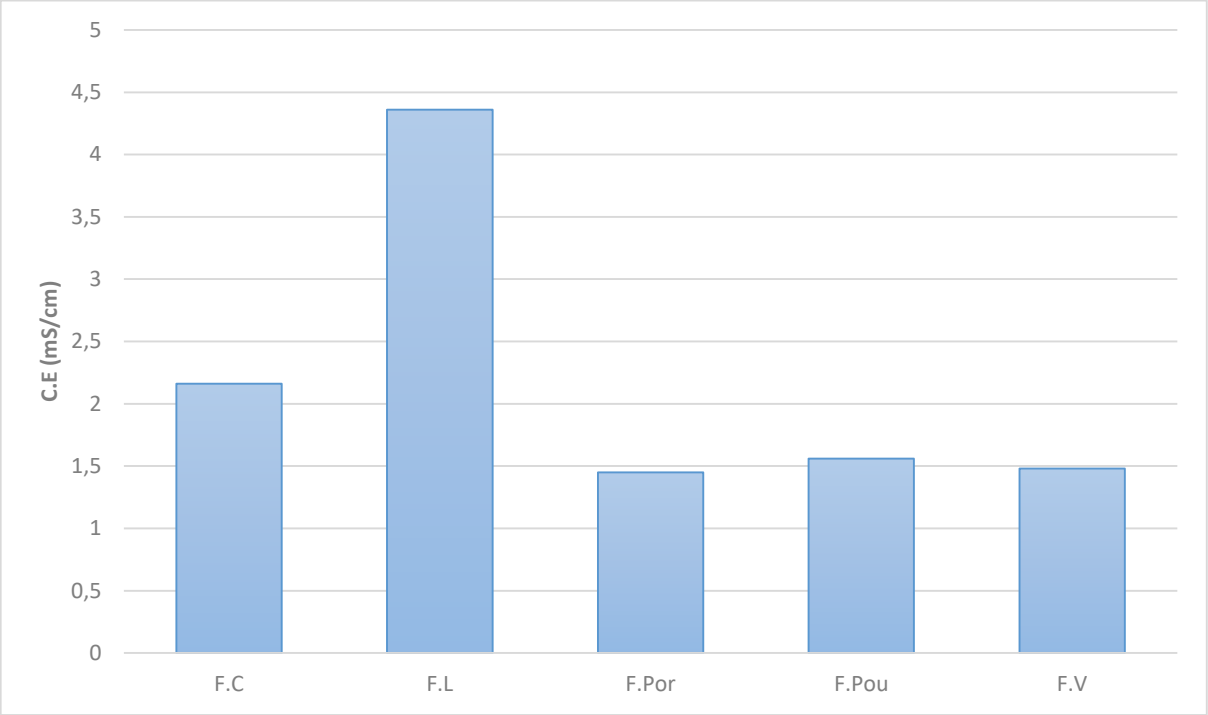


Figure III.3. Variation de la conductivité en fonction du type de fumier

III.7. Rapport C/N

La figure III.4 montre que l'ensemble des fumiers analysés présentent un rapport C/N compris entre 10 et 15, plage considérée comme optimale (Soltner, 2001). Un tel rapport traduit une bonne biodégradabilité de la matière organique et une libération équilibrée de l'azote, limitant à la fois les risques d'immobilisation et de pertes excessives (Bernal et al., 2009; Soltner, 2001). De ce fait, ces fumiers peuvent être considérés comme des amendements organiques de qualité, particulièrement favorables à l'amélioration de la fertilité des sols agricoles.

De manière plus précise, le fumier de porc (F.Por) se distingue par un rapport C/N de 10, soit le plus faible parmi les échantillons analysés. Cette valeur indique que ce fumier possède une capacité de décomposition plus rapide que les autres types de fumier(Soltner, 2001). En conséquence, l'azote contenu dans la matière organique devient rapidement disponible pour les plantes, favorisant ainsi une nutrition efficace (Soltner, 2001). De plus, un tel rapport C/N minimise pratiquement tout risque d'immobilisation de l'azote, ce qui en fait un amendement particulièrement intéressant pour des sols nécessitant une restitution rapide des éléments nutritifs (Bernal et al., 2009; Brady & Weil, 2016). À l'inverse, le fumier de vache (F.V) présente le rapport C/N le plus élevé (12,64) parmi les échantillons étudiés. Bien qu'un peu plus lent à se décomposer, il reste parfaitement dans la plage favorable pour l'amendement des sols (Bernal et al., 2009).

Les autres types de fumier à savoir fumier de chèvre (F.C), le fumier de lapin (F.L) et le fumier de poule (F.Pou) présentent des rapports C/N situés entre 11 et 12, traduisant un bon équilibre entre la stabilité de la matière organique et la libération progressive de l'azote. Ces valeurs confirment leur fort potentiel en tant qu'amendements organiques pour améliorer durablement la fertilité des sols (Bernal et al., 2009; Brady & Weil, 2016; Soltner, 2001).

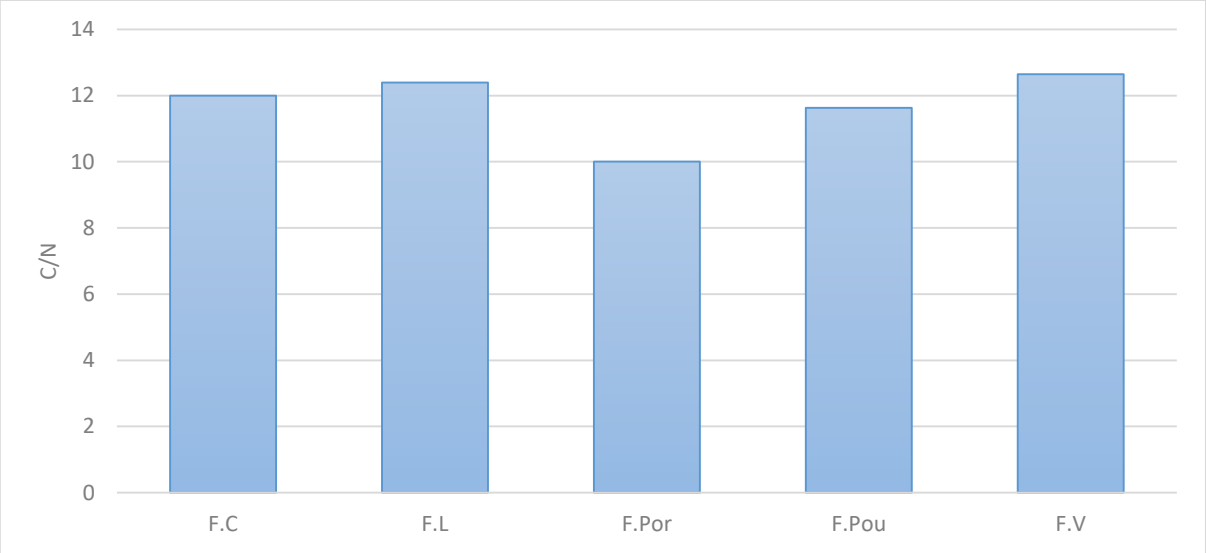


Figure III.4. Variation du rapport C/N en fonction du type de fumier

III.8. Teneur en azote

La figure III.5 montre que la teneur en azote varie selon le type de fumier. Le fumier de poule 1,93 %) présente la valeur la plus élevée, suivi de ceux de porc et de vache (1,06 %), tandis que les fumiers de chèvre et de lapin affichent les teneurs les plus faibles (inférieures à 1 %). Ces différences s'expliquent par la composition des déjections animales : les fumiers de poule contiennent une proportion importante d'urine riche en azote ammoniacal et de matières organiques facilement dégradables (Nahm, 2003). À l'inverse, les fumiers de ruminants (chèvre, vache) sont plus fibreux et pauvres en azote, car une partie de celui-ci est utilisée par les micro-organismes du rumen avant l'excrétion (Zurak et al., 2023)

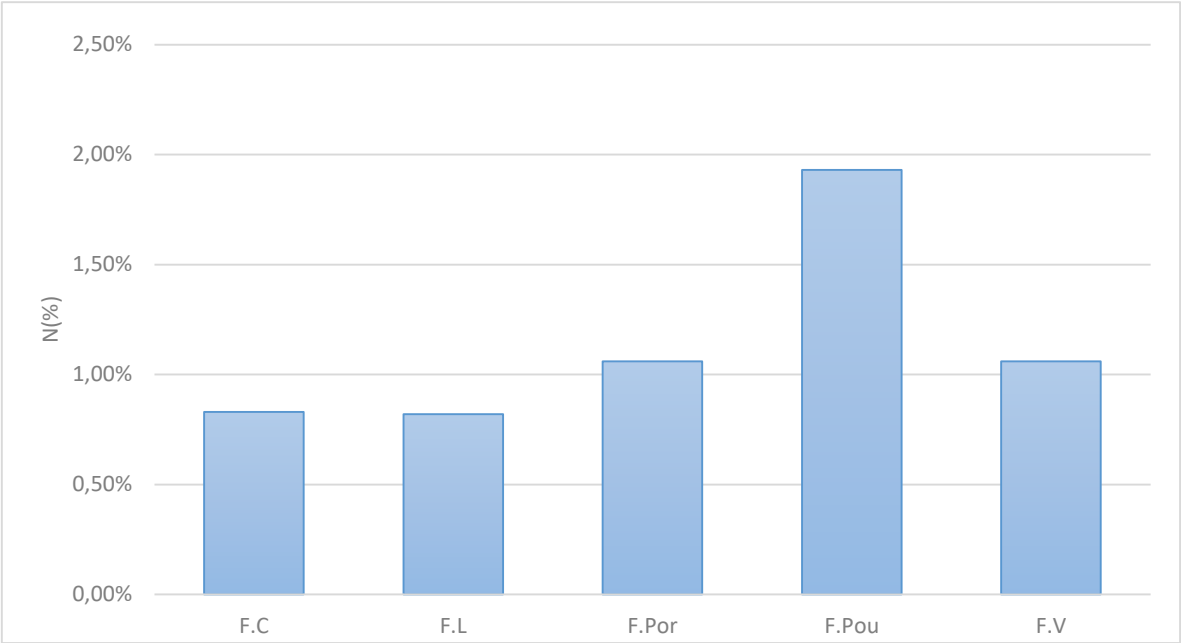


Figure III.5. Variation de la teneur en azote en fonction du type de fumier

III.9. Teneur en phosphore

La Figure III.6 met en évidence que le fumier de vache présente les teneurs les plus élevées en phosphore total (P_{tot}) et en phosphore assimilable (P_{ass}). Cela montre qu'il constitue une source particulièrement intéressante de phosphore pour les cultures, en combinant richesse et disponibilité (Soltner, 2001). Le fumier de porc, bien que moins riche en phosphore total, se distingue par une forte proportion de phosphore assimilable, ce qui le rend efficace malgré sa faible concentration globale. En revanche, le fumier de chèvre, malgré une teneur élevée en phosphore total, présente une faible disponibilité du phosphore, ce qui peut limiter son efficacité à court terme pour les plantes (Hinsinger et al., 2003). Enfin, les fumiers de lapin et de poule sont les moins riches, tant en phosphore total qu'en phosphore assimilable, et apportent donc une contribution plus faible à la fertilisation phosphatée.

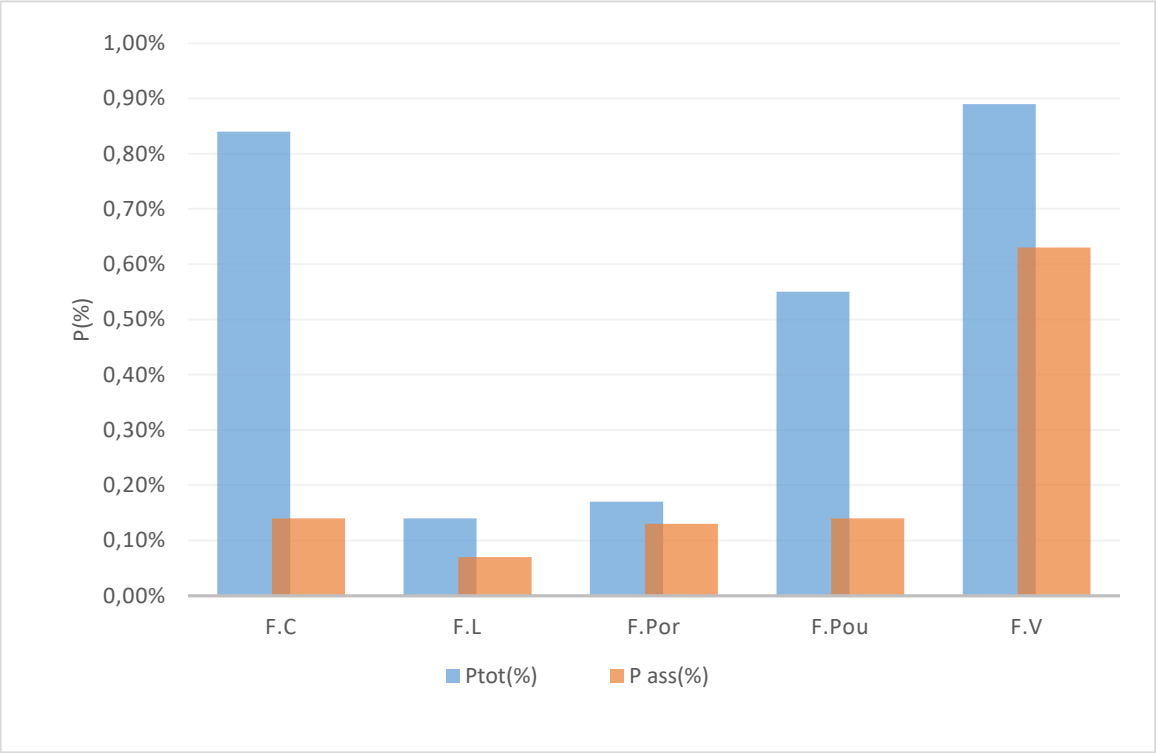


Figure III.6. Variation de la teneur en P en fonction du type de fumier

III.10. Teneur en potassium

La figure III.7 montre que le fumier de poule (1,43 %) et de porc (1,29 %), suivis de ceux de vache (1,06 %), de chèvre (0,77 %) et de lapin (0,26 %). Cette différence résulte principalement de la composition alimentaire et de la proportion d'urine dans les déjections (Marumo et al., 2024). Cela permet de conclure que les fumiers de poule et de porc, riches en potassium, sont particulièrement adaptés aux cultures à forte exigence potassique, tandis que les fumiers de vache et de chèvre, de teneur moyenne, conviennent à un apport équilibré en K. En revanche, le fumier de lapin**,** plus pauvre en potassium, est mieux adapté à un entretien modéré et régulier de la fertilité du sol**.**

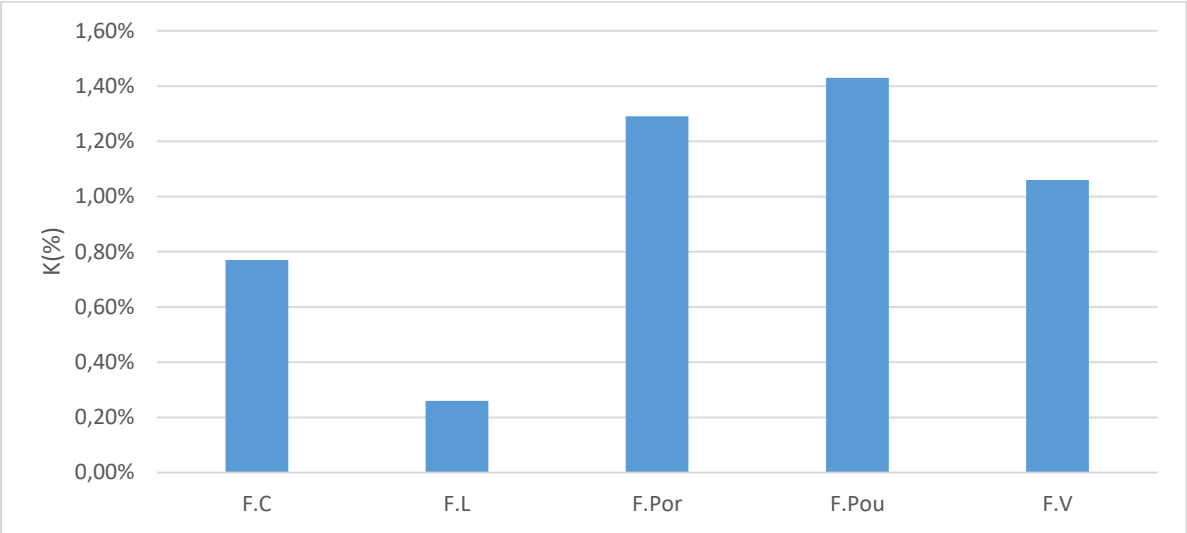


Figure III.7. Variation de la teneur en K en fonction du type de fumier

III.11. Corrélation des caractéristiques analytiques des 5 types de fumiers

En analysant le tableau III.4, nous remarquons que le pH est corrélé positivement (r = 0,851) avec la conductivité électrique (C.E). Plus le fumier est alcalin, plus il est salin (Bernal et al., 2009). Par contre, le pH présente une corrélation négative avec la matière organique (MO) (r = –0,769). Ainsi, une augmentation de la teneur en matière organique, en carbone et en azote s'accompagne d'une diminution du pH (Brady & Weil, 2016).

La conductivité électrique a une corrélation négative forte avec le K et une corrélation modéré avec M.O, C, et N ce qui signifie que le fumier riche en M.O est souvent moins salin ; ce qui est un signe de bonne qualité organique (Zbytniewski & Buszewski, 2005). La matière sèche à une corrélation fortement négative avec l'humidité ce qui explique que lorsque la matière sèche augmente l'humidité diminue. La matière minérale corrèle négativement avec la cellulose brute et le phosphore assimilable ce qui peut nous permettre de dire qu'une présence accrue de M.M peut réduire le phosphore assimilable du fait que la présence de certains cations peut contribuer à l'adsorption de ce dernier (Mabagala & Mng'ong'o, 2022). Nous observons également une corrélation extrêmement positive entre MO, C et N. Ces trois paramètres reflètent ensemble le potentiel de fertilité organique du fumier (Geisseler et al., 2021; Khalil et al., 2005). Dans l'ensemble, les corrélations entre le rapport C/N et les autres paramètres demeurent faibles à modérées. Les corrélations les plus notables sont positives avec le phosphore total (r = 0,522) et le phosphore assimilable (r = 0,434), tandis qu'elles sont négatives avec le potassium (r = –0,537) et la matière minérale (r = –0,339). Aucune de ces relations n'atteint toutefois un seuil permettant de les qualifier de fortes ou significatives. Il ressort néanmoins qu'un rapport C/N élevé pourrait être lié à une moindre disponibilité du potassium (Tang et al., 2008).

Tableau III.4. Corrélations entre les différents paramètres des 5 types de fumiers étudiés.

	pH	C.E (mS/cm)	MS(%)	MM(%)	Humidité(%)	MO(%)	C(%)	CB(%)	C/N (%)	Ntot (%)	Ptot(%)	P ass(%)	K(%)
pH	1												
C.E (mS/cm)	0,851	1											
MS(%)	-0,389	-0,121	1										
MM(%)	0,164	0,214	0,781	1									
Humidité(%)	0,390	0,120	-1,000**	-0,781	1								
MO(%)	-0,769	-0,396	0,781	0,219	-0,781	1							
C(%)	-0,773	-0,402	0,779	0,217	-0,780	1,000**	1						
CB(%)	-0,024	-0,100	-0,833	-,987**	0,833	-0,313	-0,311	1					
C/N (%)	0,038	0,410	-0,194	-0,339	0,192	0,043	0,040	0,303	1				
Ntot (%)	-0,764	-0,471	0,814	0,291	-0,814	,979**	,980**	-0,375	-0,162	1			
Ptot(%)	-0,595	-0,484	-0,108	-0,350	0,106	0,180	0,183	0,211	0,522	0,068	1		
P ass(%)	-0,485	-0,436	-0,553	-,921*	0,552	0,057	0,060	0,847	0,434	-0,038	0,648	1	
K(%)	-0,861	-,920*	0,400	-0,011	-0,399	0,630	0,635	-0,085	-0,537	0,729	0,213	0,219	1

*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

III.12. Coefficient Equivalent Engrais pour différents types de fumier analyses

Pour estimer le Coefficient Équivalent Engrais (CEE) d'un fumier, on compare sa teneur en nutriments assimilables (souvent N, P_2O_5 et K_2O) à celle d'un engrais chimique de référence (comme le NPK 15-15-15), en prenant aussi en compte un coefficient d'efficacité agronomique (% de disponibilité effective dans le sol), comme le montre le tableau III.5.

Tableau III.5. Coefficient d'efficacité agronomique pour N, P_2O_5 et K_2O (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006; MAAF, 2013)

Elément	Coefficient d'efficacité moyen	Valeur moyenne
N (Azote total)	0,30 à 0,50	0,40
P_2O_5	0,30 à 0,50	0,40
K_2O	0,70 à 0,90	0,80

La formule du Coefficient Équivalent Engrais (CEE) d'un fumier par élément est la suivante : $CEE_x = Teneur_x \times$ Coefficient d'efficacité (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006). En nous servant des tableaux III.3. et III.5 nous faisons le calcul pour chaque fumier et pour N, P_2O_5, K_2O, puis, on additionne les résultats pour obtenir un CEE global par fumier (Chabalier, Van de Kerchove, et al., 2006).

Tableau III.6. Coefficient Équivalent Engrais (CEE) pour différents fumiers études

Type de fumier	**CEE-N**	**CEE-P_2O_5**	**CEE-K_2O**	**CEE-total**
Chèvre (F.C)	0,332	0,128	0,736	1,196
Lapin (F.L)	0,328	0,064	0,248	0,640
Porc (F.Por)	0,424	0,120	1,240	1,784
Poule (F.Pou)	0,772	0,128	1,376	2,276
Vache (F.V)	0,424	0,576	1,016	2,016

Le coefficient équivalent engrais (CEE) est un indicateur essentiel pour évaluer l'efficacité fertilisante des fumiers organiques, notamment en termes de nutriments disponibles pour les plantes (Eghball & Power, 1999; MAAF, 2013). Concernant CEE-N, le fumier de poule se distingue nettement avec une valeur de 0,772, ce qui en fait la source la plus riche en azote rapidement disponible (Schröder et al., 2007). Cela en fait un amendement idéal pour les cultures exigeantes en azote, comme le maïs ou les légumes-feuilles (Eghball & Power, 1999). Les fumiers de porc et de vache présentent un CEE-N de 0,424, indiquant une bonne libération d'azote (Petit & Jobin, 2005) mais avec une efficacité inférieure à celle du fumier de poule. En

revanche, les fumiers de chèvre et de lapin ont les valeurs les plus faibles, autour de 0,33, ce qui traduit un apport azoté plus limité et souvent plus lent (COMIFER & Chambres d'agriculture Rhône-Alpes, 2001). Cette différence s'explique par la forme de l'azote : le fumier de poule, riche en urée et acide urique, est rapidement minéralisé, tandis que les autres fumiers contiennent surtout de l'azote organique lentement décomposé (Somda et al., 2011).

Du côté du phosphore (CEE-P_2O_5), seul le fumier de vache se démarque avec un CEE de 0,576, traduisant une bonne disponibilité de ce nutriment, souvent peu mobile dans les sols (Brady & Weil, 2016). Les autres fumiers, dont celui de poule, ont un CEE-P_2O_5 autour de 0,12, tandis que celui du lapin est le plus faible (0,064), ce qui limite leur intérêt pour les cultures qui exigent une grande quantité en phosphore. En ce qui concerne le potassium (CEE-K_2O), le fumier de poule et de porc sont les plus riches (>1,2), suivis par celui de vache (1,016), ce qui est favorable à la qualité des fruits et au développement racinaire (Zörb et al., 2014). Le fumier de chèvre a une teneur intermédiaire (0,736) et celui de lapin est très pauvre (0,248). Au total, en additionnant les trois éléments majeurs (N, P_2O_5 et K_2O), le fumier de poule ressort comme le plus complet et performant (CEE total =2,276), suivi de celui de vache (CEE total =2,016) et de porc (CEE total =1,784). Le fumier de chèvre a une valeur fertilisante modérée (CEE total =1,196), tandis que le fumier de lapin est le moins efficace globalement (CEE total =0,640). En conclusion, le fumier de poule est fortement recommandé pour ses apports équilibrés et rapidement disponibles en NPK. Le fumier de vache est également intéressant pour sa richesse en phosphore. À l'inverse, le fumier de lapin, bien qu'utile pour l'amélioration de la structure du sol, doit être utilisé en complément ou composté pour améliorer sa valeur fertilisante immédiate.

III.13. Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation du maïs et de la tomate

III.13.1. Besoins en éléments nutritifs pour la culture du maïs et de la tomate

Les besoins moyen du maïs et de la tomate sont exprimés dans le tableau III.7.

Tableau III.7. Besoin du maïs et de la tomate en élément fertilisant (en kg/ha)

Eléments	N(kg/ha)	P_2O_5(kg/ha)	K_2O(kg/ha)	Références
Maïs	100-120	40-60	60-80	(CIRAD, 2003a; FAO, 2006)
Tomate	120-150	80-100	180-250	(IFDC, 2002; Soltner, 1996)

III.13.2. Quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins en éléments fertilisant pour le maïs et la tomate

Pour mieux mener cette étude nous avons converti les valeurs du tableau III.3 qui donne la teneur en élément fertilisant pour les fumiers analysés en %. Les valeurs exprimées en kg d'élément fertilisant par tonne de fumier sont données dans le tableau III.8. Nous avons tenu compte du fait que seulement 40% de N disponible dans le fumier sont minéralisé la première année (AFNOR, 2005).

Tableau III.8. Teneurs en éléments fertilisants disponible à la plante dans les différents types de fumiers (kg/t)

	F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
Ntot (kg/t)	3,32	3,28	4,24	7,72	4,24
P_2O_5 (kg/t)	3,21	1,60	2,98	3,21	14,43
K_2O (kg/t)	9,24	3,12	15,48	17,16	12,72

Pour déterminer la quantité de fumier qu'il faut pour le maïs et la tomate nous avons fait la combinaison entre le tableau III.7 et le tableau III.8.

III.13.3.Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation du maïs

Selon les recommandations de la FAO (2000) et du MAAF (2014), la dose de fumier organique devrait pas dépasser 35 t/ha/an afin de limiter les risques de pollution des sols et des eaux souterraines par les nitrates (FAO, 2000; MAAF, 2014).

Le tableau III.9 nous montre que le fumier de chèvre (F.C) s'avère globalement satisfaisant. Pour répondre aux besoins en azote (N), une application de 30 à 36 t/ha est nécessaire, ce qui peut entraîner un dépassement de la limite autorisée. En revanche, ce fumier est très bon en phosphore (12–19 t/ha) et efficace en potassium (6–9 t/ha). Afin d'éviter un excès de matière organique, une dose plus modérée par exemple 25 t/ha peut être envisagée, à compléter par un apport d'engrais azoté minéral d'environ 20 kg/ha (MAAF, 2014). Le fumier de lapin (F.L) présente une faible teneur en azote assimilable, ce qui nécessite des apports importants pour satisfaire les besoins des cultures. Les quantités nécessaire en phosphore varient entre 25 et 37 t/ha (MAAF, 2014), et celles en potassium entre 19 et 26 t/ha. Ainsi, même avec un apport de 26 tonnes de F.L, il reste nécessaire de compléter avec 25 kg d'engrais azoté et 100 kg de K_2O pour atteindre des niveaux nutritifs adéquats (MAAF, 2014).

Le fumier de porc (F.Por) offre un bon équilibre nutritionnel. Il fournit de l'azote (23–28 t/ha),

du phosphore (13–20 t/ha) et du potassium (4–5 t/ha) dans les fourchettes recommandées, sans dépasser la limite des 30 t/ha. Il couvre efficacement les besoins du maïs sans excès, ce qui en fait un choix pertinent sur le plan agronomique. Le fumier de poule (F.Pou) est le plus performant dans cette comparaison. Il apporte des quantités optimales d'azote (13–16 t/ha), de phosphore (12–19 t/ha) et de potassium (3–5 t/ha), tout en restant bien en deçà du seuil des 30 t/ha. Tous les besoins du maïs peuvent ainsi être couverts avec moins de 20 t/ha, faisant de ce fumier le meilleur compromis pour une fertilisation complète, équilibrée et sécurisée. Le fumier de vache (F.V) permet de satisfaire les besoins en azote (23–28 t/ha) et en potassium (5–6 t/ha). Il peut libérer le phosphore nécessaire même à faible dose (2–4 t/ha), il peut suffire dans certaines conditions pour répondre aux besoins du maïs. En respectant une dose maximale de 28 t/ha, ce fumier peut donc constituer une solution complète.

En résumé, le fumier de poule constitue le choix optimal pour une fertilisation du maïs à la fois équilibrée, efficace et sécurisée, nécessitant une dose maximale d'environ 16 t/ha. Les fumiers de porc et de vache sont également efficaces, avec des apports pouvant aller jusqu'à 28 t/ha, conformément aux limites recommandées (FAO, 2000; MAAF, 2014). Les autres types de fumier peuvent être utilisés en complément, associés à des engrais chimiques, afin de compenser leurs carences en élément fertilisant (Tableau III.11).

Tableau III.9. La quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins du maïs par hectare

		F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
Quantité	Pour N	30-36	30-37	23-28	13-16	23-28
de fumier	Pour P_2O_5	12-19	25-37	13-20	12-19	2-4
(en t/ha)	Pour K_2O	6-9	19-26	4-5	3-5	5-6

III.13.4.Analyse comparative des fumiers pour la fertilisation de la tomate

Le tableau III.10 nous montre que le fumier de chèvre (F.C) n'est pas adapté tel quel, car pour couvrir les besoins de la tomate en azote (N), il faut apporter trop de fumier (entre 36 et 45 t/ha), ce qui dépasse largement la limite recommandée de 30 t/ha. En revanche, il couvre bien les besoins en phosphore (P_2O_5) et en potassium (K_2O), avec des apports situés entre 25 et 31 t/ha pour le phosphore et entre 19 et 27 t/ha pour le potassium. Pour pouvoir l'utiliser correctement, il faut réduire la dose de fumier à 31 t/ha et compléter avec 50 kg/ha d'engrais azoté (MAAF, 2014). Le fumier de lapin (F.L) n'est pas adapté, car une application supérieure

à 30 t/ha ne suffit toujours pas à satisfaire les besoins en azote, en phosphore et en potassium des cultures. Pour une utilisation efficace de cette dose, il est nécessaire de compléter avec des apports importants d'engrais minéraux : 50 kg/ha d'azote, 50 kg/ha de P_2O_5 et 150 kg/ha de K_2O (Tableau III.11). Le fumier de porc (F.Por) est à la limite acceptable pour l'azote et le phosphore, ce qui signifie qu'il peut parfois dépasser légèrement les 30 t/ha. En revanche, il couvre très bien les besoins en potassium. Le fumier de poule (F. Pou) est le plus équilibré et efficace. Il couvre tous les besoins nutritionnels de la plante avec des apports allant de 11 à 31 t/ha. L'apport en azote reste modéré (maximum 20 t/ha), ce qui en fait le meilleur choix parmi tous les fumiers étudiés. Enfin, le fumier de vache (F.V) peut légèrement dépasser la limite en azote (entre 28 et 35 t/ha), mais il est très riche en phosphore et couvre bien les besoins en potassium. Il peut donc être utilisé avec précaution, surtout si le sol n'est pas déjà riche en azote. Dans ce cas, il faut en ajouter en petite quantité.

En résumé l'analyse des différents fumiers pour la fertilisation de la tomate montre des différences marquées en termes d'efficacité et de sécurité. Le fumier de poule se distingue comme le plus équilibré et le plus efficace, couvrant tous les besoins en azote, phosphore et potassium avec des doses modérées (11 à 31 t/ha), ce qui en fait le meilleur choix parmi les fumiers étudiés. Le fumier de porc et le fumier de vache peuvent également être utilisés, mais nécessitent une attention particulière sur les apports en azote pour ne pas dépasser la limite recommandée de 30 t/ha (MAAF, 2014). En revanche, le fumier de chèvre et le fumier de lapin sont moins adaptés, car il faudrait des doses trop élevées pour satisfaire les besoins en azote, nécessitant impérativement un complément d'engrais minéral pour un usage efficace et sécuritaire.

Tableau III.10. La quantité de fumier nécessaire pour couvrir les besoins de la tomate par hectare

		F.C	F.L	F.Por	F.Pou	F.V
Quantité de fumier (en t/ha)	Pour N	36-45	37-46	28-35	15-20	28-35
	Pour P_2O_5	25-31	50-62	27-34	25-31	6-7
	Pour K_2O	19-27	57-80	12-16	11-15	14-20

Pour les deux cultures étudiées, le fumier de poule (F.Pou) constitue le meilleur choix, car il permet de couvrir tous les besoins nutritifs avec des doses modérées et sans nécessiter de complément. Le fumier de porc (F.Por) représente un deuxième choix pertinent : il est efficace,

mais un léger apport azoté peut être nécessaire, notamment pour la culture de la tomate. Le fumier de vache (F.V) peut également être utilisé, à condition de contrôler les apports en azote. Enfin, les fumiers de chèvre (F.C) et de lapin (F.L) sont moins adaptés, car ils exigent des compléments importants en azote, phosphore et potassium pour satisfaire pleinement les besoins des cultures.

Le tableau III.11 nous montre d'une façon synthétique les doses optimales de fumier à appliquer selon le type de fumier (F. Pou, F.Por, F.V, F.C, F.L) et la culture concernée (maïs ou tomate). Il indique également la limite maximale d'application au-delà de laquelle des risques de pertes d'éléments nutritifs ou de déséquilibres peuvent survenir, ainsi que les compléments minéraux éventuellement nécessaires pour assurer une fertilisation équilibrée.

Tableau III.11. Comparaison des doses optimales et des compléments nécessaires pour différents fumiers étudiés pour la culture de maïs et de tomate

Fumier	Culture	dose optimale (t/ha)	limite max	Complément nécessaire
F.Pou	maïs	13-16	< 20	-
	tomate	11-20	< 20	-
F.Por	maïs	23-28	< 30	-
	tomate	25-30	≤30	Leger complément azoté
F.V	maïs	23-28	< 30	-
	tomate	28-35	≤35	Contrôler l'azote
F.C	maïs	25	< 30	+20kg de N/ha
	tomate	31	< 35	+50kg de N/ha
F.L	maïs	26	< 30	+25kg de N/ha+100kg de K_2O/ha
	tomate	30	< 35	+50kg de N/ha+50kg de P_2O_5/ha +150kg de K_2O/ha

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Ce travail avait pour objectif principal d'évaluer la valeur fertilisante de cinq types de fumiers couramment produits au Burundi (chèvre, lapin, porc, poule et vache), à travers l'analyse de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques, ainsi que l'estimation de leurs coefficients équivalents engrais.

Les résultats ont montré que chaque fumier présente des atouts spécifiques. Le fumier de poule s'est révélé le plus riche en azote et en matière organique, ce qui le rend particulièrement adapté aux cultures exigeantes en azote. Le fumier de vache se distingue par sa teneur élevée en phosphore total et assimilable, ce qui permet de le considérer comme un amendement intéressant pour enrichir les sols en P. Le fumier de porc, bien que moins concentré en éléments, offre une bonne disponibilité en azote et en phosphore assimilable, optimisant ainsi son efficacité agronomique. Le fumier de chèvre contient une quantité importante de phosphore total mais peu disponible, nécessitant des conditions favorables à la minéralisation. Le fumier de lapin, globalement le moins concentré en nutriments, peut néanmoins être utilisé comme apport organique léger. Tous les fumiers étudiés présentent un rapport C/N favorable (entre 10 et 13), garantissant une minéralisation rapide. L'analyse de la cellulose brute et de la conductivité électrique a également permis d'évaluer leur potentiel amendant, leur capacité à améliorer la structure et la fertilité du sol ainsi que leur facilité de décomposition.

L'évaluation des fumiers organiques analysés met ainsi en évidence une variabilité importante de leur valeur fertilisante selon l'espèce animale. Le fumier de poule ressort comme le meilleur fertilisant grâce à sa richesse en azote et potassium et à son apport équilibré en nutriments. Le fumier de vache se distingue par sa forte teneur en phosphore assimilable, tandis que le fumier de porc constitue un bon compromis global.

Pour la fertilisation du maïs et de la tomate, le fumier de poule (F.Pou) apparaît le plus efficace, couvrant les besoins nutritifs avec des doses modérées (13–16 t/ha pour le maïs et 11–20 t/ha pour la tomate), sans nécessiter de complément. Le fumier de porc (F.Por) est également performant (23–28 t/ha pour le maïs et 25–30 t/ha pour la tomate), bien qu'un léger apport azoté soit recommandé pour cette dernière. Le fumier de vache (F.V), utilisé à des doses de 23–28 t/ha pour le maïs et 28–35 t/ha pour la tomate, nécessite un suivi attentif de l'azote afin d'éviter les excès.

En revanche, les fumiers de chèvre (F.C) et de lapin (F.L) sont moins équilibrés et doivent être complétés par des engrais minéraux. Pour le maïs, le fumier de chèvre requiert +20 kg N/ha, et le fumier de lapin +25 kg N/ha et +100 kg K_2O/ha. Pour la tomate, le fumier de chèvre demande +50 kg N/ha, tandis que le fumier de lapin exige des apports plus importants : +50 kg N/ha, +50 kg P_2O_5/ha et +150 kg K_2O/ha.

Ainsi, le fumier de poule se confirme comme le plus complet, suivi de ceux de porc et de vache, tandis que les fumiers de chèvre et de lapin nécessitent des compléments substantiels pour répondre pleinement aux besoins des cultures. Toutefois, ces derniers jouent un rôle non négligeable dans l'amélioration de la structure et de la qualité organique des sols.

Ces résultats soulignent l'importance de valoriser les fumiers disponibles localement, en tenant compte de leurs spécificités, afin d'optimiser la fertilisation des cultures et de réduire la dépendance aux engrais chimiques coûteux et polluants. L'intégration raisonnée des fumiers dans les systèmes agricoles constitue ainsi une voie durable pour restaurer la fertilité des sols burundais et renforcer la sécurité alimentaire.

Nous ne pourrions pas terminer sans toutefois emmètre quelques recommandations :

- **Aux agriculteurs :**

- Valoriser systématiquement les fumiers d'élevage en les utilisant comme engrais organiques pour améliorer la fertilité des sols, augmenter les rendements et réduire la dépendance aux engrais chimiques.
- Adapter l'usage selon le type de fumier, en privilégiant ceux qui sont les plus nutritifs et équilibrés, comme les fumiers de poule de porcs ou de vache, pour mieux répondre aux besoins des cultures.

- **Aux chercheurs :**

- Poursuivre les recherches sur la valeur agronomique des fumiers, en affinant leur composition et en évaluant leur coefficient équivalent engrais (CEE).
- Développer des méthodes permettant aux agriculteurs d'estimer facilement la qualité de fumiers à épandre dans leurs champs.
- Analyser les synergies entre fumiers et engrais minéraux afin de proposer des stratégies de fertilisation intégrée plus efficaces et économiques.
- Faire une étude d'un cas pratique dans les champs pour au moins deux saisons différentes.

- **Aux décideurs :**

- Intégrer les résultats scientifiques dans les politiques agricoles, en promouvant l'usage raisonné des fumiers comme levier de développement agricole durable.
- Restructurer la filière "déchets d'élevage" en soutenant l'élevage diversifié, la mise en place de systèmes de collecte, traitement et valorisation des fumiers, et la formation des agriculteurs à leur gestion rationnelle.
- Réduire la dépendance aux engrais importés en exploitant pleinement le potentiel des fumiers locaux et en encourageant la production des fertilisants organo-minéraux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR. (2005). *Norme NF U 44-051 – Amendements organiques : Définitions, spécifications et critères de qualité* (p. 27).

AFNOR. (2017). *NF V18-101 : Détermination de la matière sèche par séchage*. AFNOR.

Antoni, V. (2009). *Agrobiologie : Sol, plante, fertilisation* (2e édition). Éducagri Éditions.

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444-5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027

Biekre, A. H. T., Tie, B. T., & Dogbo, D. O. (2018). Caractéristiques physico-chimiques des composts à base de sous-produits de ferme de Songon en Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *12*(1), 596. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.45

Bokobana, A., Toundou, O., & Kolani, L. (2017). *Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse Cassia occidentalis L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts*. https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3551

Bouajila, K., Ben Jeddi, F., & Jedidi, N. (2016). Composition Chimique et Biochimique de Quatre Residus de Cultures et Fumier de Ferme = Chemical and Biochemical Characterization of Four Crop Residues and Farmyard Manure. *Revue des Bioressources*, *6*(1), 36-48. https://doi.org/10.12816/0045895

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (Fifteenth edition, global edition). Pearson.

Carmo, D. L. D., Lima, L. B. D., & Silva, C. A. (2016). Soil Fertility and Electrical Conductivity Affected by Organic Waste Rates and Nutrient Inputs. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *40*(0). https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150152

Chabalier, P.-F., Van de Kerchove, V., & Saint Macary, H. (avec Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement & Chambre d'agriculture). (2006). *Guide de la fertilisation organique à la Réunion*. CIRAD.

Charnay, F. (2005). *Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : Élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost* [Thèse de doctorat]. Université de Limoges.

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

CIRAD. (2003a). *Guide de la fertilisation raisonnée en cultures vivrières tropicales*. CIRAD.

CIRAD. (2003b). *La fertilité des sols tropicaux et la gestion des amendements organiques*. CIRAD.

COMIFER & Chambres d'agriculture Rhône-Alpes. (2001). *Fertiliser avec les engrais de ferme* (p. 156) [Document technique]. ITAVI.

Desvignes, J.-F., & Bodet, J.-M. (2000). *Les effluents d'élevage : Composition, valeur fertilisante, épandage* (Institut de l'Élevage (IDELE)).

Djondo, M.-Y. (1994). *Propriétés d'échange ionique des sols ferralitiques argileux de la vallée du Niari et sableux du plateau de Mbe-Bateke au congo : Application à la correction de leur acidité.* Université Paris XII-Val de Marne.

Dupont, J., & Martin, L. (2023). Mesure de la conductivité électrique des sols : Méthodologie et applications. *Journal of Soil Science.*, *45*(3), 123-135.

Eghball, B., & Power, J. F. (1999). Composted and Noncomposted Manure Application to Conventional and No-Tillage Systems : Corn Yield and Nitrogen Uptake. *Agronomy Journal*, *91*(5), 819-825. https://doi.org/10.2134/agronj1999.915819x

Elimboto, M., Jacob, L., Geofrey, G., Elly, M., Rogath, K., Sylvestre, N., Kenneth, M., Elias, N., Nazarene, N., Catherine, S., & Joel, M. (2025). The influence of FOMI fertilizers on the yield and quality of flue cured tobacco (Nicotiana tabacum L.) in Tanzania. *African Journal of Agricultural Research*, *21*(9), 699-709. https://doi.org/10.5897/AJAR2025.16977

FAO. (2000). *Fertilizers and Their Use* (4th edition).

FAO. (2003). *Organic Agriculture : Environment and Food Security* (FAO). https://www.fao.org

FAO. (2006). *Fertilizer Use by Crop* [FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin No. 17]. https://www.fao.org/3/a0257e/a0257e00.pdf

FAO. (2009). *Comment nourrir le monde en 2050*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. https://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-background-documents/issues-briefs/fr/

FAO. (2015). *Making climate-sensitive agriculture work for food security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/i4432e/i4432e.pdf

FAO. (2017). *L'état des ressources en sols dans le monde pour l'alimentation et l'agriculture : Rapport d'évaluation technique mondiale*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Francisco, A. R., Yarou, B. B., De, T. A., Touré, F., Koura, T., Azagba, J., Traoré, A., Dagno, K., & Aboubakar, S. D. (2023). *Comment réussir la fertilisation d'une culture maraîchère.* Document Technique et d'Informations (DT&I). CIRAD/WorldVeg. Dépôt légal : N° 15334 du 9 Octobre 2023, 4ème trimestre, Bibliothèque Nationale du Bénin. ISBN : 978-99982-1-518-4. 17 pages.

Frossard, E., Truong, B., & Jacquin, F. (1986). Influence de l'apport de composés organiques sur l'adsorption et la désorption des ions phosphates en sol ferrallitique. *Agronomie*, *6*(6), 503-508. https://doi.org/10.1051/agro:19860601

Geisseler, D., Smith, R., Cahn, M., & Muramoto, J. (2021). Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts : Literature survey and model fitting. *Journal of Environmental Quality*, *50*(6), 1325-1338. https://doi.org/10.1002/jeq2.20295

Gihimbare, S. (2011). Contraintes et défis de l'agriculture au Burundi : Impact sur la production agricole. *Revue scientifique agricole*, *7*(2), 45-56.

Goldberger, J.-R. (2008). Diffusion and adoption of non-certified organic agriculture : A case study from semi-arid Makueni District, Kenya. *Journal of Sustainable Agriculture*, 531-564.

Gueydon, C. (1992). Variations de la valeur fertilisante des fumiers et lisiers de bovins. Influence de la complémentation, du niveau de production et du type de déjections animales. *Fourrages*, 59-71.

Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., & Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints : A review. *Plant and Soil*, *248*(1/2), 43-59. https://doi.org/10.1023/A:1022371130939

IFDC. (2002). *Manual for the Development of Fertilizer Recommendations for Agricultural Production in Sub-Saharan Africa*.

ISABU. (2012). *État de la fertilité des sols au Burundi* [Rapport technique]. ISABU.

ISO. (1995). *ISO 11261:1995 – Soil quality—Determination of total nitrogen—Modified Kjeldahl method* [Norme].

Janssen, B. H. (1996). Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil*, *181*(1), 39-45. https://doi.org/10.1007/BF00011290

Jemali, B., Soudi, B., & Lhadi, E. K. (1996). Contrôle des paramètres du compostage et appréciation de la qualité du compost des déchets ménagers de la Wilaya de Rabat-Salé. *Actes Jnst. Agron. Veto (Maroc)*, *Vol. 16 (2)*, 43-50.

Johannesson, G. H., Lauzon, J., Crolla, A., Gilroyed, B. H., Vanderzaag, A., & Gordon, R. (2017). Impact of manure storage conditions and time on decomposition and losses from liquid dairy manure stored in a temperate climate. *Canadian Journal of Soil Science*, CJSS-2017-0083. https://doi.org/10.1139/CJSS-2017-0083

Kaboneka, S., Bizimana, S., Nijimbere, S., & Nahayo, F. (2021). *Appliqués seuls, les engrais minéraux azotés et phosphatés accélèrent la dégradation de la matière organique d'un sol acide d'altitude du Mugamba sud (Burundi)*. *31*, 08-14. http://revue.ub.edu.bi/JUB

Khalil, M. I., Hossain, M. B., & Schmidhalter, U. (2005). Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biology and Biochemistry*, *37*(8), 1507-1518. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.01.014

Laboubée, M. (2007). *Les matières organiques des sols : Rôles, diagnostic et gestion* (Éditions France Agricole). Éditions France Agricole.

Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, *304*(5677), 1623-1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396

Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, *7*(5), 5875-5895. https://doi.org/10.3390/su7055875

Levasseur, P., & Espagnol, S. (2009). *Valeur agronomique des déjections animales et modes de valorisation*. *22*(1), 3-14. https://hal.inrae.fr/hal-00889994

Lima, F. R. D. D., Silva, A. O., Amorim, H. C. S., Figueredo, E. S. S., Carneiro, R. M. C., Jara, M. S., Carneiro, M. A. C., & Guilherme, L. R. G. (2023). Agronomic and environmental aspects of organo-mineral fertilizers produced with a by-product of the intermediate process of tanning. *Frontiers in Agronomy*, *5*, 1215448. https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1215448

Lisuma, J., Muna, E., Gama, G., Kisoka, R., Maerere, E., Meliyo, J., Masuki, K., Niyongabo, E., Nsabiyumva, M., & Senkoro, C. (2025). *Deciphering the Impact of FOMI Organo-Mineral Fertilizers on pH and Organic Carbon of the Soils under Tobacco Production in Tanzania*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6622778/v1

MAAF. (2013). *Référentiel des valeurs fertilisantes des matières organiques*. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (France). https://agreste.agriculture.gouv.fr

MAAF. (2014). *Guide de gestion des effluents d'élevage – Pour une fertilisation raisonnée et durable* (p. 123). Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

Mabagala, F. S., & Mng'ong'o, M. E. (2022). On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *29*(5), 3635-3641. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056

Maltas, A., Oberholzer, H., Charles, R., & Bovet, V. (2012). Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse 3 (3)*, 148-155.

Marumo, J. L., LaPierre, P. A., & Van Amburgh, M. E. (2024). Urinary and fecal potassium excretion prediction in dairy cattle : A meta-analytic approach. *JDS Communications*, *5*(4), 272-277. https://doi.org/10.3168/jdsc.2023-0440

MINEAGRIE. (2018). *Stratégie Agricole Nationale (SAN) 2018–2027 : Alignement sur le Plan National de Développement 2018–2027 pour une agriculture durable et respectueuse de l'environnement* [Politique nationale / stratégie]. FAO-FAOLEX. https://faolex.fao.org/docs/pdf/Bur190783.pdf

Morris, M., Kelly, V. A., Kopicki, R. J., & Byerlee, D. (2007). *Fertilizer Use in African Agriculture : Lessons Learned and Good Practice Guidelines*. The World Bank. https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6880-0

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, *27*, 31-36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5

Mustin, M. (1987). *Le Compost : Gestion de la matière organique*. F. Dubusc.

Nahm, K. H. (2003). Evaluation of the nitrogen content in poultry manure. *World's Poultry Science Journal*, *59*(1), 77-88. https://doi.org/10.1079/WPS20030004

Penn, C., & Camberato, J. (2019). A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture*, *9*(6), 120. https://doi.org/10.3390/agriculture9060120

Pescod, M. B. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Petit, J., & Jobin, P. (2005). *La fertilisation organique des cultures : Les bases*. Fédération d'agriculture biologique du Québec.

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change : Processes and potential. *Global Change Biology*, *6*(3), 317-327. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x

Rafolisy, T., Thuriès, L., Técher, P., Moussard, G., & Paillat, 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. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*

Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd. entièrement mise à jour). Dunod.

Sakrabani, R. (2024). Opportunities and challenges organo-mineral fertiliser can play in enabling food security. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1296351. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1296351

Schröder, J. J., Uenk, D., & Hilhorst, G. J. (2007). Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil*, *299*(1-2), 83-99. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9365-7

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter : Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, *241*(2), 155-176. https://doi.org/10.1023/A:1016125726789

Soltner, D. (1996). *Les bases de la production végétale – Tome 1 : Le sol et son amélioration*. Éditions Sciences et Techniques Agricoles.

Soltner, D. (2001). *Les bases de la production végétale – Tome 1 : Le sol et son amélioration* (20e édition). Éditions Sciences et Techniques Agricoles.

Somda, Z. C., Guissou, T., & Sedogo, M. P. (2011). Valeur fertilisante de différents fumiers animaux et leur effet sur le rendement du maïs. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *5*(2), 563-571.

Tang, Y., Wang, X.-Z., Zhao, H.-T., & Feng, K. (2008). Effect of Potassium and C/N Ratios on Conversion of NH+4 in Soils. *Pedosphere*, *18*(4), 539-544. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60045-4

Trinchera, A., Allegra, M., Rea, E., Roccuzzo, G., Rinaldi, S., Sequi, P., & Intrigliolo, F. (2011). Organo-mineral fertilisers from glass-matrix and organic biomasses : A new way to release nutrients. A novel approach to fertilisation based on plant demand. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *91*(13), 2386-2393. https://doi.org/10.1002/jsfa.4472

Van Soest, J. P. (1963). *Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin*. *46*(5), 829-835.

Zbytniewski, R., & Buszewski, B. (2005). Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1 : Chemical and spectroscopic properties. *Bioresource Technology*, *96*(4), 471-478. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.018

Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, *171*(9), 656-669. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008

Zurak, D., Kljak, K., & Aladrović, J. (2023). Metabolism and utilisation of non-protein nitrogen compounds in ruminants : A review. *Journal of Central European Agriculture*, *24*(1), 1-14. https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3645