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

Effets de l’application de la dolomie et des amendements organiques sur les propriétés physicochimiques d’un sol fortement acide du Burundi

Ntiyantetereje, Joël; Sous la direction de : Prof. Séverin Nijimbere

2024
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1661

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT

EFFETS DE L'APPLICATION DE LA DOLOMIE ET DES AMENDEMENTS ORGANIQUES SUR LES PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES D'UN SOL FORTEMENT ACIDE DU BURUNDI.

Par :

NTIYANTETEREJE Joël

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement.

Option : Génie de l'Environnement.

Sous la direction de :

Prof. Séverin NIJIMBERE

Bujumbura, Octobre 2024

Effets de l'application de la dolomie et des amendements organiques sur les propriétés physicochimiques d'un sol fortement acide du Burundi

IDENTIFICATION DES MEMBRES DE JURY

Prof. André NDUWIMANA (Président)

Prof. Salvator KABONEKA (Secrétaire)

Prof. Chantal KWIZERA (Membre)

Prof. Séverin NIJIMBERE (Directeur)

DEDICACES

A mes chers parents ;

A mes frères et sœurs;

A mes chers camarades ;

A tous mes enseignants.

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Séverin NIJIMBERE, Doyen de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie de l'Université Burundi et Directeur de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils et remarques avisés qui ont permis de mener à bien ce projet, surtout pour sa passion communicative dès la conception de ce travail jusqu'à sa fin.

Mes vifs remerciements s'adressent au Prof. KABONEKA Salvator pour son investissement, son suivi continu du projet et ses nombreux conseils qui m'ont permis d'améliorer ce travail.

Je remercie Prof. André NDUWIMANA et Prof. Chantal KWIZERA, pour avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire et consacré leur temps à son examen.

Ma gratitude s'adresse au Centre International pour la Fertilité des Sols (IFDC) à travers son projet PAGRIS qui a bien voulu financer la FABI pour l'exécution du projet de recherche *« Récupération agroécologique des sols fortement acides et appauvris en éléments nutritifs de la région d'altitude du Burundi pour accroitre la production agricole (RASAB) »* à travers lequel ce travail a été réalisé.

Mes sentiments de connaissance vont aussi à l'endroit des professeurs de l'Université du Burundi en général et à ceux qui dispensent des cours en Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement en particulier.

J'adresse également mes remerciements à mes parents pour leur soutien et leur patience durant mon enfance.

J'exprime également mes gratitudes à toute l'équipe de recherche du projet RASAB pour sa collaboration et conseil de tous le temps.

Je remercie Mr MAHANGAYIKO Emmanuel, et Mme NDORICIMPA Révocât pour leur soutien et leurs conseils.

Enfin, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui, de près et de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et dont les noms et personnalités n'ont pas été mentionnés dans ce travail. Je leur exprime ma reconnaissance.

NTIYANTETEREJE Joël

RESUME

En vue d'évaluer les effets interactifs des amendements organiques et de l'application de la dolomie sur les propriétés d'un sol fortement acide au Burundi, un essai expérimental de culture du haricot basé sur la combinaison de trois doses de dolomie (0 t/ha, 2 t/ha et 4 t/ha) et de quatre types de fumures organiques (fumiers de vache et de chèvre, composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*) a été mené sur un ferralsol de pH initial de 4,2 avec un protocole en blocs aléatoires complets (trois blocs) avec trois répétitions. Les parcelles ont été toutes emblavées avec du haricot et le mode de fertilisation minérale était le même partout. Après la récolte du haricot, des analyses des sols ont été réalisées. Les résultats trouvés ont montré que la dose de 4 t/ha, calculée avec la formule établie par Yamoah et ses coauteurs en 1990 a permis de remonter le pH du sol au niveau supérieur à 5, de neutraliser l'aluminium échangeable et d'augmenter le taux de saturation en bases aux valeurs supérieures à 80%. Par ailleurs, les combinaisons de la dose de 2 t/ha de dolomie avec le fumier de chèvre ou avec le compost de *Tithonia diversifolia* ont montré un effet chaulant considérable en remontant significativement le pH du sol aux valeurs ≥5 et en neutralisant complètement l'aluminium échangeable au même titre que les traitements réalisés avec la dose de 4 t/ha de dolomie.

Somme toute, l'application de la formule de Yamoah et ses coauteurs pour corriger l'extrême acidité des sols ferralitiques du Burundi est une meilleure piste. De même, le fumier de chèvre et le compost de *Tithonia diversifolia* sont des excellentes matières organiques qui peuvent servir à la correction de l'acidité et de la toxicité aluminique des ferralsols fortement acides.

Mots clés : Acidité du sol, Compost, Dolomie, Fumier, Propriétés du sol

ABSTRACT

In order to evaluate the interactive effects of organic amendments and the application of dolomite on the properties of a strongly acidic soil in Burundi, a test based on the combination of three doses of dolomite (0 t/ha, 2 t /ha and 4 t/ha) and four types of organic fertilizers (cow and goat manure, composts of Tithonia diversifolia and Lantana camara) was carried out on a ferralsol of initial pH of 4.2 with a complete random block protocol (three blocks) with three replications. The plots were all sown with beans and the mineral fertilization method was the same everywhere. After harvest, soil analyzes were carried out. The results found showed that the dose of 4 t/ha, calculated with the formula established by Yamoah and co-authors in 1990 raised the soil pH to values above 5, neutralized the exchangeable aluminum, and increased the percent base saturation to values greater than 80%. Furthermore, the combination of 2 t/ha of dolomite and goat manure or compost of Tithonia diversifolia showed a significant liming effect by raising the soil pH values above 5 and by neutralizing completely the exchangeable aluminum in the same way as the treatments carried out with a dose of 4 t/ha of dolomite.

All in all, the application of the Yamoah and co-authors formula to correct the extreme acidity of the ferralitic soils of Burundi is a better path. Likewise, goat manure and Tithonia diversifolia compost are excellent organic materials that can be used to combat the acidity and aluminum toxicity of highly acidic ferralsols.

Keywords: Soil acidity, Compost, Dolomite, Manure, Soil properties

TABLE DES MATIERES

IDENTIFICATION DES MEMBRES DE JURY i

DEDICACES ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

SIGLES ET ABREVIATIONS ix

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES TABLEAUX xi

AVANT PROPOS xii

0. INTRODUCTION 1

0.1 Contexte et problématique 1

0.2 Objectifs 3

0.3 Subdivision du travail 3

CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE SOL 4

I.1 Définition et description 4

I.2 Les constituants du sol 4

I.2.1 Phase solide 5

I.2.2 Phase liquide 5

I.2.3 Phase gazeuse 6

I.3 Les propriétés du sol 7

I.3.1 Propriétés physiques 7

I.3.2 Les propriétés chimiques 11

I.3.3 Les propriétés biologiques du sol 14

I.4 Disponibilité des éléments nutritifs dans le sol avec pH 16

I.5 Eléments essentiels 18

I.6 Qualités et caractéristiques d'un bon sol agricole 18
I.6.1 Qualités d'un bon sol agricole 18
I.6.2 Les caractéristiques d'un bon sol 19
CHAPITRE II: GESTION DES SOLS ACIDES AU BURUNDI 21
II.1 Dégradation du sol 21
II.2 Conséquences de l'acidité sur le sol 23
II.3 La gestion des sols acides 24
II.4 Rôle de la matière organique et de la dolomie dans le sol 25
II.4.1 Rôle de la matière organique 25
II.4.2 Rôle de la dolomie dans la vie du sol 28
II.5 Contribution du *Tithonia diversifolia et Lantana camara* dans la gestion des sols acides 29
II.5.1 *Tithonia diversifolia* 29
II.5.2 *Lantana camara* 30
CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES 32
III.1 Présentation de la zone d'étude. 32
III.2 Situation géographique de la zone d'étude 32
III.3 Matériels utilisés 33
III.3.1 Matériels végétaux 33
III.3.2 Autres matériels 33
III.4 Méthodologie 33
III.4.1 Démarche méthodologique et expérimentale 33
III.4.2 Semis, travaux d'entretien et récolte du haricot 36
III.4.3 Echantillonnage de sols et prétraitement des échantillons de sol 36
III.4.4 Méthodes d'analyse des sols utilisées au laboratoire 37
III.4.5 Traitement statistique 38
CHAPITRE IV: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 39

IV.1 Présentation et interprétation des résultats 39

IV.1.1 Propriétés des fumiers et composts utilisés dans l'expérimentation 39

IV.1.2 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le pH du sol 39

IV.1.3 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le carbone organique et sur l'azote total du sol 40

IV.1.4 Effet de la matière organique et de la dolomie sur les teneurs en cations échangeables et la capacité d'échange cationique 41

IV.1.5 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le taux de saturation en bases 43

IV.2 Discussion des résultats 44

IV.2.1 Caractéristiques des fumiers et composts utilisés dans l'expérimentation 44

IV.2.2 Le pH du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie 44

IV.2.3 Le carbone organique du sol et l'azote total du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie 45

IV.2.4 Les teneurs en cations échangeables et la capacité d'échange cationique du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie 45

IV.2.5 L'évolution de taux de saturation en base sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie 46

CONCLUSION 47

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 48

ANNEXES 56

SIGLES ET ABREVIATIONS

µm : Micromètre

ANOVA **:** Analyse de la variance

CE : Conductivité électrique

CEC **:** Capacité d'échange cationique

CECE : Capacité d'échange cationique effective

CR : Capacité de Rétention de l'eau

ELD : Economics of land Degradation

FABI : Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie

FOMI : Fertilisant Organo-Mineraux Industries

IFDC : International Fertilizer Developpment Center

ISABU **:** Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

LASPA : Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaire

M.O : Matière Organique

MEEATU : Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme

PAGRIS : Projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée des Sols

PNSEB : Plan National de Subvention des Engrais au Burundi

RASAB **:** Récupération Agro-Ecologique des Sols fortement acides et appauvris en éléments nutritifs de la région d'altitude du Burundi pour accroitre la production agricole

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

USDA : United States Department of Agriculture

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Triangle textural USDA 8
Figure 2*:* Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH du sol 17
Figure 3: Principaux types de dégradation des sols 22
Figure 4: Acidité/Toxicité Al et croissance racinaire et formation des poils absorbants 23
Figure 5: Valeurs de pH des sols du Burundi. 25
Figure 6: Feuillages de *Tithonia diversifolia* 30
Figure 7: Feuillages de *Lantana camara* 31
Figure 8: Localisation du site expérimental 32
Figure 9: Dispositif expérimental utilisé 34
Figure 10: Effet de la matière organique et de la dolomie sur le pH eau du sol 40
Figure 11:Effet de matière organique et de la dolomie sur le taux de saturation en bases 43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principaux constituants du sol 6
Tableau 2: Eléments essentiels à la croissance des plantes 18
Tableau 3: Liste des qualités des sols et leurs indicateurs 20
Tableau 4: Méthodes d'analyse des sols utilisées au laboratoire 37
Tableau 5: Caractéristiques chimiques des fumures organiques utilisés dans l'essai 39
Tableau 6:Teneur en carbone organique et en azote total (%) des échantillons de sols des parcelles élémentaires 41
Tableau 7:Teneurs en cation échangeables et capacité d'échange cationique des échantillons de sols des parcelles expérimentales (meq/100 g) 42

AVANT PROPOS

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux de fin d'études de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, option Génie de l'Environnement. Elle porte sur l'évaluation des effets de l'application de la dolomie et des amendements organiques sur les propriétés physicochimiques d'un sol fortement acide au Burundi.

La majorité des sols Burundais sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), très saturés en aluminium et pauvres en éléments nutritifs, ce qui est un problème majeur sur la production agricole.

Cette étude contribue à l'identification d'une part du type de fumure organique qui permet d'améliorer les propriétés du sol, et la meilleure dose de la dolomie à appliquer pour la correction des sols acides d'autre part. Elle va aussi apporter des connaissances sur la meilleure combinaison de la fumure organique et la dolomie pour l'amélioration de la production agricole et les propriétés du sol du Burundi.

0. INTRODUCTION

0.1 Contexte et problématique

Le Burundi couvre une superficie de 27.834 km² dont 25.200 km² de terres émergées. Ce pays s'étend entre les méridiens 29°00' et 30°54' Est et les parallèles 2°20' et 4°28' Sud. Il est bordé au Nord par le Rwanda, à l'Est et au Sud par la Tanzanie et à l'Ouest par la République Démocratique du Congo (MEEATU, 2011). Le Burundi, pays de collines abruptes au bord de la Rift Vallée d'Afrique orientale (altitude 800 à 2600 mètres) connait de nombreux problèmes de dégradation des sols (sols ferralitiques pauvres et acides, d'érosion en nappe, de glissements de terrains et d'inondations) (Huber & Schaub, 2011).

La plupart des sols du Burundi sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), très saturés en aluminium et pauvres en éléments nutritifs. Selon une étude faite par ISABU (2021) sous financement de l'IFDC, 73 % des sols du Burundi sont acides. L'extrême acidité se manifeste surtout sur la crête Congo-Nil et dans les Plateaux centraux. L'acidité des sols est un problème généralisé sur le territoire du Burundi sauf dans la plaine de l'Imbo et dans les dépressions du Nord. De même, une très grande partie du territoire burundais est caractérisée par des teneurs respectivement faible et moyenne pour le carbone organique (CO) et l'Azote (N), une faible teneur en phosphore (P),en potassium (K), en calcium (Ca) et en magnésium (Mg) (ISABU, 2021)

Selon Kaboneka et al. (2020), la forte acidité des sols burundais se traduit par une faible saturation en bases échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} et Na^{+}) qui sont en grande partie lixiviés pour laisser place aux cations acides (Al^{3+} et H^{+}) sur le complexe d'échange.

Plus spécifiquement, les sols burundais sont globalement des ferralsols ou ferrisols en altitude (Mumirwa, Mugamba). On rencontre également, sur les pentes et les crêtes, des lithosols qui sont des sols bruns tropicaux peu évolués. Dans les fonds des vallées marécageuses (Kumoso et bassin du Nil surtout) on y trouve des sols organiques tourbeux, tandis que la plaine de la Rusizi se distingue par des sols noirs tropicaux (régogleys et regogleys salins, vertisols) (MEEATU, 2011).

Les principaux sols du Burundi, selon l'Atlas des sols de l'Afrique, sont les Acrisols, les Ferralsols et les Nitisols (Nijimbere et al., 2021). Ces groupes de sols sont, du point de vue physico-chimique et minéralogique, caractérisés par la dominance des argiles de type 1/1 (constituées essentiellement de la kaolinite) et les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium dans la fraction fine de diamètre < 2 µm. Ces constituants minéraux du sol possèdent une faible Capacité d'Echange Cationique (CEC) aux pH habituels des sols (Uehara & Gillman, 1981).

La présence de l'acidité du sol est d'autant plus grave qu'elle induit une série de contraintes à la croissance des plantes et qu'elle affecte les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Elle a entre autres conséquences de l'indisponibilité des éléments nutritifs (le pH optimal pour la plupart des cultures est de 5,5 à 7), de la toxicité des métaux et leur solubilité, par exemple toxicité de l'Al^{3+} à un pH < 5,5 (également solubilité et toxicité du Mn), de l'inhibition de l'activité microbienne (particulièrement importante dans le cycle de l'azote) et par voie de conséquence la faible croissance et production des plantes, aussi bien en terme quantitatif que qualitatif.

Les principales causes de la dégradation des sols sont anthropiques et naturelles. Dans certains cas, les parcelles de culture ne connaissent pas de repos, car les mêmes champs portent chaque année deux récoltes successive (Bidou, 1990).

Egalement des phénomènes naturels (la battance et l'érosion diffuse) due à la forte pluie contribuent à la dégradation des sols car ce dernier rend à un sol l'instabilité de structure. La forte pluie provoque l'éclatement des agrégats du sol ainsi, les particules détachées des agrégats et viennent colmater les interstices de la structure et forment une croûte superficielle (Le Villio et al., 2001).

Suite à cette dégradation des sols qui rend les sols infertiles et que la réduction de la production agricole se remarque à tous les niveaux, des solutions pour la correction de l'acidité des sols visant l'application de la chaux dolomitique et des fumiers sont recommandées par les services de vulgarisation en indiquant les quantités à appliquer pour tous les sols du pays. Egalement, l'utilisation des amendements (accessibles et de faibles apports d'intrants externes) et l'intégration des cultures améliorantes, l'application des amendements efficaces pour renforcer la structure et améliorer le pH (Hicintuka & Masilya, 2013). Ceci fait sous-entendre des interventions vigoureuses pour rétablir la macroporosité (travail du sol), l'apport de la matière organique, la biomasse fermentée nécessaire pour la vivifier (fumier ou compost),

La matière organique joue un rôle important dans le fonctionnement global du sol au travers de ses composantes physiques, biologiques et chimiques, qui ont des problèmes majeures pour la fertilité des sols (Huber & Schaub, 2011).

Selon Kaboneka et al.(2020), il nécessaire de faire la combinaison de la chaux dolomitique et des fumiers organique tout en indiquant les quantités à appliquer pour tous les sols du pays en tenant compte du degré d'acidité. Un certain nombre de travaux ont montré que les amendements calco-magnésiens améliorent la productivité des sols acides et neutralisent la toxicité aluminique (Angui et al., 2010).

C'est dans cette optique qu'un travail de recherche intitulée *« Effet de l'application de la dolomie et des amendements organiques sur les propriétés physicochimiques des sols fortement acides au Burundi.* » Cette étude a été menée sur le terrain de la ferme didactique de la FABI à Zege en province de Gitega, un bon exemple de sols fortement altérés et dégradés par acidification.

Dans notre champ expérimental, nous avons utilisé de fumures organiques, constitués de fumier de vache, de fumier de chèvre, de compost de *Tithonia diversifolia*, compost de *Lantana camara*, avec de la chaux dolomitique dont les doses respectives, 0 t/ha, 2 t/ha, 4 t/ha.

0.2 Objectifs

Notre travail de recherche s'articule sur l'objectif général d'identifier la méthode efficace de correction de l'extrême acidité des sols d'altitude du Burundi,

Les objectifs spécifiques sont :

- Identifier le type de fumure organique qui permet d'améliorer les propriétés du sol,
- Déterminer la dose optimale de chaux dolomitique à recommander à court terme pour la correction de l'extrême acidité observée dans les sols d'altitude du Burundi ;
- Déterminer la meilleure combinaison type de matière organique et dose de dolomie qui permet d'améliorer les propriétés du sol à court terme.

A la fin de cette étude, nous espérons que nous aurons mis au point une méthode efficace de correction de l'extrême acidité d'un sol d'altitude du Burundi.

0.3 Subdivision du travail

L'étude s'articule sur trois parties principales qui sont précédées par une introduction. La première partie comporte une synthèse bibliographique sur le sol et la gestion des sols acides. La deuxième partie qui correspond à la partie expérimentale parle des matériels et méthodes utilisés, la troisième partie comprend les résultats et discussion. Ce travail se termine par une conclusion générale et quelques suggestions pour orienter les éventuels travaux des futurs chercheurs.

CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTERATURE SUR LE SOL

I.1 Définition et description

Le sol est un des compartiments essentiels de l'écosystème, agissant comme contrôleur et révélateur de nombreux processus écologiques par ses caractères physicochimiques et biologiques à court et à long terme (Gobat et al., 2010).

Le sol est la peau vivante des continents, l'épiderme de la Terre. Il s'agit d'une fine couche, généralement meuble, située à l'interface de la lithosphère et de l'atmosphère. Le sol est le support de la vie végétale et animale, ainsi que des activités humaines. Mais il n'est pas que cela, il s'agit aussi d'une entité vivante à part entière. Un sol naît, se développe, meurt et disparaît si les conditions de son maintien ne sont pas réunies. Le sol est complexe et extrêmement peuplé, la densité de vie y est souvent considérable (Coudurier & Bourgogne, 2012).

La formation des sols présente un processus complexe consistant la transformation des roches-mères par l'effet conjugué des facteurs climatiques et des facteurs biotiques. L'altération de ces derniers commence par un phénomène de désagrégation physique provoqué par l'action des facteurs climatiques, auquel s'ajoute ultérieurement la fracturation du substratum rocheux par les racines des végétaux (Manneville, 1999).

Un processus de décomposition chimique lui fait suite, induit par lessivage qu'effectuent les eaux d'infiltration chargées de substances dissoutes conduites à l'élaboration d'un mélange intime des matières minérales et organiques. C'est pour cela que le sol est considéré comme un réacteur biogéochimique interactif et un constituant multiphasiques.

Le sol est la couche supérieure de la croute terrestre de structure meuble et d'épaisseur variable, plus ou moins colorée par l'humus ; résultant de la transformation lente et progressive de la roche-mère sous-jacente, sous l'influence de facteurs physique, chimique et biologique (Dounya & Asma, 2021).

I.2 Les constituants du sol

Le sol est un système triphasé composé de solides, de liquides et de gaz qui interagissent étroitement les uns avec les autres. Les sols sont des milieux poreux, constitués de trois phases dont les proportions varient en fonction de divers facteurs, notamment l'état hydrique du sol et les contraintes mécaniques qu'il subit (Calvet, 2003). Ces phases sont les suivantes :

- Phase solide,
- Phase liquide,

- Phase gazeuse

Ces phases interagissent de manière complexe, influençant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Les pourcentages ne sont, au mieux, que des généralisations. En réalité, le sol est très complexe et dynamique.

I.2.1 Phase solide

La phase solide est constituée par les matières minérales et les matières organiques.

❖ Matière minérale :

La taille et la composition de la matière minérale dans les sols varient en raison de la nature des travaux parentaux dont elle est issue. Il est généralement composé de fragments de roche brisés très fins et de minéraux dominés par des constituants inorganiques par des minéraux (Yves, 2016).

❖ Matière organique du sol:

Il existe sous forme de végétaux et d'animaux partiellement décomposés et partiellement synthétisés. Résidus, il est décomposé en raison de l'activité microbienne du sol (Duchaufour & Jocquin, 1966).

I.2.2 Phase liquide

Eau du sol: Elle joue un rôle essentiel dans les relations de croissance des plantes. Toute l'eau du sol retenue par les attractions n'est pas disponible pour les plantes. L'eau du sol est également présente avec les sels dissous et constitue la solution du sol. Cette solution constitue un milieu important pour l'approvisionnement en différents éléments nutritifs essentiels (Chammari et al., 2003).

Bien que la solution du sol soit constituée des molécules d'eau, elle contient également diverses substances dissoutes. Leur concentration et leur nature découlent en partie d'apports externes, mais surtout d'échanges internes avec la matrice solide du sol (Musy & Soutter, 1991).

La présence de l'eau dans le sol est une valeur fondamentale pour des multiples raisons à savoir :

- L'eau constitue l'unique solvant dans le sol et elle est l'unique transporteur des substances divers. Seul le mouvement de l'eau qui cause la translocation des substances tant dissoutes qu'en suspension.

- L'eau est un élément essentiel pour la fertilité de sol, car sa présence rend possible des réactions chimiques entre divers constituants du sol, et la naissance des néoformations des molécules soit minérale, soit organique (Dounya & Asma, 2021).

I.2.3 Phase gazeuse

Air du sol: L'espace aérien dans un sol est constitué de la partie du volume du sol non occupé par les solides du sol, qu'ils soient minéraux ou organiques. Sur le terrain, les espaces poreux sont occupés par l'air et l'eau (Chammari et al., 2003). Le Tableau 1 montre les principaux constituants du sol.

Tableau 1 Principaux constituants du sol (Yves, 2016)

Constituants solides		**Constituants liquides**	**Constituants gazeux**
Constituants minéraux	Constituants organiques	Solution du sol	Air du sol
Terre fine du sol : Argiles, Limons fins, Limons grossiers, Sables fins, Sables gossiers.	M.O Fraiche : • Constituants des tissus végétaux : cellulose, hémicellulose, lignines, protéines… • Déjections animales et animaux morts.	Eau du sol Eléments solubles dissous : • Substances organiques (acides organiques, sucres, …) • Ion dans la solution du sol : Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, $^{-}$, PO_4^{3-},…	• Constituants de l'air : O_2, N_2, CO_2 • Gaz issus de l'activité des animaux du sol et des processus de décomposition : CO_2, H_2, CH_4, …
Eléments grossiers : Graviers, Cailloux, Pierres, Blocs	**Matières humiques :** M.O transformées		

I.3 Les propriétés du sol

I.3.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol forment un ensemble complexe et interactif, étroitement lié au degré d'agrégation des particules ainsi qu'au volume et à la distribution des pores de tailles variées. L'agrégation des particules et la configuration des pores déterminent des caractéristiques essentielles telles que la structure, la consistance, la densité et la porosité. Ces propriétés influencent directement la capacité du sol à retenir l'eau, sa perméabilité, son drainage (aération) et sa résistance à l'érosion (CTA, 1995).

Une structure du sol bien développée, outre qu'elle facilite le labour, fournit des conditions favorables au développement des fines racines nourricières et des mycorhizes, augmentant ainsi l'efficacité de l'absorption des éléments nutritifs. Pour développer des propriétés physiques favorables, il est essentiel de promouvoir la formation d'agrégats stables entre les particules du sol. Il faut également garantir un équilibre entre les pores fins (< 50 µm), qui retiennent l'humidité contre l'action de la gravité et les pores plus gros, qui assurent le drainage de l'excès d'eau et permettent l'apport d'oxygène aux racines (CTA, 1995).

Les propriétés physiques sont entre autres, la profondeur et le niveau de développement du sol, la couleur, la texture, la structure, la consistance, le régime hydrique, la perméabilité à l'eau, la densité apparente, la porosité (Lindbo et al., 2012).

Les propriétés physiques du sol jouent un rôle déterminant dans l'agriculture. Elles influencent la gestion de l'eau, la disponibilité des nutriments et la croissance des cultures. Par ailleurs, les propriétés physico-chimiques du sol évoluent en fonction des pratiques de gestion des terres, notamment celles liées à l'agriculture (Tale & Ingole, 2015).

Les propriétés physiques du sol, plus importantes pour une culture, s'appréhendent à l'aide de deux notions fondamentales décrivant la phase solide : sa texture et sa structure.

Ces propriétés influencent directement la capacité du sol à répondre aux exigences des cultures et à maintenir un équilibre hydrique et nutritif adéquat.

- **La texture du sol**

Le terme texture du sol fait référence à la gamme de tailles des particules dans le sol, c'est-à-dire si les particules qui composent un sol particulier sont principalement grandes, petites ou d'une taille ou d'une gamme de tailles intermédiaire. En tant que tel, le terme comporte des connotations à la fois qualitatives et quantitatives. Qualitativement, il représente la « sensation » du matériau du sol, qu'il soit grossier et graveleux ou fin et lisse (Khudhair, 2019).

Dans un sens plus rigoureusement quantitatif, le terme texture du sol désigne la distribution mesurée des tailles de particules ou les proportions des différentes gammes de tailles de particules présentes dans un sol donné. La texture du sol est une caractéristique permanente et naturelle, fréquemment utilisée pour décrire la composition physique d'un sol. Traditionnellement, la gamme de tailles des particules est divisée en trois catégories, appelées fractions texturales : le sable, le limon et l'argile (Khudhair, 2019).

La texture du sol est définie par la proportion des diverses tailles des éléments -grossiers (sables), fins (limons) et très fins (argiles)- constituant la phase solide (Tableau 1). Ces éléments définissent ainsi sa composition granulométrique.

La texture d'un sol est déterminée par la granulométrie des éléments de sa phase solide. En sol donné, le seuil de 2 mm sert à séparer les cailloux et graviers, d'un diamètre supérieur, de la terre fine, d'un diamètre inférieur. La terre fine trouvée comporte à son tour trois classes texturales : les sables (entre 0,05 et 2 mm), les limons (entre 0,002 mm et 0,05 mm), et les argiles, ces dernières constituant la fraction la plus fine du sol (taille inférieure à 0,002 mm soit 2 μm).

La texture régule directement la structure du sol et donc la porosité et le régime hydrique. En particulier le rapport de l'argile affecte la formation de complexe argilo-humique, la capacité d'échange, la fertilité et la profondeur d'enracinement. La texture est une propriété stable qui ne change qu'avec l'évolution à long terme du sol, ce qui est un bon indicateur.

La Figure 1 facilite l'interprétation des résultats de l'analyse texturale d'un sol.

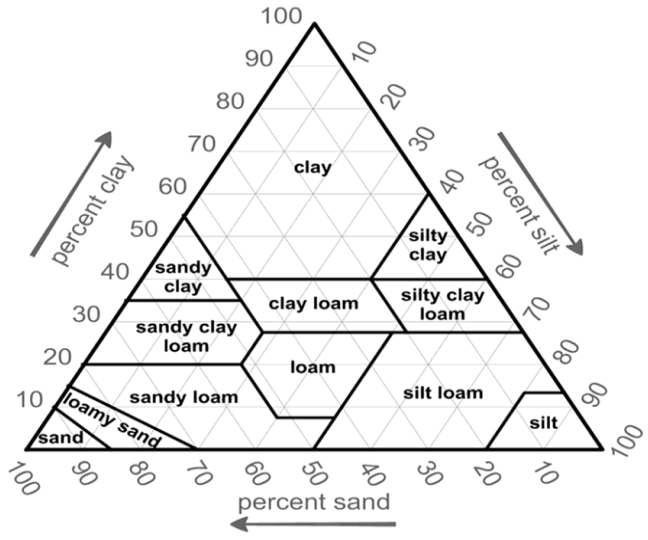


Figure 1 : Triangle textural USDA

❖ La Structure du sol

La structure du sol est sa constitution physique exprimée par l'arrangement spatial des particules solides ou la façon dont les particules du sol sont agencés et des vides qui leur-sont associés (Fary, 1996). Elle s'observe et se décrit à deux niveaux à savoir: la structure proprement dite, à l'échelle microscopique et microstructure ou micromorphologie.

La structure détermine la répartition dans l'espace de la matière solide et des vides.

On distingue trois types de structure de sol en pédologie :

- La structure particulaire (ou à particules isolées), dans laquelle les particules solides sont totalement séparées les unes des autres;
- La structure massive, dans laquelle les particules sont liées en blocs massifs et de dimensions importantes;
- La structure en agrégats dans laquelle les particules (argile, limon, sables) du sol sont organisées en agrégats. Ceux-ci sont assemblés de manière plus ou moins serrée et en plusieurs niveaux d'organisation.

La structure du sol détermine des propriétés importantes comme la perméabilité, la porosité et la capacité à créer un environnement favorable au développement des plantes.

➢ Les facteurs défavorables à la structuration:

- Le tassement et la compaction par passage des engins lourds,
- Les actions mécaniques des pluies battantes
- L'altération des ciments colloïdaux.

❖ La couleur du sol

La couleur du sol est une caractéristique facilement observable qui reflète des propriétés difficiles à mesurer. Elle constitue un outil de diagnostic essentiel dans l'analyse des sols (Brunelle, 2005).

La détermination de la couleur est une méthode accessible et utile aux agriculteurs pour identifier la fertilité des sols (Koné et al., 2009). Elle indique notamment la présence et la disponibilité de la matière organique, et facilite la distinction entre les différents horizons du sol.

La couleur rougeâtre est associée à des oxydes de fer peu ou pas hydrates (bon drainage), les couleurs jaunes (avec moins d'aération du sol) dues aux oxydes de fer hydratés.

Dans les horizons de surface, la matière organique est la cause principale de la couleur foncée et masque l'expression des autres agents colorants, dans les horizons de profondeur, le fer (Fe) est le principal agent colorant (couleur brun orange claire).

Les sols submergés en permanence présentent généralement une couleur très grise.

Les couleurs peuvent servir à:

- Reconnaitre directement la présence, l'abondance relative, les déplacements ou l'accumulation de matières organiques, le calcaire, le fer, le manganèse et l'argile,
- Observer l'état oxydé ou réduit du fer ou bien déceler certains minéraux hérités particuliers (glauconie, orthose rose, etc.);
- Visualiser la dynamique de l'eau à travers celle du fer et du manganèse.

❖ La porosité

La porosité du sol est une caractéristique importante contrôlant les propriétés hydrodynamiques du sol et le développement racinaire des plantes, mais aussi un indicateur physique de la qualité du sol influencé par les différentes techniques culturales (Lahlou et al., 2005).

Selon Duchaufour, (2004), Elle correspond au volume des vides dans le sol, exprimé en pourcentage du volume total, et se divise en deux composantes principales :

- Capacité en air : Relève de la fraction de pores permettant la circulation de l'air,
- Capacité en eau : Concerne les pores capables de retenir l'eau.

La porosité du sol joue un rôle majeur dans les échanges hydriques et gazeux, ainsi que dans le développement des racines. Elle est souvent sujette à des modifications variables lorsque les sols sont compactés. La compaction affecte la qualité physique du sol, elle réduit la porosité, ce qui entraîne une mauvaise aération du sol, un mauvais drainage et augmente la résistance à la pénétration des racines (Ouattara et al., 1998).

L'espace poral du sol est constitué d'un réseau de pores dont les rôles et les dynamiques varient selon la morphologie des pores (nature, taille, et forme) et les interactions avec les processus du sol, comme l'ascension capillaire ou les galeries racinaires.

Pour mieux comprendre ces rôles, les pores sont classés en plusieurs catégories basées sur leurs dimensions et leurs fonctions, par exemple : les pores macropores, qui favorisent le drainage rapide et la circulation de l'air et les micropores, qui assurent le stockage de l'eau (Derdour et al., 1993).

La porosité joue également un rôle clé dans le stockage et la gestion de l'eau, ainsi que dans la dynamique des échanges sol-plante-atmosphère. Une gestion appropriée de la porosité est essentielle pour maintenir la qualité et la fertilité du sol.

I.3.2 Les propriétés chimiques

❖ pH

Le pH est défini comme l'inverse du logarithme de l'activité en ion H^+:

$pH = \log.1/H^+ = -\log. H^+$ (Wencel et al., 2014).

Le pH (ou potentiel hydrogène) du sol est indication du niveau d'acidité ou de basicité d'un sol. Il varie entre 0 et 14 sur une échelle logarithmique (FOLUR, 2023).

Il permet d'approfondir les modalités d'interaction entre les ions et les surfaces absorbantes du sol (Mohamed, 2021).

Le pH est une mesure de l'acidité d'un sol. Il dépend de la concentration en proton (H_3O^+) dans la solution du sol: plus il y a des protons dans le sol plus il est acide, et inversement. En théorie une mesure de pH peut varier de 0 à 14 sur une échelle logarithmique: un pH de 7 est dit neutre, en dessous, le sol est acide et en haut basique.

Le pH est l'une des propriétés les plus importantes du sol. Il a de grands effets sur la concentration et l'absorption du soluté dans sol. Il est une considération importante pour les agriculteurs et les jardiniers pour plusieurs raisons, notamment le fait que de nombreuses plantes et formes de vie du sol préfèrent des conditions alcalines ou acides. Si le pH est inférieur à 6, on dit qu'un sol est acide, le pH varie de 6 à 8,5, c'est un sol normal et supérieur à 8,5, on dit alors qu'il s'agit d'un sol alcalin. C'est bien indicateur de l'équilibre des nutriments disponibles dans le sol (Tale & Ingole, 2015).

Le pH est un paramètre important car il contribue à garantir la disponibilité des nutriments des plantes, par exemple. Fe, Mn, Zn et Cu (présence de la toxicité).

Plus un sol est acide, plus les ions hydrogène seront multiples et dans une certaine mesure, les ions aluminium (Al^{3+}), fer (Fe^{2+}) et manganèse (Mn^{2+}), aussi dans un sol basique les cations basiques calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), potassium K^+ et le sodium (Na^+) sont abondants (FOLUR, 2023).

Lorsque les ions acides et les ions basiques sont équilibrés le milieu du sol est dit neutre et stable, jusqu'à ce que d'autres facteurs interviennent et déstabilisent de nouveau.

On mesure le pH pour vérifier si le sol est acide ou basique ce qui va permettre de connaître s'il faut appliquer ou pas les mesures de correction, comme le chaulage par exemple pour le cas d'un sol acide ou qu'on peut planter des plantes légumineuses qui augmentent la fertilité.

- **Conductivité électrique** (CE)

La conductivité électrique (CE) est un indicateur clé permettant de mesurer la concentration d'ions présents dans la solution du sol. Cette concentration détermine la capacité du sol à conduire l'électricité : plus la quantité d'ions est élevée, plus la conductivité augmente. En agriculture, la CE est principalement utilisée pour évaluer la salinité du sol, car elle reflète la quantité de sels solubles présents (Rengasamy et al., 2010).

La CE joue un rôle déterminant dans la gestion de la fertilité et de la santé des sols, en particulier dans les régions sujettes à des problèmes de salinité. Une CE trop élevée peut réduire la croissance des plantes en provoquant un stress osmotique, qui limite leur capacité à absorber l'eau, ou en causant une toxicité due à l'excès de sels (Shahid et al., 2018).

En revanche, une CE trop faible peut indiquer un manque de nutriments essentiels dissous dans la solution du sol, ce qui peut affecter le développement des cultures (Smith & Doran, 2015).

- **Capacité d'échange cationique**

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure de la capacité d'un sol à retenir et échanger des cations, c'est-à-dire des ions chargés positivement. Elle constitue un indicateur clé du potentiel de fertilité d'un sol. Les sols présentant une CEC élevée peuvent retenir une plus grande quantité de cations et possèdent une meilleure capacité à les échanger que ceux ayant une CEC plus faible.

Les charges négatives présentes à la surface des particules du sol attirent et retiennent les cations, tout en permettant leur échange avec d'autres cations présents dans l'eau du sol. Ce processus fait partie de la façon dont les propriétés chimiques du sol sont modifiées. La CEC joue un rôle crucial dans la chimie du sol et est utilisée comme indicateur de la fertilité, car elle reflète la capacité du sol à retenir divers éléments nutritifs (Mohamed, 2021).

La capacité d'échange cationique totale est la quantité maximale de cations qu'un sol peut retenir pour 100 g de matière sèche (Yves, 2016). En d'autre terme, cette mesure représente le total des charges négatives du sol disponible pour la fixation:

- Des ions H^+ et Al^{3+},
- Des cations échangeables tels que : Ca^{2+}, Na^+, K^+, Mg^{2+}.

La CEC d'un sol dépend de la nature de ses colloïdes et du pH de ce sol.

- **Phosphore assimilable**

Le phosphore (P) est l'un des macronutriments les plus importants pour tous les organismes vivants, y compris les plantes. Il occupe la deuxième place après l'azote, parmi les éléments nutritifs essentiels pour les plantes, en raison de son rôle crucial dans de nombreux processus métaboliques fondamentaux (Kuhad et al., 2011).

La carence en phosphore limite principalement la croissance et la productivité des plantes (Fernández et al., 2007). La matière organique est importante pour prédire la disponibilité du P assimilable (Turner, 2008). En effet, elle constitue une source majeure de P sous forme organique et joue un rôle important dans le stockage des éléments nutritifs, grâce à la minéralisation réalisée par les microorganismes du sol (Niyungeko et al., 2022).

Le phosphore est également un élément essentiel pour tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il est impliqué dans de nombreux processus biologiques tels que la croissance, la photosynthèse, et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Cependant, sa faible concentration dans les sols en fait souvent un facteur limitant pour le développement des plantes (Pousset, 2002).

- **Azote**

L'azote est l'un des éléments chimiques les plus importants dans la nutrition minérale des plantes. Il constitue également le quatrième élément en quantité dans la masse végétale, après l'oxygène, l'hydrogène et le carbone. Il est essentiel à divers processus métaboliques, notamment dans la synthèse de macromolécules vitales telles que les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques et la chlorophylle (Kaeberlein et al., 2002).

Plusieurs cultures prélèvent leur azote sous forme minérale, Cependant, la détermination des teneurs en azote sous forme nitrique ou ammoniacale dans le sol ne représente qu'une partie de l'azote disponible pour la plante. Le reste provient principalement de la minéralisation des formes d'azote organique présentes dans le sol (Giroux & Tran, 1987).

Dans cet ordre d'idée, l'azote joue un rôle clé dans l'utilisation des hydrates de carbone. Il stimule le développement et l'activité des racines, facilitant ainsi l'absorption d'autres éléments nutritifs et favorisant la croissance générale des plantes (Stevenson, 1986).

I.3.3 Les propriétés biologiques du sol

Le sol est un milieu vivant, qui abritent plusieurs êtres vivants. Comme il est vivant, il respire et il grandi on ne peut pas oublier aussi qu'il meurt en perdant ses caractéristiques élémentaires. Le sol est vivant et constitué de nombreuses structures spatiales enveloppées (horizons, rhizosphère, macro- et micro-agrégats, etc.) (Gobat et al., 2010).

Cette dimension fractale autorise la coexistence de très nombreux organismes de tailles très diverses et fait du sol un réservoir unique de diversité du sol microbienne, animale et végétale, il est donc nécessaire à la grande majorité des champignons, bactéries, plantes et la faune.

La biodiversité du sol résulte de l'interaction de plusieurs facteurs, à la fois naturels (par exemple pédogenèse) et anthropiques (occupation des sols, pratiques de gestion) agissant sur de longues périodes. Dans le sol, on y trouve des différents microorganismes ainsi que des végétaux (Gobat et al., 2010).

Parmi les indicateurs très intéressant d'un sol riche, fertile et vivant, ils s'agissent de la présence de la faune et de la flore, réparties comme suit:

- Les vers de terre (lombrics);
- La plante, à travers leurs racines et le fonctionnement particulier de l'interaction racine/sol (rhizosphère), avec des interactions racine/bactéries et racines/champignons (mycorhizes)
- Les bactéries du sol;
- Quelques 'bio- agresseurs' du sol (agents des fontes de semis, parasites racinaires, vecteurs de virus).

❖ **La faune du sol**

Des nombreux organismes habitent dans le sol et y exercent des plusieurs fonctions écologiques variées. La faune du sol revêt une importance particulière dans le cas des agrosystèmes parce que elle a un impact sur la production primaire (Mickaël, 2020). D'après une méta-analyse, présence de vers de terre augmente significativement le rendement (+ 25 %) et la biomasse (totale, aérienne et souterraine, d'environ +20% chacune) des plantes cultivées (Van Groenigen et al., 2014). Plus généralement, l'effet de la faune du sol sur la production primaire peut être vu au travers de ses effets sur les fonctions de :

- Recyclage des nutriments,
- Entretien de la stabilité/structure du sol,

- Contrôle des bio-agresseurs,
- Support de biodiversité

Ces fonctions bénéfiques sont directement liées aux besoins des plantes : (i) leur nutrition, (ii) le milieu physique dans lequel elles se développent, (iii) leur santé, et (iv) les interactions entre plantes.

La présence de racines, d'animaux et de micro-organismes dans le sol est en interaction avec ses propriétés physiques et chimiques (structure, dynamique du MO, solution du sol...). Quant à la faune du sol, son rôle majeur réside dans la transformation de la matière organique et dans son action mécanique sur le sol dont : la formation des galeries, porosité, structuration des agrégats (Lavelle et al., 2006).

Les indicateurs biologiques peuvent être définis comme des organismes qui répondent à un stress par leur présence ou leur absence ou en présentant les modifications dans certaines caractéristiques ou activités particulières (Gros, 2002). Les micro-organismes bactériens sont fréquemment utilisés comme indicateurs de la qualité biologique des sols.

❖ La flore du sol

La flore du sol constitue un excellent indicateur de la fertilité et du pH du sol, notamment lorsqu'il est acide. Plusieurs espèces végétales jouent un rôle clé dans les interactions trophiques au sein des écosystèmes. Les effets des plantes sur les communautés d'organismes du sol varient en fonction de leur production primaire, c'est-à-dire des quantités et des compositions de litières et d'exsudats qu'elles produisent, ainsi que de leurs traits fonctionnels.

Les caractéristiques spécifiques des plantes, qui varient d'une espèce à l'autre, influencent l'abondance, l'activité et la diversité des consommateurs primaires et secondaires du sol, de leurs symbiotes, ainsi que des organismes décomposeurs (De Deyn & Van der Putten, 2005).

Plusieurs études ont montré que les différentes espèces végétales modifient la composition microbienne de leur rhizosphère, ce qui peut avoir des effets négatifs sur l'abondance des communautés microbiennes et de leurs prédateurs (Wardle et al., 2004).

Plus généralement, la diversité des communautés végétales semblent être à l'origine d'une grande hétérogénéité spatiale et temporelle des propriétés des sols et favorise ainsi une plus grande diversité de la micro et macrofaune souterraine (Wardle et al., 2004). Toutefois, ces effets positifs de la biodiversité végétale ne sont pas systématiquement observés, ce qui pourrait s'expliquer par l'effet prédominant de certaines espèces plutôt que par la diversité végétale elle-

même. De plus, il semble que les effets positifs de la biodiversité végétale sur la diversité des organismes du sol soient souvent découplés dans le temps (De Deyn & Van der Putten, 2005).

La qualité biologique des sols fait référence à l'abondance et à la diversité des organismes vivants qui participent au fonctionnement du sol. La gestion des ressources biologiques du sol est donc essentielle pour la durabilité de ce système écologique. Le sol est composé de fractions biologiques et chimiques, incluant des éléments majeurs (carbone, hydrogène, oxygène, azote), des éléments secondaires (soufre, phosphore, potassium, calcium, magnésium), ainsi que des oligo-éléments. Les nutriments présents dans le sol sont disponibles en fonction du pH du sol, comme l'illustre la Figure 2.

I.4 Disponibilité des éléments nutritifs dans le sol avec pH

La Figure 2 montre la gamme de pH dans laquelle chaque élément nutritif est le plus biodisponible. Une application inadéquate d'amendements calciques (pour redresser le pH du sol) peut entraîner des blocages dans l'absorption de certains éléments, tels que le manganèse (Mn), le zinc (Zn) ou le bore (B) (Valérie et al., 2007).

Des pH faibles perturbent l'assimilation d'éléments nutritifs comme le potassium, le magnésium et le molybdène. Par ailleurs, un pH trop bas peut augmenter la toxicité en favorisant une absorption excessive de certains oligoéléments. En revanche, un pH trop élevé peut empêcher l'absorption du phosphate et de nombreux oligoéléments, à l'exception du molybdène

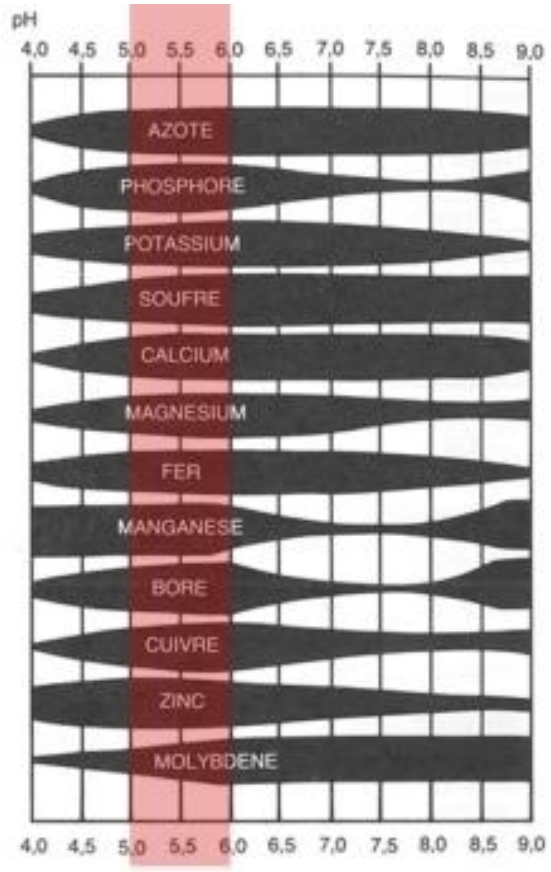


Figure 2: Schéma d'assimilabilité des éléments nutritifs par les végétaux en fonction du pH du sol (Genot et al., 2009)

La disponibilité des nutriments diffère à différentes valeurs de pH :

- Azote (N) : L'azote est un élément nutritif essentiel pour les plantes. Il peut être absorbé sous deux formes principales : le NH_4^+ (ammonium) et le NO_3^- (nitrate). À pH neutre (pH 7), la conversion microbienne du NH_4^+ en NO_3^- est rapide,
- Phosphore (P) : La disponibilité du phosphore dépend fortement du pH du sol. Dans un sol légèrement alcalin ou neutre, l'ion HPO_4^{2-} est prédominant, car le pH réduit la concentration des ions $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}. À des pH plus acides, l'ion $H_2PO_4^-$ devient plus courant. Les plantes absorbent principalement l'ion HPO_4^{2-}. Ainsi, à un pH compris entre 6 et 7, la disponibilité du phosphore pour les plantes est optimale,
- Potassium (K) : La disponibilité du potassium diminue généralement à mesure que le pH baisse, car l'aluminium se lie aux sites de fixation du potassium, limitant ainsi son absorption,
- Calcium (Ca) et magnésium (Mg) : Le calcium est plus disponible dans les sols alcalins, tandis que le magnésium voit sa disponibilité diminuer dans ces mêmes conditions,

- Sulfate (SO_4^{2-}) : Le sulfate est relativement peu affecté par les variations du pH,
- Micronutriments : Des éléments comme le manganèse (Mn), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et le bore (B) sont plus disponibles dans des sols au pH bas (acides).

I.5 Eléments essentiels

Seize nutriments sont essentiels à la croissance et au développement des plantes. Sur base de la quantité requise par les plantes, ces nutriments sont classés en deux groupes : les macronutriments et les micronutriments. Le Tableau 2 présente les éléments essentiels présents dans le sol, en distinguant ceux qui sont considérés comme des macronutriments et ceux classés parmi les micronutriments.

Tableau 2: Eléments essentiels à la croissance des plantes

Macronutriments	**Micronutriments**
Carbone (C)	Fer (Fe)
Hydrogène (H)	Manganèse (Mn)
Oxygène(O)	Zinc (Zn),
Azote (N)	Cuivre (Cu),
Phosphore (P)	Bore (B)
Potassium (K)	Molybdène (Mo)
Calcium (Ca)	Chlore (Cl)
Magnésium (Mg)	
Soufre (S)	

De plus, le caractère essentiel du silicium (Si), du sodium (Na), du vanadium (V) et du cobalt (Co) a été pris en compte, mais il n'est pas encore prouvé (Fageria & Baligar, 2005).

I.6 Qualités et caractéristiques d'un bon sol agricole

I.6.1 Qualités d'un bon sol agricole

La qualité d'un sol se définit par sa capacité à maintenir une productivité biologique optimale, à préserver l'environnement et à soutenir la santé de la faune et de la flore (Coll & Velly, 2012). Elle reflète l'aptitude d'un sol à favoriser le développement végétal et à remplir diverses fonctions essentielles, notamment environnementales, telles que la régulation du cycle de l'eau et le stockage du carbone (Lal, 2004).

Outre les facteurs abiotiques, l'indice biotique de qualité des sols (IBQS) constitue un indicateur clé de l'état biologique du sol, en se basant sur la présence d'espèces indicatrices (Tarnawski et al., 2017).

Un sol agricole de bonne qualité se distingue par sa fertilité, la diversité des espèces végétales qui y prospèrent, et la présence en nombre de microorganismes, tels que les vers de terre, qui favorisent la décomposition de la matière organique et la formation d'humus (Brady & Weil, 2014). Ces caractéristiques témoignent de la capacité du sol à soutenir une agriculture durable et équilibrée. En effet, un sol où divers organismes peuvent se développer indique une dynamique écologique saine et propice à la croissance des plantes (Schjønning et al., 2004).

Par ailleurs, un bon sol doit être bien aéré, avec une porosité d'environ 50 %, ce qui est souvent considéré comme optimal pour la circulation de l'air et de l'eau (Baker et al., 2007). Il doit aussi être suffisamment fertile, c'est-à-dire qu'il doit contenir une quantité adéquate de matière organique et d'éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium, pour permettre un développement végétal optimal (Mi et al., 2023).

I.6.2 Les caractéristiques d'un bon sol

Un bon sol est un sol qui est capable de maintenir le meilleur développement d'une plante. Il est perméable à l'eau, pouvoir de rétention en eau bien aéré, riche en la matière organique, en sels minéraux et en microorganismes etc. (Kaboneka, 2023).

Un bon sol doit :

- Etre profond (> 80 cm) pour stocker une réserve d'eau suffisante,
- Avoir une capacité de rétention d'eau (CR > 20%) pour permettre l'approvisionnement en eau pour les plantes. En effet, un sol qui ne retient pas l'eau (soit parce que l'eau coule en profondeur vers la nappe d'eau souterraine soit vers les cours d'eau avoisinants) s'assèche rapidement,
- Contenir des éléments nutritifs assimilables par la plante,
- Avoir une structure stable pour permettre une bonne pénétration des racines et une aération du sol,
- Perméable à l'eau, bien aéré, riche en humus, en sels minéraux et en micro-organismes.
- Etc.

Tableau 3: . Liste des qualités des sols et leurs indicateurs FAO, 1989)

Qualités des sols	**Caractéristiques des sols indicatrices de la qualité**
Qualités liées aux exigences de la croissance des cultures	
Disponibilité en eau	Profondeur effective, caractéristiques hydriques du sol (capacité au champ, point de flétrissement, capacité d'eau utile,…)
Disponibilité en éléments nutritifs	Texture du sol, carbone organique du sol, pH du sol, N, P, K, oligoéléments (Zn, Fe, S, B, Cu, Mn, Mo, Al,..)
Capacité de rétention des éléments nutritifs	Texture du sol, carbone organique du sol, saturation en bases, Capacité d'Echange Cationique du sol et la fraction argileuse
Condition d'enracinement	Texture du sol, densité apparente, éléments grossiers, phases du sol qui affectent la pénétration des racines et la profondeur du sol et le volume du sol
Disponibilité d'oxygène dans la zone radiculaire	Teneur en eau du sol, couleur du gleys, potentiel d'oxydo-réduction
Absence de toxicité	Toxicité d'Al, de Fer, de Mn, de Na, de Cl, de HCO3-, Salinité (conductivité électrique, cations solubles et échangeables, Ca, Mg, Na, K, anions solubles), pH
Qualités liées aux conditions d'aménagement et de conservation	
Facilité de travail du sol	Texture du sol, teneur en carbone organique, consistance du sol, densité apparente, présence de graviers et de pierres dans le profil, présence d'une roche dure continuelle dans les couches superficielles
Résistance à l'érosion	Texture, teneur en carbone organique, structure, perméabilité et la pente
Résistance aux tassements	Texture, teneur en carbone organique, structure, perméabilité
Qualités liées aux besoins d'amélioration des sols	
Facilite de nivellement et planage du terrain	Pente, microrelief, macro-relief, taille et forme des champs, couvert végétal
Facilite de construction d'ouvrages pour la domestication des eaux (irrigation et drainage)	Pente et la proportion de terres marécageuses ou inondées

CHAPITRE II: GESTION DES SOLS ACIDES AU BURUNDI

II.1 Dégradation du sol

La dégradation des sols est décrite comme étant des processus de perte des éléments physique, chimique et biologique agissant sur le sol et produisant un impact sur les ressources du sol et sur la qualité de l'environnement, ainsi que sur le bien-être et les moyens de subsistance des êtres humains (ELD, 2019). Elle résulte des activités humaines ou elle est un phénomène naturel aggravé par l'effet des activités humaines.

La dégradation d'un sol est un processus progressif qui modifie sa structure et ses fonctions, rendant ainsi le sol infertile. Ce phénomène peut entraîner plusieurs conséquences graves, notamment :

- ❖ La disparition du sol ;
- ❖ La pollution des sols, qui rend certaines zones inexploitables et génère des contraintes majeures pour les activités agricoles.

Il est important de noter que le concept de dégradation des terres est plus large que celui de dégradation du sol, car il englobe, en plus du sol proprement dit, le paysage, la végétation, l'eau, l'air, les organismes vivants et les impacts possibles sur la vie humaine. Brabant (2008) classe les dégradations des sols en trois catégories à savoir :

- ✓ Erosion : Erosion par l'eau, érosion par le vent, érosion mécanique
- ✓ Dégradation stricto sensu: Dégradation physique, dégradation chimique, dégradation biologique.
- ✓ Dégradations diverses : Urbanisation et autres constructions, exploitation minières, et carrière, pollution par des produits radioactifs, et dégradations dues à des guerres et conflits.

Au Burundi, la dégradation des sols est un phénomène complexe, influencé par des facteurs, climatique, biophysiques et sociaux et qui conduit à la fois à une baisse de fertilité du milieu naturel, et l'accélération de la pauvreté (MINEEATU, 2011)**.** D'après cette institution, les sols du Burundi sont considérés comme étant d'une fertilité médiocre. Plus de 73 % des sols sont acides avec un pH<5 (ISABU, 2021) et présentent une toxicité aluminique.

❖ Les facteurs de dégradation des sols

Les principales causes de dégradation des sols sont à la fois anthropiques et naturelles. Parmi les causes anthropiques, on trouve la déforestation, une utilisation excessive ou inappropriée des engrais, les mauvaises pratiques agricoles, ainsi que la surexploitation des sols à des fins agricoles. (MINEEATU, 2011)**.** D'autre part, les causes naturelles incluent des phénomènes tels que le déficit hydrique et les précipitations, ces dernières entraînant notamment l'érosion sélective qui emporte les éléments les plus importants du sol. L'érosion lessive les cations basiques (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}), essentiels à la croissance des plantes, laissant ainsi place à des éléments toxiques tels que l'Al^{3+} et le Fe^{2+}.

Les activités entropiques accélèrent l'érosion, diminuent le pouvoir de rétention en eau et contribuent à l'exportation des éléments nutritifs, notamment à travers l'utilisation d'engrais ammoniacaux. Ces facteurs aggravent la dégradation des sols.

Un sol est jugé dégradé lorsqu'il a perdu une partie de ses fonctions, comme celle de nourrir les plantes et les animaux, celle de filtrer les eaux ou encore celle d'abriter une biodiversité importante.

Les grands problèmes liés à la dégradation des sols sont principalement dus aux activités anthropiques ainsi que les perturbations climatiques. La figure 3 illustre les principaux types de dégradation des sols (Mathieu, 2016)**.**

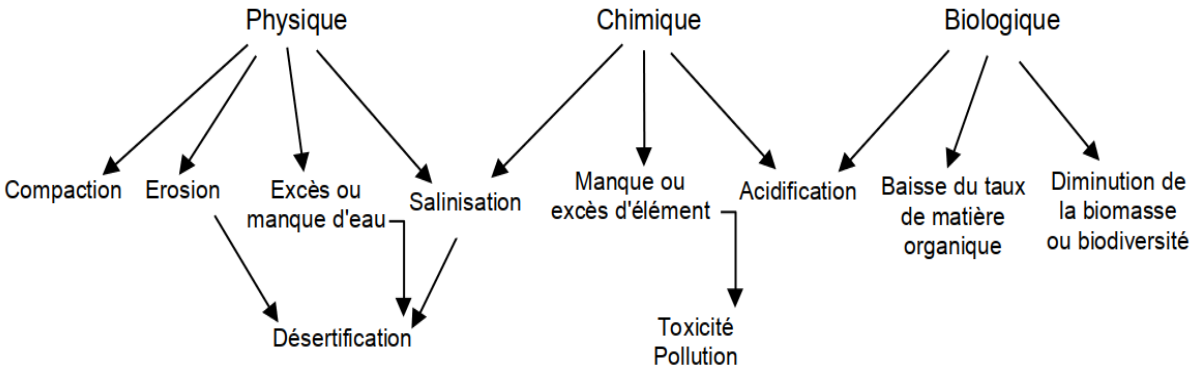


Figure 3: Principaux types de dégradation des sols

II.2 Conséquences de l'acidité sur le sol

L'acidification du sol est un processus naturel ayant comme effet sur les plantes et à sa croissance. Lorsque le sol devient plus en plus acides autrement lorsque le pH descend en dessous de 4,5, il est de plus en plus difficile de produire des cultures vivrières (Harter, 2007). A mesure que pH descend, la disponibilité de nombreux nutriments essentiels pour les plantes se réduit, tandis que l'aluminium et quelques micronutriments deviennent solubles et toxiques pour les plantes.

Les effets de l'acidification du sol sont nombreux et impactent plusieurs caractéristiques cruciales de la qualité du sol. Cela conduit à un appauvrissement des sols en éléments nutritifs, à une détérioration de leur structure, à une capacité de rétention en eau réduite, et, en conséquence, à une diminution des rendements agricoles (Figure 4). Ces changements affectent directement la productivité des sols et la durabilité des systèmes agricoles.

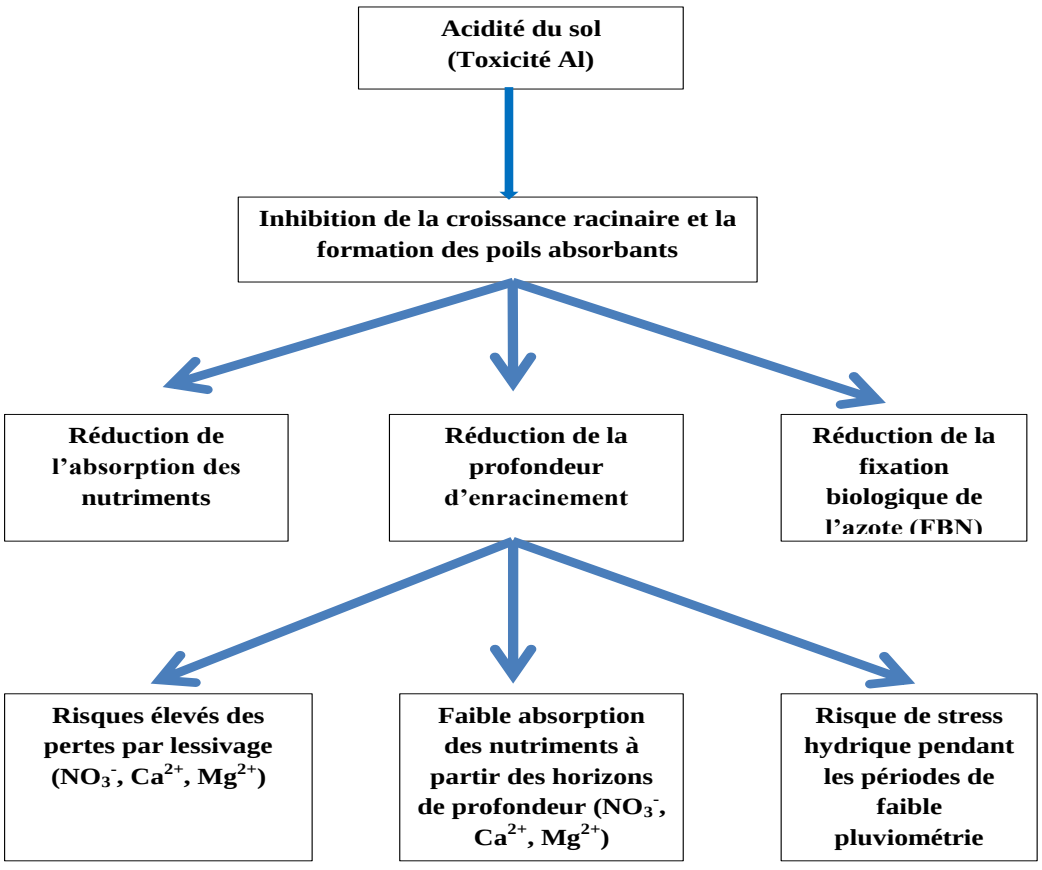


Figure 4: Acidité/Toxicité Al et croissance racinaire et formation des poils absorbants

(George et al., 2012)

II.3 La gestion des sols acides

La gestion ou la correction de la fertilité des sols c'est le fait de maintenir le pH et le contenu en élément essentiels dans une marge désirée pour un type de sol et de systèmes culturaux. On essaiera de rétablir les teneurs du sol en éléments chimiques les plus perdus par l'érosion hydrique (Ca, K, et Mg) et d'autres activités anthropiques.

La combinaison des engrais, de la dolomie et la M.O contribue significativement à l'augmentation de la CEC (Kaboneka 2023). La chaux dolomitique est un produit alcalinisant qui permet d'augmenter le pH du sol et de le rendre moins acide.

D'après Harter (2007), les cendres des bois augmentent le pH du sol, ainsi les os sont également une bonne source de calcium et peuvent être utilisés comme amendement calcaire sur un terrain de petite superficie

Si les analyses de sol révèlent des niveaux élevés de magnésium, l'utilisation de la chaux calcique est recommandée. En revanche, si une carence en magnésium est détectée, il est préférable d'utiliser du calcaire dolomitique (Hodgson, 2022).

La sélection des cultures tolérantes à l'acidité, la restitution des résidus des récoltes et l'amélioration des techniques culturales jouent la grande importance dans la réhabilitation des sols tout en augmentant du CEC et du pH.

Selon Kaboneka (2023), le chaulage, combiné avec l'ajout de matière organique, est l'un des moyens les plus efficaces pour restaurer les sols dégradés.

Étant donné que la majeure partie du Burundi est couverte par des sols ferralitiques, une grande proportion de ces sols est acide et pauvre en éléments nutritifs (Figure5).

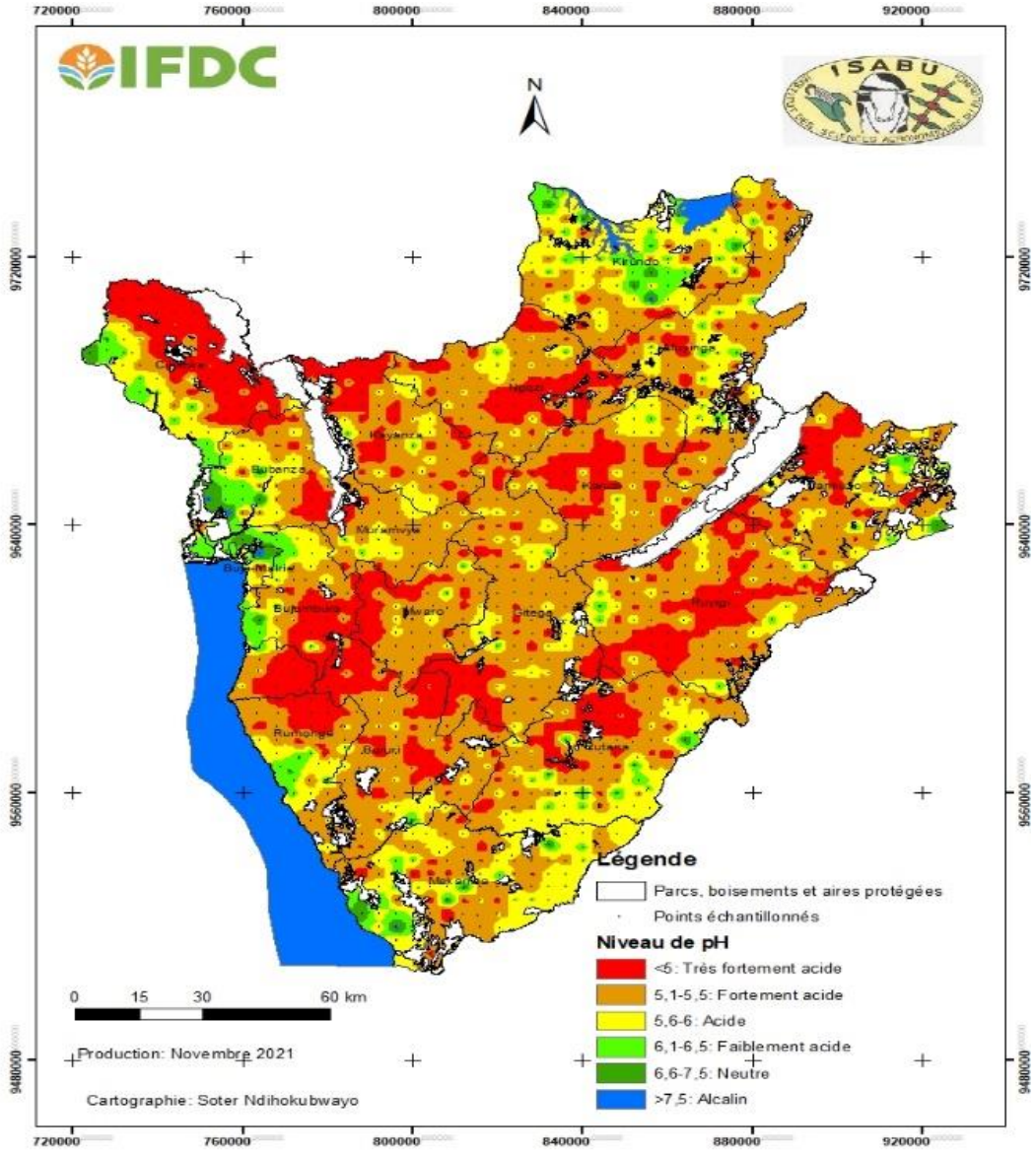


Figure 5: Valeurs de pH des sols du Burundi (*ISABU, 2021).*

II.4 Rôle de la matière organique et de la dolomie dans le sol

II.4.1 Rôle de la matière organique

La matière organique c'est l'ensemble des substances d'origine biologique, de nature et de propriétés très variées (Chamayou et al., 1989).

La matière organique, c'est tous ce qui vit ou a déjà été vivant. Elle englobe les résidus végétaux et animaux aux divers stades de décomposition (les cellules et les tissus des organismes du sol ainsi que les substances produites par les microorganismes du sol). Ces substances forment dans le sol un groupe de fraction stable connue sous le nom de l'humus (Bonneau & Souchier, 1979).

Par le terme matière organique des sols, on entend l'ensemble des composés organiques qui sont issus de résidus d'organismes à différents stades de décomposition, synthétisés par les organismes vivants ou qui sont des produits de dégradation. Les quantités de matière organique du sol et de carbone organique sont corrélées. Il est arbitrairement admis que la matière organique du sol est le double du carbone organique dans un sol non cultivé et que dans un sol cultivé elle est égale à 1.73 fois la teneur en carbone organique (Duchaufour, 2001). Elles comprennent également toutes les substances sécrétées par les racines, telles que des petites molécules, des sucres, des acides organiques exsudés ou excrétés, du mucilage et des cellules.

D'après Calvet (2003), la matière organique du sol (MO) représente tous les composés organiques non vivants particulaires et moléculaires, d'origine animale, végétale ou microbienne, présents dans le sol.

La matière organique joue un rôle essentiel dans le sol. Elle contribue à la création d'un environnement favorable pour les organismes qui y vivent, car elle constitue une source majeure de carbone et d'énergie pour les microorganismes. Elle est également une source importante de nutriments, et sa capacité de rétention de l'eau permet de réguler le système hydrique du sol (Rawls et al., 2003).

De plus, elle agit comme un tampon contre les variations de pH et participe à la structure physique du sol en formant des complexes organo-minéraux. Cela contribue à la stabilité de cette structure contre l'érosion, en liant les particules du sol entre elles. Le maintien de cette structure favorise la circulation des gaz et de l'eau dans le sol. Un rôle très important de la matière organique est qu'elle allège la structure du sol.

La M.O joue plusieurs rôles importants dans le bon fonctionnement du sol:

- La matière organique du sol représente l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois pour des fonctions agricoles,
- Les apports de la matière organique sous forme de : composte, fumier feuille mortes etc. peuvent avoir des effets favorables autant sur les propriétés physicochimiques du sol donc sur la productivité. La teneur en MO d'un sol est un critère essentiel de productivité, d'une manière générale un bon sol doit contenir au moins 5% de la MO,
- Elle agit comme un élément de lutte contre l'érosion en faisant la liaison des particules de sol entre elles, et le maintien de cette structure favorise la circulation de gaz et d'eau dans le sol;

- La matière organique est le principal déterminant de l'activité biologique. La diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes sont en relation directe avec la présence de la MO (Chaussod, 2009);
- Elle favorise le réchauffement du sol (coloration plus sombre des MO),
- Elle contribue à la perméabilité et l'aération du sol,
- La MO du sol favorise l'augmentation de la capacité d'échange électrique et inhibe la toxicité des certains éléments. Elle favorise l'assimilation d'autres éléments,
- Etc.

La gestion des résidus de récolte et des engrais verts est les sources d'éléments nutritifs des cultures. Grâce au processus de compostage a suscité l'intérêt des pédologues burundais comme moyen d'augmenter productivité des sols et production agricole (Kaboneka et al., 2021).

➢ **Fumiers de vaches et de chèvres**

Le fumier d'animaux d'élevage est une excellente source d'éléments nutritifs et de matière organique pour le sol. Toutefois, la composition du fumier, les caractéristiques du sol et les méthodes d'application ont une incidence sur la teneur du sol en éléments nutritifs et en matière organique (Ontario, 2023).

Les fumiers de bovins sont des produits bien pourvus en matière organiques grâce à son processus de compostage qui permet une transformation des matières organiques vers les formes plus stables, à quantité d'apport égale. Les composts issus de fumier de vache ont un effet significatif sur l'enrichissement des sols en matière organique (Christian, 2012).

❖ Principaux avantages du fumier de vache :

- Renforce les terres légères et optimise leur structure ;
- Enrichit le sol en nutriments essentiels ;
- Améliore la qualité et le rendement des récoltes ;
- Favorise une production agricole plus stable et performante.

Le fumier de vache est riche en nutriments et contribue à la croissance des plantes. Sa composition est de 3% d'azote, 2% de phosphore et 1% de potassium (3-2-1 NPK) (Margo, 2024). Les fumiers de vache sont riches en calcium, magnésium, minéraux et en oligo-éléments, de plus les granulés contiennent une grande quantité de matière organique (> 60%) (Onwosi et al., 2022).

- Fumier de chèvre :

Le fumier de chèvre est reconnu pour sa haute qualité. Sa faible teneur en eau et sa forte concentration en nutriments en font un engrais particulièrement efficace. Riche en azote naturel, il ne contient pas de nitrates, ce qui garantit une libération progressive des nutriments au fil des arrosages, sans risque de brûlure pour les plantes (Caprina, 1968). De plus, le fumier de chèvre est riche en potassium, un élément clé pour favoriser la floraison des plantes. Sa composition chimique moyenne est la suivante : 46,58 % de carbone organique, 1,34 % d'azote, 0,54 % de P_2O_5 et 1,56 % de K_2O (Batubara et al., 2021).

Les fumiers de vache et de chèvre offrent des avantages complémentaires, jouant un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Leur utilisation contribue à la durabilité agricole et à une production alimentaire de meilleure qualité.

II.4.2 Rôle de la dolomie dans la vie du sol

Le chaulage est une technique agricole utilisée pour réduire l'acidité du sol en y ajoutant des produits riches en calcium (calcaire, chaux calcique) ou en calcium et magnésium (dolomie). Cette pratique vise à améliorer la fertilité du sol et à augmenter l'efficacité des engrais minéraux (FOLUR, 2023).

La chaux dolomitique vive, fabriquée à partir de gisements de calcaire dolomitique de qualité supérieure, contient entre 40 % et 44 % de carbonate de magnésium ($MgCO_3$). Elle est principalement composée d'oxyde de magnésium (MgO) et d'oxyde de calcium (CaO). Ce solide blanc, alcalin et cristallin, est largement utilisé en agriculture pour ses nombreux bienfaits (Graymont, 2019).

Elle joue un grand rôle dans le fonctionnement du sol dont :

- Favoriser la disponibilité des éléments minéraux NH_3, P, Mg, et oligo-éléments Mo, Mn, B, Zn, Cu pour la plante,
- Réduire la toxicité à l'aluminium,
- Augmenter le pH,
- Augmenter la concentration des éléments basique,
- Favoriser l'installation des racines et augmenter la teneur en calcium de l'herbe,
- Améliorer l'état structural du sol pour les sols pauvres en matières organiques dont la CEC est faible,

- Eliminer certains éléments gênants comme, des mauvaises herbes et les micro-organismes pathogènes,
- etc.

En plus, l'application de la chaux génère des effets sur les propriétés physiques et microbiennes du sol. La perméabilité du sol peut soit augmenter ou diminuer en fonction de la nature du sol auquel la chaux est appliquée. En général, l'augmentation de la teneur en calcium et du pH du sol stimule l'activité microbienne, favorisant une meilleure décomposition de la matière organique et la libération des nutriments (Harter, 2007).

Contrairement aux engrais, qui doivent être appliqués chaque année, voire à chaque saison, l'apport de dolomie se fait généralement tous les 2 à 3 ans. Cette durée prolongée entre les applications est due à l'effet durable du chaulage sur le sol, permettant une gestion plus durable de la fertilité (FAO, 2021).

II.5 Contribution du *Tithonia diversifolia et Lantana camara* dans la gestion des sols acides

II.5.1 *Tithonia diversifolia*

Tithonia diversifolia, un arbuste de la famille des Astéracées, est largement répandu le long des limites des exploitations agricoles dans les tropiques humides et subhumides d'Afrique. Sa biomasse verte a été reconnue comme une source efficace de nutriments pour certains plantes comme le riz de plaine (Oryza sativa) en Asie et pour le maïs (Zea mays) et les légumes en Afrique orientale et australe (Jama et al., 2000). La biomasse des feuilles vertes de *T. diversifolia* est riche en nutriments, avec une moyenne d'environ 3,5 % de N, 0,37 % de P et 4,1 % de K sur la base de matière sèche (Jama et al., 2000).

Cette espèce a plusieurs avantages que nous ne pouvons pas négliger. Sa biomasse de se décomposer rapidement après application sur le sol, et la biomasse incorporée peut être une source efficace de N, P et K pour les cultures (Jama et al., 2000).

De ses concentrations relativement élevées de nutriments que l'on trouve dans sa biomasse et de sa capacité à extraire des quantités relativement élevées de nutriments du sol ont poussé à plusieurs chercheurs de prendre cette espèce comme un grand bénéfice pour l'utilisation de la correction des terres acides (Olabode et al., 2007). Cette espèce offre plusieurs fonctions, ceux-ci comprennent le fourrage, les aliments pour volailles, le compost, la démarcation des terres, réduction de l'érosion des sols, les matériaux de construction et les abris pour les volailles surtout des oiseaux (Nill & Nill, 1993).

Par conséquent, cette espèce connue de faibles teneurs en lignine (6,5 %) en polyphénols (1,6 %) et des teneurs considérablement élevées en N (3,50 %), P (0,37 %) et K (4,10 %), il est nécessaire de déterminer dans quelle mesure cette espèce de mauvaise herbe pourrait être utilisée pour améliorer la qualité du sol et pour déterminer le meilleur mode d'application de l'espèce de mauvaise herbe (Jama et al., 2000).

La qualité de matériaux de compostage de *Tithonia diversifolia* pourrait être améliorée par l'ajout de tiges succulentes et de plantes vertes, feuilles d'espèces agroforestières.



Figure 6: Feuillages de Tithonia diversifolia (photos prises à Rutana-Butare en avril 2024)

II.5.2 *Lantana camara*

Lantana camara est une plante vivace arbustive appartenant à la famille des Verbenaceae. Elle est largement répandue dans les régions tropicales et subtropicales et est souvent utilisée à des fins ornementales, médicinales et agricoles. Cependant, elle est également classée comme une espèce invasive dans de nombreux endroits (Sharma et al., 1981).

Selon, Sharma et al., (1981), les parties végétatives, principalement les feuilles, contiennent des nutriments en matière sèche tels que :Azote (N) : 2,0 à 3,0 %, Phosphore (P) : 0,1 à 0,4 %, Potassium (K) : 2,5 à 3,5 %, Calcium (Ca) : 1,0 à 2,0 %, Magnésium (Mg) : 0,2 à 0,5 % .

Lantana est un genre bien connu de ce genre famille utilisée comme haie et décoration des jardins et comptant au total 150 espèces. Ils sont originaires des régions tropicales des Amériques et de l'Afrique, mais existe en tant qu'espèce introduite dans de nombreuses zones, notamment dans la région Australie-Pacifique, dans le sud et le nord-Est de Inde. Le genre comprend à la fois des plantes herbacées et des arbustes atteignant 0,5 à 2 m (1,6 à 6,6 pieds) grand (Barik et al., 2020).

❖ Avantages agricoles :

- Amendement organique : La biomasse de *Lantana camara* peut être utilisée pour améliorer la matière organique des sols,
- Biopesticide naturel : Ses extraits sont utilisés pour lutter contre les ravageurs et les pathogènes,
- Gestion de l'érosion : Ses racines stabilisent le sol sur les pentes, contribuant à la prévention de l'érosion (Day et al., 2003).

❖ Inconvénients :

- Toxicité : Les composés du *Lantana camara* peuvent être toxiques pour le bétail lorsqu'ils consomment de grandes quantités de la plante,
- Espèce invasive : *Lantana camara* peut supplanter les plantes indigènes, réduisant ainsi la biodiversité (Day et al., 2003).

Cette espèce est souvent utilisée pour les haies et contrôle de l'érosion des sols. Les brindilles sont utilisées comme combustible. Le nombre d'utilisations mineures inclut les graines comme agneau nourriture, production de blogas quand sa brindille tendre est mélangée à de la bouse de vache et à des fins médicinales. Lantana a été utilisé pour traiter des maladies telles comme le rhume, la varicelle, le rhume de poitrine, coupures fraîches, maux de dents et inflammation chez l'être humain (Nanjappa et al., 2005).

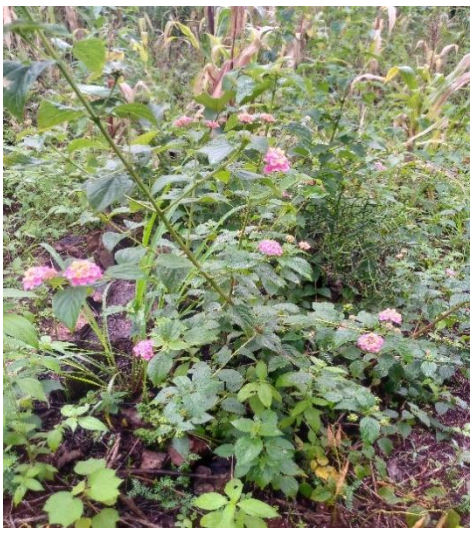




Figure 7: Feuillages de Lantana camara (photos prises à Rutana- Bugiga en avril 2024)

CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES

III.1 Présentation de la zone d'étude.

Notre étude a été menée sur le terrain de la ferme didactique de la FABI à Zege, commune Gitega, région de Kirimiro en province de Gitega.

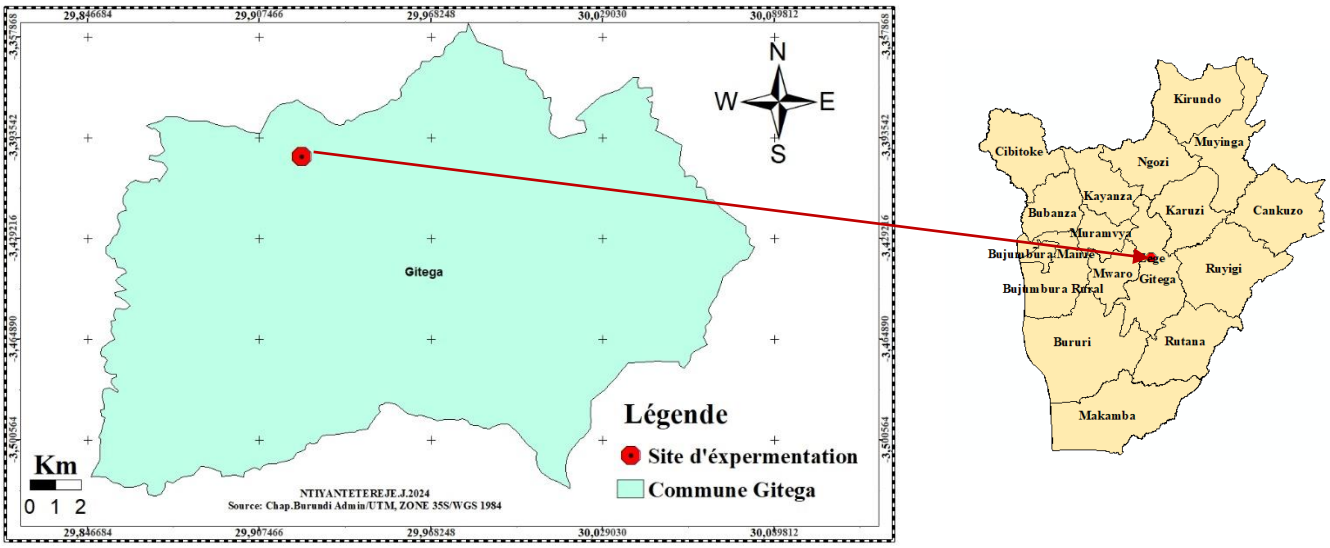


Figure 8: Localisation du site expérimental

III.2 Situation géographique de la zone d'étude

Le site expérimental de notre étude est situé à Zege en commune Gitega de la province Gitega dans la région agroécologique de Kirimiro. La région de Kirimiro connait un climat tropical humide. C'est un climat doux avec un réseau hydrographique dense. Les précipitations sont inférieures à 1400mm /an mais supérieures à 1040mm/an. Les coordonnées géographiques de ce site sont 3°24'82" S et 29°55'20,42" E en DMS (degrés, minutes, secondes). Nous avons choisi ce site car les analyses faites sur ces sols ont montré que les sols de la région de Kirimiro au Burundi sont fortement acides. Selon (MINEAGRIE, 2022), la région de Kirimiro connaît des sols dit ferralsols. Les sols des collines ont une fertilité variable, en baisse constante à cause de la surexploitation, de l'érosion et des mauvaises pratiques agricoles. Les analyses faites au laboratoire de l'ISABU avant le labour et la mise en place des amendements organo-minéraux ont montré que ces sols ont un pH de 4,2. Selon Landon, (1991), les sols avec un pH < 5,5 sont acides c'est-à-dire qu'ils ont une toxicité aluminique et excès de Co, Cu, Fe, Mn, Zn et déficience en Ca, K, N, Mg, Mo, P, S et B.

III.3 Matériels utilisés

Au cours de la réalisation de notre travail de recherche, nous nous sommes servis par des matériels végétaux, logiciels et autres matériels :

III.3.1 Matériels végétaux

- Semences du haricot nain (variété Rufutamadeni)
- Compost de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*
- Piquets pour la délimitation des parcelles.

III.3.2 Autres matériels

- Du fumier de vache et du fumier de chèvre
- Dolomie
- Engrais minéral (FOMI Imbura)
- Corde pour la délimitation des parcelles.
- Ordinateur portable pour la saisie et l'enregistrement des données ;
- Mettre ruban pour la délimitation des parcelles et dans la mesure du carrée de rendement
- GPS pour la collecte des données géographiques du terrain
- Des sachets biodégradables pour emballer le rendement
- Essuie-tout,
- Tamis de 2 mm pour le tamisage des échantillons,

III.4 Méthodologie

III.4.1 Démarche méthodologique et expérimentale

Pour évaluer les effets interactifs entre l'application de la dolomie et les fumures organiques sur les propriétés d'un sol acide le protocole utilisé se présente comme suit:

- Prélèvement de l'échantillon composite du site expérimental avant l'essai,
- Délimitation du terrain en 3 blocs constitué de 15 parcelles chacun ; chaque parcelle ayant une forme carrée de 8 m x 8 m,
- Conduite de la culture de haricot (semis, entretien et récolte),
- Echantillonnage du sol dans toutes les parcelles élémentaires,
- Ensachage des échantillons,
- Séchage à l'air libre pendant 21jours,

- Tamisage des échantillons à l'aide d'un tamis de 2 mm d'ouverture (le tamisât a été récupéré pour les analyses physicochimiques),
- Analyse physicochimique des échantillons prélevés,
- Analyse statistique des données.

L'étude comprend deux facteurs :

- Le facteur type de matière organique avec 5 modalités : témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*.
- Le facteur dose de dolomie qui comprend trois niveaux à savoir 0 t/ha, 2 t/ha et 4 t/ha.

La combinaison de ces deux facteurs conduit à 15 traitements montrés dans le protocole expérimental schématisé à la Figure 9. L'essai a été mené en blocs aléatoires complets avec trois répétitions (ou 3 blocs) ; ce qui correspond à un total de 45 traitements matérialisés par 45 parcelles expérimentales.

Le dispositif en blocs aléatoires complets comprenant 3 blocs constitués chacun de 15 parcelles mesurant 8m x 8m chacune. Entre une parcelle et une autre, un sentier de 1m a été laissé tandis que la distance entre un bloc et un autre était de 3m. La délimitation de ces parcelles expérimentales a été réalisée en dates du 03 au 05 janvier 2023.

Schématiquement, le dispositif expérimental était construit de la manière suivante :

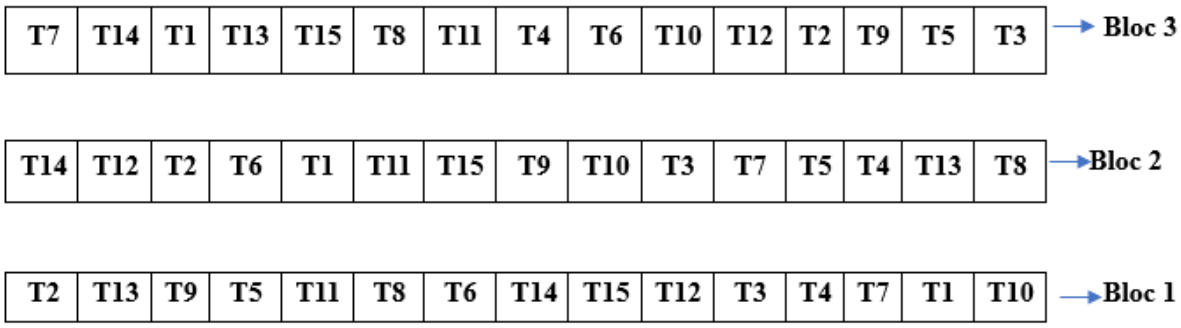


Figure 9: Dispositif expérimental utilisé

Les 15 traitements mis en place sont les suivants :

- T1 (TE-D0): Témoin (0 t/ha de fumure organique + 0 t/ha de chaux),
- T2 (FV-D0): 10 t/ha de fumier de vache + 0 t/ha de chaux,
- T3 (FC-D0): 10 t/ha de fumier de chèvre + 0 t/ha de chaux,
- T4 (TI-D0) : 10 t/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 0 t/ha de chaux
- T5 (LA-D0): 10 t/ha de compost de *Lantana camara* + 0 t/ha de chaux

- T6 (TE-D2): Témoin (0 t/ha de fumure organique + 2 t/ha de chaux),
- T7 (FV-D2): 10 t/ha de fumier de vache + 2 t/ha de chaux,
- T8 (FC-D2): 10 t/ha de fumier de chèvre + 2 t/ha de chaux,
- T9 (TI-D2) : 10 t/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 2 t/ha de chaux
- T10 (LA-D2): 10 t/ha de compost de *Lantana camara* + 2 t/ha de chaux
- T11 (TE-D4): Témoin (0 t/ha de fumure organique + 4 t/ha de chaux),
- T12 (FV-D4): 10 t/ha de fumier de vache + 4 t/ha de chaux,
- T13 (FC-D4) : 10 t/ha de fumier de chèvre + 4 t/ha de chaux,
- T14 (TI-D4): 10 t/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 4 t/ha de chaux
- T15 (LA-D4): 10 t/ha de compost de *Lantana camara*+ 4 t/ha de chaux

Dans ce travail, les fumiers de vache et de chèvre utilisés provenaient des fermes des agri-éleveurs de la région environnante. Les composts de *Lantana camara,* de *Tithonia diversifolia* ont été préparés sur place par compostage en fosses pendant une durée de trois semaines pour la décomposition. La dolomie utilisée a été commandée au marché selon les procédures en vigueur. La composition de cet amendement est de 28% de CaO et 19% de MgO.

L'application de la dolomie a été faite par l'épandage en commençant par la bordure de la parcelle et ensuite en appliquant la chaux de manière homogène à l'intérieur. La quantité de la dolomie à appliquer a été calculée en recourant à la formule de Yamoah et al. (1990).

L'application de cette formule pour le sol de Zege, dont le pH est de 4,2, aboutit à la dose de 4 t/ha de dolomie. En ayant comme hypothèse que les fumures organiques utilisées dans cet essai possèdent un effet chaulant, nous avons retenu aussi une dose moitié (c'est à dire de 2 t/ha de dolomie) en espérant que, en combinaison avec une fumure organique, elle sera aussi efficace dans la correction de l'acidité que la dose de 4 t/ha.

Les quantités de matière organique et de dolomie à appliquer dans chaque traitement ont été calculées de manières suivantes:

- ❖ Pour la matière organique/traitement, on a pris comme références 10t x S/ha et ceci a été faite sur trois répétitions et sur chaque type de fumier.
- ❖ Pour la chaux dolomitique/traitement, la dose a été calculée de deux manière différente :
    - Premièrement, on a utilisé 2 t/ha: 2 t x S/ha;
    - Deuxièmement, on a utilisé 4 t/ha: 4 t x S/ha.

III.4.2 Semis, travaux d'entretien et récolte du haricot

Cette culture a été plantée sur tous ces 15 traitements avec les écartements de 20 cm x 40 cm en raison 2 graines par poquets. La trouaison était faite dans les sens perpendiculaire de la pente du terrain. La variété cultivée provenait du CIAT avec code d'origine CODMLB003. Elle a été introduite au Burundi par l'ISABU en 2008 et distribuée aux agriculteurs en 2015 avec le nom local de *rufutamadeni* ou *mutwenzi* en Kirundi.

L'application des engrais organo-minéraux (FOMI) dans tous les traitements est basée sur une dose recommandée de 200 kg de Fomi-Imbura (correspondant au 18 N, 44 P, 8 K, 26 Ca et 4 Mg). Le semis a été réalisé en date du 18 février 2023.

Le sarclage a été effectué en 2 passages. Le premier sarclage a eu lieu le treizième jour après le semis tandis que le second a été réalisé à la 29ème jour après le semis. Le sarclage se faisait manuellement à l'aide des houx. La récolté du haricot a eu lieu le 18 mai 2023, c'est-à-dire au 90ème jour après le semis.

III.4.3 Echantillonnage de sols et prétraitement des échantillons de sol

Avant l'expérimentation, un échantillon composite de surface a été prélevé avant le labour du terrain et son pH a été mesuré. Ce dernier était de 4.2.

En septembre 2023, après une saison culturale du haricot et juste avant l'installation de la culture du maïs, des échantillons de sols ont été prélevés dans les 45 parcelles élémentaires pour en déduire les modifications au niveau des propriétés physico-chimiques.

Lesdits échantillons étaient des échantillons composites de surface (20 cm supérieurs) composés par 4 prélèvements élémentaires de surface (10-20 cm supérieurs) collectés avec une tarière.

Pour ce faire, les sous-échantillons de sol étaient soigneusement mélangés ; et puis, un échantillon composite d'environ 400 - 600 g était prélevé en réduisant le volume du mélange par la méthode de quartage.

Ensuite, les échantillons composites étaient emballés dans des sachets en polyéthylène étiquetés avec les codes respectivement pour les trois brocs.

Les échantillons étaient transportés vers un endroit du décanat de la Faculté d'Agronomie et de Bio Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi pour le séchage, nous avons fait le triage des agrégats ou toute sorte de matière végétale et le tamisage avant de rendre toute analyse de

laboratoire. Après séchage à l'air libre pendant 21 jours, les échantillons ont été émottés par une pression modérée à l'aide d'une bouteille bien soigné, puis ont été passés sur le tamis de 2 mm d'ouverture. Le tamisât a été récupéré pour les analyses physicochimiques.

III.4.4 Méthodes d'analyse des sols utilisées au laboratoire

Les analyses ont porté sur les paramètres suivant: le pH (pH H_2O et pH KCl), la conductivité électrique, azote total et carbone organique, le phosphore assimilable, la CEC, les bases échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) et l'acidité d'échange (Al^{3+}, H^{+}), tous ont été analysés au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Les méthodes d'analyse des sols utilisées au laboratoire sont présentées au Tableau 4.

Tableau 4: Méthodes d'analyse des sols utilisées au laboratoire

Nature d'analyse ou test	**Description de méthode d'analyse**
Prétraitement des échantillons pour analyses (séchage, broyage et tamisage)	Séchage à l'air, broyage manuel ou avec broyeur, tamisage
pH (H_2O)	Rapport sol : eau =1 :5
pH (KCl)	Rapport sol : KCl=1 :5
Conductivité électrique (C.E.)	Rapport sol : eau=1 :5
Azote totale	Méthode interne: Méthode Kjeldahl modifiée, dosage volumétrique, méthode interne Méthode normalisée: Méthode Kjeldahl modifiée, dosage volumétrique
Carbone organique	Méthode interne ou M.A.405- C.1.1 : Oxydation sulfochromique et dosage volumétrique, méthode interne ou M.A.405- C.1.1 (Centre d'expertise du Québec)
Phosphore assimilable	Méthode d'Olsen: Extraction par NaHCO3 / dosage par UV-spectrophotométrie
Bases échangeables (Na, K, Ca,Mg)	Extraction par agitation ou par percolation à l'acétate d'ammonium et dosage par SAA/flamme NF X 31-108 Méthode interne

Nature d'analyse ou test	**Description de méthode d'analyse**
Capacité d'échange cationique (CEC)	Méthode à l'acétate d'ammonium NF X 31-130 Méthode interne
Acidité échangeable	Méthode volumétrique après l'extraction avec KCl
Cations solubles dans l'eau (Na, K, Ca, Mg	Dosage par SAA/flamme après avoir solubilisé dans l'eau ; rapport sol/eau=1/5

III.4.5 Traitement statistique

Le traitement des données a été réalisé par analyse de la variance (ANOVA) avec SPSS 16 pour tester s'il existerait une différence significative entre les différents traitements pour chaque variable. Au cas où, la différence significative était notée ($p<0,05$), un classement des groupes de moyennes homogènes était réalisé en recourant à la comparaison multiple des moyennes à l'aide du test de post Hoc de Tukey.

De plus, le logiciel ArcGis a servi de cartographier le site de notre étude. Les graphiques ont été tracés à l'aide de Microsoft Excel 2016.

CHAPITRE IV: PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1 Présentation et interprétation des résultats

IV.1.1 Propriétés des fumiers et composts utilisés dans l'expérimentation

Les caractéristiques chimiques des fumiers et des composts utilisés dans l'essai (fumiers de vache et de chèvre et composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*) sont reprises dans le Tableau 5.

L'analyse de ces propriétés montre que les plus grandes valeurs des paramètres analysés, c'est-à-dire pH, CE, CO, N, C/N, sont obtenues dans le fumier de chèvre avec des valeurs respectives de 9.43, 10.850 (ds/m), 29.1%, 2.53% et 11.5. De même, les pourcentages les plus élevés en CaO, MgO, K_2O et Na_2O sont obtenues dans le fumier de chèvre. Ce type de fumier est suivi immédiatement par le fumier de vache.

Tableau 5: Caractéristiques chimiques des fumures organiques utilisés dans l'essai

N°	N° labo	Description d'échantillon	pH eau (1/5)	CE (ds/m)	CO (%)	N tot (%)	C/N	Ca tot (% CaO)	Mg tot (% MgO)	K tot (% K_2O)	Na tot (% Na_2O)
1	M 1702	Fumier de vache	8,76	8,120	19,1	1,87	10,2	1,42	1,14	3,15	0,083
2	M 1704	Fumier de chèvre	9,43	10,850	29,1	2,53	11,5	2,75	1,66	5,14	0,243
3	M 1705	Compost de *Tithonia diversifolia*	7,69	1,591	2,09	0,324	6,5	0,322	0,13	0,464	0,013
4	M 1706	Compost *Lantana camara*	7,34	0,733	6,63	0,640	10,4	0,341	0,17	0,270	0,014

IV.1.2 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le pH du sol

Les valeurs moyennes du pH des échantillons de sols des parcelles élémentaires prélevés après une saison culturale du haricot varient de 4,6 à 5,5 ; valeurs détenues respectivement par les traitements au compost de *Tithonia diversifolia* sans dolomie et de *Lantana camara* avec 4 t de dolomie par hectare (Figure 10).

L'ANOVA réalisée avec les résultats du pH montre qu'il y a une différence très hautement significative entre les différents traitements (p value=0,000). En examinant la ségrégation des traitements en groupes de moyennes homogènes, on constate que les parcelles amendées avec les doses de 4 t/ha de dolomie quel que soit l'amendement organique appliquée ont vu leur pH augmenter sensiblement aux valeurs supérieures ou égales à 5. D'autre part, les pH des parcelles amendés avec 4 t/ha de dolomie ne sont pas statistiquement différents de ceux des parcelles amendées avec 2 t/ha de dolomie sauf le cas du LC-D4 qui est significativement différents de FV-D2.

En outre, on observe que l'augmentation de la dose de la dolomie s'accompagne de l'augmentation du pH du sol.

Le pH du sol était de 4,2 au début de l'essai a changé remarquablement dans presque tous les traitements. Des variations du pH permettent de ranger les groupes par ordre décroissant de la façon suivante: LA-D4 ≥ FC-D4 ≥ FC-D2 ≥ FV-D4 ≥ TI-D2 ≥ TI-D4 ≥ TE-D4 ≥ LA-D2 ≥ TE-D2 ≥ FC-D0≥ FV-D0 ≥ TE-D0 ≥ LA-D0 ≥ TI-D0.

Néanmoins, le test de Tukey au seuil de 5% montre l'existence de 3 groupes des moyennes homogènes qui se chevauchent pour cette variable pHeau.

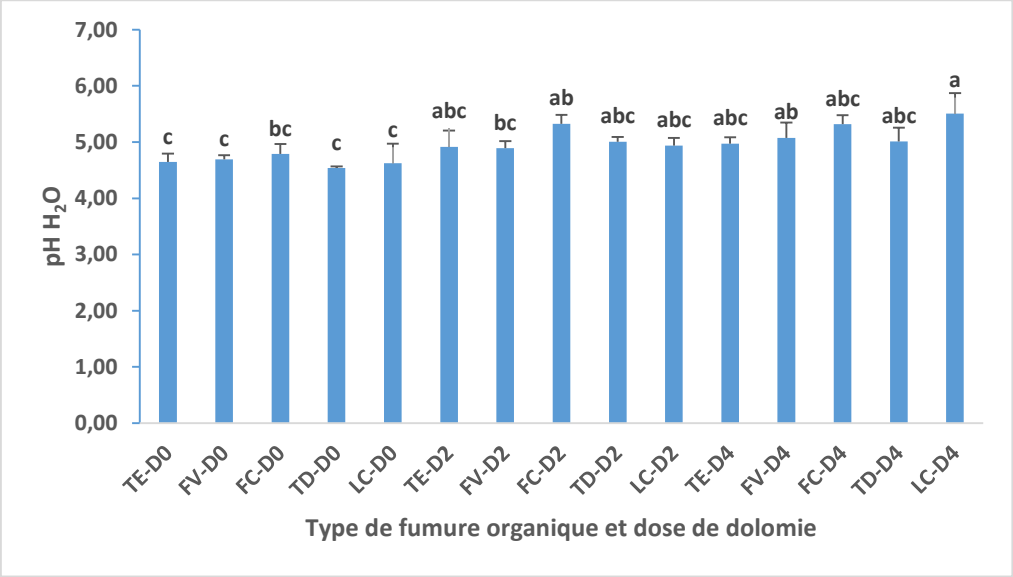


Figure 10: Effet de la matière organique et de la dolomie sur le pH eau du sol

TE : témoin ; FV : fumier de vache ; FC : fumier de chèvre ; TD: compost de Tithonia diversifolia ; LC : compost de Lantana camara ; D0 : dose 0 t/ha de dolomie ; D2 : dose de 2 t/ha de dolomie ; D4: dose de 4 t/ha de dolomie.

Note : Histogramme des moyennes ; les barres représentent les écart-types.
Les traitements suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement au seuil de 5% de probabilité.

IV.1.3 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le carbone organique et sur l'azote total du sol

Les pourcentages moyens de carbone organique et d'azote total des sols des parcelles expérimentales sont montrés au Tableau 6. Ils varient de 1,5 à 1,7 % pour le CO et de 0,11 à 0,25 % pour l'azote. Les valeurs du rapport C/N sont comprises entre 6,6 et 14,71.

L'ANOVA réalisée pour ces résultats montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents traitements pour le CO et pour N total.

Tableau 6:Teneur en carbone organique et en azote total (%) des échantillons de sols des parcelles élémentaires (moyenne ± écart-type)

Traitements	Carbone organique (%)	Azote total (%)	C/N
TE-D0	1,64±0,12a	0,25±0,23a	6,60
FV-D0	1,60±0,10a	0,14±0,03a	11,09
FC-D0	1,55±0,14a	0,12±0,06a	13,41
TD-D0	1,59±0,19a	0,15±0,09a	10,44
LC-D0	1,59±0,18a	0,15±0,07a	9,94
TE-D2	1,71±0,17a	0,12±0,02a	14,71
FV-D2	1,55±0,05a	0,11±0,03a	14,05
FC-D2	1,71±0,12a	0,17±0,05a	10,32
TD-D2	1,65±0,14a	0,14±0,06a	11,68
LC-D2	1,57±0,07a	0,12±0,03a	12,93
TE-D4	1,66±0,08a	0,12±0,03a	13,90
FV-D4	1,59±0,13a	0,11±0,03a	13,86
FC-D4	1,63±0,09a	0,12±0,02a	13,81
TD-D4	1,68±0,04a	0,17±0,06a	10,12
LC-D4	1,74±0,05a	0,13±0,02a	13,19

Où TE : témoin ; FV : fumier de vache ; FC : fumier de chèvre ; TD : compost de Tithonia diversifolia ; LC : compost de Lantana camara ; D0 : dose 0 t/ha de dolomie ; D2 : dose de 2 t/ha de dolomie ; D4: dose de 4 t/ha de dolomie. Les traitements suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement différents au seuil de 5% de probabilité

IV.1.4 Effet de la matière organique et de la dolomie sur les teneurs en cations échangeables et la capacité d'échange cationique

Les teneurs en cation échangeables, la capacité d'échange cationique effective (CECE) et la capacité d'échange cationique (CEC) mesurées expérimentalement sont montrées au Tableau 7.

Les teneurs en calcium varient de 0,65 à 2,54meq/100 g ; les valeurs extrêmes ayant été enregistrées respectivement dans les traitements au compost de *Tithonia diversifolia* avec 0 t/ha de dolomie et au compost de *Lantana camara* combiné à 4 t/ha de dolomie. Quant aux effets de la dolomie sur la teneur en cation, il est constaté que ce sont les traitements pour lesquels il y a eu l'application de doses relativement supérieures de dolomie qui présentent des niveaux

élevés en Ca. Il est à noter que les traitements à la dose de 2 t/ha de dolomie ne diffèrent pas significativement à ceux de la dose de 4 t/ha de dolomie.

Les teneurs en Mg varient de 0,44 à 1,7 meq/100 g ; valeurs observées dans les traitements témoin et au compost de *Lantana camara* combiné à la dose de dolomie de 4 t/ha respectivement. Les teneurs en K échangeable sont comprises entre 0,02 à 0,44 meq/100 g, les valeurs en registrées sur l'utilisation du compost de *Lantana camara* combiné à la dose de dolomie de 2 t/ha et dans le traitement réalisé avec du fumier de chèvre associé à 2 t/ha de dolomie.

Tableau 7:Teneurs en cation échangeables et capacité d'échange cationique des échantillons de sols des parcelles expérimentales (meq/100 g) (moyenne ± écart type)

	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CECE	CEC
TE-D0	0,87±0,18b	0,44±0,10a	0,12±0,06a	0,14±0,03a	0,25±0,44	1,43±0,50a	3,26±0,56a	8,69±0,36a
FV-D0	0,92±0,39b	1,19±1,29a	0,23±0,07a	0,17±0,09a	0,33±0,29	1,42±0,41a	4,25±1,11a	9,11±1,63a
FC-D0	0,86±0,12b	0,88±0,52a	0,28±0,22a	0,16±0,11a	0,15±0,18	1,11±0,23abc	3,43±0,46a	8,62±0,76a
TD-D0	0,65±0,08b	0,75±0,70a	0,11±0,09a	0,17±0,22a	0,70±0,66	1,28±0,33ab	3,66±1,25a	8,04±0,22a
LC-D0	0,73±0,20b	0,50±0,02a	0,15±0,15a	0,11±0,01a	0,69±0,27	1,36±0,40ab	3,54±0,27a	9,20±1,89a
TE-D2	1,46±0,88ab	0,99±0,18a	0,12±0,11a	0,10±0,08a	0,17±0,29	1,03±0,33abc	3,87±0,69a	8,39±0,49a
FV-D2	1,44±0,41ab	1,09±0,33a	0,17±0,06a	0,14±0,13a	0,20±0,35	1,08±0,35abc	4,13±1,09a	7,91±0,73a
FC-D2	1,99±0,20ab	1,28±0,38a	0,44±0,38a	0,23±0,21a	0,00±0,00	0,58±0,32abc	4,52±1,11a	8,83±1,04a
TD-D2	1,56±0,09ab	1,17±0,39a	0,14±0,11a	0,06±0,05a	0,00±0,22	1,05±0,05abc	3,98±0,39a	9,04±1,96a
LC-D2	1,43±0,23ab	0,92±0,24a	0,02±0,02a	0,08±0,04a	0,18±0,22	1,83±0,37abc	3,55±0,50a	11,25±6,11a
TE-D4	1,71±0,51ab	1,28±0,24a	0,12±0,07a	0,16±0,10a	0,00±0,00	0,88±0,11abc	4,14±0,63a	8,69±1,87a
FV-D4	1,82±0,47ab	1,17±0,60a	0,13±0,06a	0,10±0,13a	0,00±0,00	0,72±0,31abc	3,95±0,78a	8,85±1,34a
FC-D4	2,08±0,52ab	1,59±0,71a	0,22±0,16a	0,06±0,05a	0,00±0,00	0,43±0,27bc	4,39±1,31a	8,85±1,76a
TD-D4	2,10±1,10ab	1,59±1,15a	0,13±0,01a	0,09±0,00a	0,07±0,12	0,85±0,40abc	4,83±1,87a	9,49±0,43a
LC-D4	2,54±0,74a	1,66±0,01a	0,08±0,06a	0,16±0,14a	0,00±0,00	0,30±0,19c	4,74±0,47a	9,06±1,47a

TE : témoin ; FV : fumier de vache ; FC : fumier de chèvre ; TD : compost de Tithonia diversifolia ; LC : compost de Lantana camara ; D0 : dose 0 t/ha de dolomie ; D2 : dose de 2 t/ha de dolomie ; D4: dose de 4 t/ha de dolomie.
Note : Les traitements suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement au seuil de 5% de probabilité.
Les chiffres suivis de la même lettre dans une même colonne sont statistiquement différents au seuil de 5% de probabilité.

Dans les parcelles expérimentales de cette étude, les valeurs de la teneur en aluminium s'étendent de 0,0 à 0,70 meq/100 g (Tableau 7). Les valeurs nulles ont été observées dans tous les traitements à la dose de 4 t/ha de dolomie (sauf celui de *Tithionia diversifolia*) et dans les traitements à la dose de 2 t/ha de dolomie et fumier de chèvre et *Tithionia diversifolia*. Les valeurs très élevées en Al^{3+} (> 0,2 meq/100 g) ont été enregistrées dans les traitements sans dolomie mais avec application du fumier de vache ou des composts de *Lantana camara* et de *Tithionia diversifolia*.

Quant aux effets de la dolomie sur la teneur en Al^{3+}, il est constaté que ce sont les traitements pour lesquels il y a eu applications de doses relativement supérieures de dolomie qui présentent la réduction de l'Al^{3+}.

Les valeurs de la capacité d'échange cationique effective (CECE) sont comprises entre 3,26 à 4,83 meq /100 g (Tableau 7); ces valeurs respectives étant celles du témoin sans dolomie et du traitement au compost de *Tithonia diversifolia* associé à 4 t/ha de la dolomie.

IV.1.5 Effet de la matière organique et de la dolomie sur le taux de saturation en bases

Les pourcentages moyens de taux de saturation en bases des sols des différents traitements sont montrés à la Figure 11. Ils varient de 41,72 et 93,61%, valeurs respectivement observées pour le compost de *Lantana camara* sans combinaison avec la dolomie et pour le compost de *Lantana camara* combiné avec 4 t/ha de dolomie.

En examinant les résultats d'ANOVA pour le taux de saturation en bases Figure 10, on remarque qu'il y a une différence significative entre les différents traitements (p value=0,000). Globalement, il n'y a pas de différence significative entre les traitements aux doses de 2 t/ha et de 4 t/ha combinée au fumier de chèvre d'une part et de ces 2 groupes de traitements mais avec une différence significative à celui de 0 t/ha combinée au fumier de chèvre d'autre part. Le fumier de chèvre montre déjà un effet chaulant significatif.

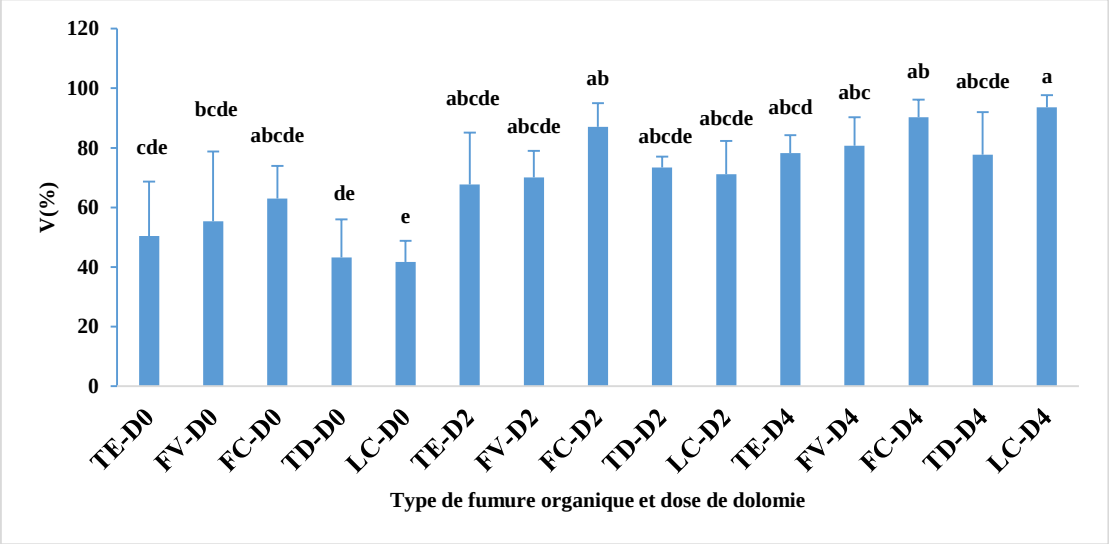


Figure 11:Effet de matière organique et de la dolomie sur le taux de saturation en bases

TE : témoin ; FV : fumier de vache ; FC : fumier de chèvre ; TD : compost de Tithonia diversifolia ; LC : compost de Lantana camara ; D0 : dose 0 t/ha de dolomie ; D2 : dose de 2 t/ha de dolomie ; D4: dose de 4 t/ha de dolomie.

Note : Histogramme des moyennes ; les barres représentent les écart-types.

Les traitements suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement au seuil de 5% de probabilité.

IV.2 Discussion des résultats

IV.2.1 Caractéristiques des fumiers et composts utilisés dans l'expérimentation

Le pH de toutes ces fumures organique et composts est supérieur à 7, c'est-à-dire qu'il est alcalin ; cela signifie que ces fumures sont matures. En effet les valeurs du pH sont conformes aux normes prescrites par d'autres recherches qui montrent que le pH d'un bon compost doit être compris entre 7 et 9 (Tirichine et al., 2017). De tels pH donnent des conditions favorables à l'amélioration des propriétés et à la disponibilité des cations du sol.

Selon Namkoong et al. (2013), les composts avec un rapport C/N compris entre 10-15 sont jugés de compost mature. Partant de cette logique seul le compost de *Tithonia diversifolia* n'est pas mature par rapport au fumier de vache, de chèvre et au compost de *Lantana camara* utilisés dans notre étude.

S'agissant de l'azote (N), on constate que seul le fumier de chèvre et de vaches qui sont bon pour l'agriculture. En effet les composts de fumier de ferme et des espèces contenant de l'azote supérieur à 1% peut être utilisé en agriculture comme engrais (Rechcigl & MacKinnon, 1997).

IV.2.2 Le pH du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie

L'analyse des pH des sols prélevés dans les parcelles expérimentales après une saison culturale révèle que les parcelles amendées avec les doses de 4 t/ha de dolomie et celles amendées avec 2 t/ha combiné au fumier de chèvre et au compost de *Tithonia diversifolia* ont des pH supérieures ou égales à 5,0. La dose de la dolomie est un facteur à prendre comme élément important dans la correction du sol acide. D'après Nabahungu & Ruganzu (2005) l'application du fumier ou du compost combinés avec de la dolomie améliore le pH du sol.

La contribution de la fumure organique à l'augmentation du pH ne se fait pas beaucoup observer. On notera néanmoins la contribution du fumier de chèvre appliquée sur le sol amendé avec 2 t/ha de dolomie dont les effets semblent approcher ceux des traitements à la dose de 4 t/ha de dolomie. Cette distinction du fumier de chèvre est sans nul doute due à ses caractéristiques particulières montrées au Tableau 3.

Selon Niyungeko et al. (2022b), l'application des amendements organiques tels que les fumiers et les différents types de compost pourraient contribuer à l'amélioration des propriétés du sol acides puisqu'ils produisent des substances organiques qui sont d'une importante majeure pour la mobilisation de certains propriétés chimique du sol.

IV.2.3 Le carbone organique du sol et l'azote total du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie

Après une période de 8 mois d'exploitation, les pourcentages moyens de CO obtenus dans toutes ces parcelles sont classés de normaux selon E. Tessens E & J Gourdin (1993) et de très faibles selon J.R. Landon (1991). Ce faible taux de carbone organique et azote pourrait être due à une minéralisation rapide des fumiers et composts.

Les teneurs en azote total sont quant à eux faibles selon J.R. Landon (1991) et E. Tessens E & J Gourdin (1993); c'est-à-dire des pourcentages compris entre 0,1 et 0,2%. Ces faibles taux d'azote seraient dus aux faibles apports d'azote dans les fumiers et les engrais du fait que le sol était déjà pauvre en cet élément. Le rapport C/N est utilisé pour caractériser généralement les matières organiques se trouvant dans le sol, un sol composant un rapport C/N ≤ à 9 montre une bonne humification alors que les valeurs ≥12 sont indicatrices des sols à difficultés de la minéralisation de la matière organique (Nijimbere et al., 2021). Pour le cas d'un sol étudié les rapports C/N sont globalement plus de 9. Il apparait ici que le sol étudié a des difficultés de minéralisation.

IV.2.4 Les teneurs en cations échangeables et la capacité d'échange cationique du sol sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie

En se référant aux normes de E. Tessens E & J. Gourdin, (1993) et J.R. Landon, (1991), nous remarquons que les parcelles expérimentales accusent un niveau de calcium faible (c'est-à-dire des teneurs comprises entre 0,2 à 4 meq/100 g), des teneurs bonnes à très bonnes de magnésium (Mg > 0,5 meq/100 g) sauf celle de la parcelle témoin dont la teneur en magnésium est moyenne (0,2 meq/100 g < Mg<0,5 meq/100 g), des teneurs en potassium faibles à très faibles dans la majorité des traitements (K < 0,2 meq/100 g) sauf dans les traitements au fumier de vache (dose 2 et 4 t/ha de dolomie) et de fumier de chèvre (dose de 0, 2 et 4 t/ha de dolomie) où la teneur des sols en potassium sont moyennes (0,2 < K < 0,4).

La toxicité de l'aluminium est restée remarquable (Al^{3+}< 2 meq/100 g). Selon E. Tessens E & J Gourdin, (1993), dans les traitements n'ayant pas connu d'application de la chaux sauf les cas d'application du fumier de chèvre. Cela démontre les effets positifs de la chaux et du fumier de chèvre dans la neutralisation de l'aluminium. La présence de l'aluminium sous la forme Al^{3+} s'observe normalement au pH inférieur de 5,5 J.R. Landon, (1991).

Pour le sol étudié, les valeurs de la CEC déterminée expérimentalement varient de 7,91 à 11,25 meq/100 g, ces CEC sont jugées faibles en se référant aux normes de J.R. Landon (1991), c'est-à-dire des CEC comprises entre 5 et 15 meq/100 g.

Les valeurs de la CECE calculée sont largement inférieures à celle de la CEC dans les sols de toutes les parcelles expérimentales. Cela traduit la présence d'une grande quantité des substances à charges variables dans le sol. Celles-ci peuvent provenir essentiellement de la kaolinite, des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et de la matière organique (Nijimbere et al., 2021).

Les résultats des cations échangeables obtenus dans les quinze traitements n'ont pas montré une différence significative entre les traitements à l'exception du calcium et l'aluminium qui ont montré une différence hautement significative. Globalement, l'absence de différence significative entre les traitements pour le plus grand nombre de cations échangeables pourrait être due à la durée du travail qui était très courte (d'une seule saison culturale de six mois). Selon Bikienga (1997) et Fattah, (2018) les effets de l'application de la dolomie et de matière organique se manifestent à la deuxième année ou à la troisième année.

IV.2.5 L'évolution de taux de saturation en base sous l'influence des amendements organiques et de la dolomie

Les sols étudiés présentent des taux de saturation en bases supérieurs à 40% ; ce qui traduit que ce sont des niveaux qui ne sont pas faibles mais plutôt bons à élevés selon les normes de Tessens E & Gourdin J. (1993). Pour ce paramètre, il faut signaler que les traitements à la dose de 4 t/ha de dolomie combinés au fumier de vache (FV-D4), au fumier de chèvre (FC-D4) et au compost de *Lantana camara* (LC-D4) ainsi que celui réalisé avec la dose de 2 t/ha de chaux combiné au fumier de chèvre (FC-D2) ont montré des taux de saturation en bases de niveau élevé (V>80%). Le constat est que, d'une part, la dose de la dolomie a eu l'effet sur le taux de saturation en bases, et que le fumier de chèvre améliore le taux de saturation en bases. L'effet de ce dernier serait à relier avec sa grande teneur en cations basiques. Cet argument est identique à celui de Fattah (2018) disant que le fumier de ferme peut avoir des niveaux élevés de certaines propriétés du sol dus aux grandes quantités des sels minéraux ajoutés aux rations alimentaires des animaux. Selon Caprina, (1968), le fumier de chèvre est un bon engrais pour l'agriculture puisqu'il possède une grande concentration de nutriments.

CONCLUSION

Ce travail de recherche avait comme l'objectif général d'identifier la méthode efficace de correction de l'acidité d'un sol d'altitude du Burundi. Les combinaisons de 3 doses de la chaux dolomitique (0 t/ha, 2 t/ha et 4 t/ha) et de 4 types de fumures organiques (fumiers de vache et de chèvre, composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*) ont été testées pour leurs effets sur les propriétés du sol ferralitique de pH 4,2. Les différents paramètres évalués étaient le pH (pH H2O et pH KCl), la conductivité électrique, azote total, carbone organique, la CEC, CECE, les cations échangeables ($Ca2^+$, $Mg2^+$, K^+, $Al3^+$, H^+) et le taux de saturation en base.

Après une saison culturale du haricot, les résultats obtenus ont montré que la dolomie, appliquée à la dose de 4 t/ha (calculée avec la formule de Yamoah (1990)) améliore significativement le pH du sol, les teneurs en Ca et le taux de saturation en bases. En même temps, elle réduit significativement la teneur en aluminium.

S'agissant des effets des matières organiques, ceux-ci ne sont pas encore remarquables pour la simple raison qu'ils doivent être cumulatifs durant un certain nombre de cultures successives. Par contre, le fumier de chèvre montre déjà un effet chaulant significativement plus élevé que celui des autres fumures utilisées.

En définitive, la dose de dolomie calculée à l'aide de la formule de Yamoah (1990) améliore significativement les propriétés du ferralsol extrêmement acide du Burundi.

A l'issue de cette étude, nous aimerions émettre des perspectives pour les études futures dans le domaine de la gestion des sols. L'extension de cette étude à plusieurs saisons culturales et sur plusieurs sites expérimentaux aux sols à réaction différente (pH différents) serait avantageuse pour avoir une conclusion tenante sur le mode de correction efficace des sols acides.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Angui, K., Gone, D., & Djebre, S. (2010). Effets comparés d'incuit de chaux et de dolomie sur quelques paramètres chimiques d'un sol ferrallitique et d'un sol organique au Sud de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, *21*(2). https://doi.org/10.4314/aga.v21i2.49805

Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., & Griffis, T. J. (2007). Tillage and soil carbon sequestration—what do we really know? *Agriculture, ecosystems & environment*, *118*(1-4), 1-5.

Barik, S. S., Sahoo, R. P., & Barik, S. S. (2020). Lantana camara L. : An emerging threat to native flora and livestock: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *9*(5), 2363-2366.

Batubara, S. F., Santoso, A. B., & El Ramija, K. (2021). Potential of goat manure as organic fertilizer in North Sumatera. *BIO Web of Conferences*, *33*, 05001. https://doi.org/10.1051/bioconf/20213305001

Bidou, J.-E. (1990). Erosion des sols au Burundi. *Pays enclavés*, *3*(1), 2-20.

Bikienga, I. M. (1997). Evaluation agronomique et perspectives d'utilisation agricole des calcaires dolomitiques de tiara et de souroukoudinga, pres de bobo - dioulasso.

Bonneau, m., & souchier, b. (1979). Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. *Edition Masson, Paris*. https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6406485

Brabant, P. (2008). *Activités humaines et dégradation des terres*. 369.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2014). Elements of the Nature and Properties of Soils (3. ed., Pearson New Internat. Edition). Pearson.

Brunelle, A. (2005). Comment lire un profil du sol?

Calvet, R. (2003). The Soil properties and function : Tom I and II. *Ed Dunod*.

Caprina. (1968). Le fumier de chèvre : La Rolls des engrais *!* - *RTBF Actus*. https://www.rtbf.be/article/le-fumier-de-chevre-la-rolls-des-engrais-11216790

Chamayou, H., Legros, J.-P., & de Coopération Culturelle, A. (1989). Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol.

Chammari, A., Naon, B., Cherblanc, F., & Bénet, J.-C. (2003). Transfert d'eau en sol aride avec changement de phase. *Comptes rendus. Mécanique*, *331*(11), 759-765.

Chaussod, R. (2009). Présentation journée « matières organiques ». Estagel.

Christian, C. (2012). Fumier de bovins et compost.

Coll, P., & Velly, R. L. (2012). Associer perceptions et analyses des scientifiques et des viticulteurs. *Etude et Gestion des Sols*.

Coudurier, C., & Bourgogne, A. (2012). Guide pédagogique, Les sols terreau fertile pour l'EEDD. 1, 32.

CTA. (1995). L'agroforesterie pour la conservation des sols. https://www.nzdl.org/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0unesco--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-------0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-0utfZz-8-00&cl=CL2.1&d=HASH9378ce25b59da31b13e0fb.7.5&gt=1

Day, M. D., Wiley, C. J., Playford, J., & Zalucki, M. P. (2003). Lantana : Current management status and future prospects. https://ageconsearch.umn.edu/record/114054/files/102.pdf

De Deyn, G. B., & Van der Putten, W. H. (2005). Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in ecology & evolution*, *20*(11), 625-633.

Derdour, H., Laverdière, M. R., & Angers, D. A. (1993). Caractérisation de l'espace poral d'un sol argileux : Effets de ses constituants et du travail du sol. *Canadian Journal of Soil Science*, *73*(3), 299-307. https://doi.org/10.4141/cjss93-032

Dounya, B., & Asma, M. (2021). *Thème :* Etude comparative de la litière forestière dans la région de Mahouna (Guelma) et dans la forêt du Lac Tonga (El-Kala) : *Cas du chêne zeen et de chêne liège*.

Duchaufour, P. (2001). Introduction à la science du sol 6 ème édition de l'abrégé de pédologie. *Paris: DUNOD Editeur*, 203-206.

Duchaufour, P. (2004). Introduction à la science du sol-6éme Ed de l'abrégé de pédologie dunod.

Duchaufour, P., & Jocquin, F. (1966). Norelles recherche Sur l'extractation at le fractionnement descompases humiques. *Bull. ecols. Nat. Sup. Agron. Nancy*, *8*(1), l-24.

ELD. (2019). La dégradation des terres versus la gestion durable des terres. https://www.eld-initiative.org/fileadmin/Knowledge_Hub/ELD_Campus/French_material/Modul_La_degradation_des_terres_191022_www.pdf

Khudhair, M. (2019). Soil Texture. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23281.02404

Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Nutrient availability. Encyclopedia of Soils in the Environment, *3*, 63-71.

FAO. (2021). Lime and Dolomite Applications in Sustainable Agriculture." Food and Agriculture Organization of the United Nations Report. FAO. https://doi.org/10.4060/cb4476en

FAO. (1989). Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée : Directives. Bulletin pédagogique de la FAO n°55. (s. d.). Consulté 20 décembre 2024, à l'adresse https://www.sciepub.com/reference/107318

FAO, (1988). *Directives :* Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée. Bulletin pédagogique de la FAO n°55.

Fary, D. (1996). Rôle de la structure du sol dans son fonctionnement hydrique. Sa quantification par la courbe de retrait. Université Cheikh AntaDiop de Dakar.

Fattah, A. A. (2018). *E*tude de l'effet de trois types de compost sur une culture de maïs et sur les caractéristiques chimiques des sols (zone de Touggourt). http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/11037/1/ABID_Abdel_Fattah.pdf

Fernández, L. A., Zalba, P., Gómez, M. A., & Sagardoy, M. A. (2007). Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, *43*(6), 805-809. https://doi.org/10.1007/s00374-007-0172-3

FOLUR. (2023). Utilisation de la chaux agricole. Manuel du technicien- 1ère version.

Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., & Bock, L. (2009). L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4—Sol 1 de « L'Etat de l'Environnement wallon 2006-2007 »). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*

George, E., Horst, W. J., & Neumann, E. (2012). Adaptation of plants to adverse chemical soil conditions. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (p. 409-472). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123849052000170

Giroux, M., & Tran, T. S. (1987). Comparaison de différentes méthodes d'analyse de l'azote du sol en relation avec sa disponibilité pour les plantes. *Canadian Journal of Soil Science*, *67*(3), 521-531. https://doi.org/10.4141/cjss87-049

Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010a). Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.

Graymont. (2019). La chaux dolomitique vive.

Gros, R. (2002). Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origines anthropiques : Réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique [PhD Thesis, Université de Savoie]. https://theses.hal.science/tel-00006161/

Harter, P. R. D. (2007). Les sols acides des tropiques. 12.

Hicintuka, C., & Masilya, P. M. (2013). Gestion optimale et intégrée de la fertilité des sols acides du Burundi. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, *Hors-série 17*.

Hodgson, L. (2022, janvier 7). Pourquoi le bon pH est-il important dans le potager? Jardinier paresseux. https://jardinierparesseux.com/2022/01/07/pourquoi-le-bon-ph-est-il-important-dans-le-potager/

Huber, G., & Schaub, C. (2011). La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. *Agriculture et terroir, chambre d'agriculture Bas Rhin*. https://aube-haute-marne.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/67_fertilite_des_sols_importance_matiere_organique_2011.pdf

ISABU. (2021). Cartographie de la fertilité des sols du Burundi : Edition 2022.

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

Yves, M. (2016). Chapitre iii: les constituants solides du sol (p. 44).

J.R. Landon. (1991). Booker tropical soil manual : A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics | WorldCat.org. https://search.worldcat.org/title/869735805

Kaboneka, S. (2023). Emission avec le Professeur Salvator Kaboneka sur la plus-value des engrais organo-minéraux de Fomi. https://www.google.com/search?sca_esv=601437379&tbm=vid&sxsrf=ACQVn0_j4-Wma3evpEHMjls8eU4WXEX0NQ:1706201948250&q=salvator+kaboneka&sa=X&ved=2ahUKEwj3kKnIgfmDAxVATqQEHeC3BUcQ8ccDegQIDxAG&biw=1600&bih=739&dpr=1

Kaboneka, S., Kwizera, C., Nijimbere, S., Irakoze, W., Nsengiyumva, P., Ndihokubwayo, S., & Habonimana, B. (2021). Direct and residual fertilizer values of maize (Zea mays L.) stover co-composted with Tithonia diversifolia (Hemsl.) A. Gray green manure. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *7*(7), 6-17.

Kaboneka, S., Niyongabo, A., & Nijimbere, S. (2020). Effet de la combinaison DAP, chaux dolomitique et fientes de poule sur la réduction de la toxicité aluminique d'un sol acide d'altitude du Burundi. *Journal of the University of Burundi*, *28*(1), 9-15.

Kaeberlein, T., Lewis, K., & Epstein, S. S. (2002). Isolating « Uncultivable » Microorganisms in Pure Culture in a Simulated Natural Environment. *Science*, *296*(5570), 1127-1129. https://doi.org/10.1126/science.1070633

Koné, B., Diatta, S., Sylvester, O., Yoro, G., Mameri, C., Desiré, D. D., & Ayemou, A. (2009). Estimation de la fertilité potentielle des ferralsols par la couleur. *Canadian Journal of Soil Science*, *89*(3), 331-342. https://doi.org/10.4141/CJSS07119

Kuhad, R. C., Singh, S., Lata, & Singh, A. (2011). Phosphate-Solubilizing Microorganisms. In A. Singh, N. Parmar, & R. C. Kuhad (Éds.), *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol* (Vol. 108, p. 65-84). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7_4

Lahlou, S., Ouadia, M., Malam Issa, O., Le Bissonnais, Y., & Mrabet, R. (2005). Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine. *Etude et gestion des sols*, *12*(1), 69-76.

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

Landon, J. R. (1991). *Booker tropical soil manual : A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics | WorldCat.org*. https://search.worldcat.org/title/321006536

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European journal of soil biology*, *42*, S3-S15.

Le Villio, M., Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Le Bissonnais, Y., & Clergeot, D. (2001). Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. *Étude et gestion des sols*, *8*(1), 47-63.

Lindbo, D. L., Kozlowski, D. A., & Robinson, C. (2012). Know soil know life. *(No Title)*. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282269040517248

Manneville, O. (1999). Tourbières et marais. *Delachaux et Niestlé*.

Margo. (2024, janvier 17). Compostage du fumier de vache – Tout ce que vous devez savoir— HomeBiogas. https://www.homebiogas.com/blog/cow-manure-composting/, https://www.homebiogas.com/blog/cow-manure-composting/

Mathieu, C. (2016). La dégradation des sols en France et dans le monde, une catastrophe écologique ignorée. Planet-Vie. https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/la-degradation-des-sols-en-france-et-dans

MEEATU. (2011). Etude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi.

Mi, W., Ma, Q., Cao, X., & Wu, L. (2023). Soil Fertility Management for Sustainable Crop Production. *Agronomy*, *13*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/agronomy13041026

Mickaël, H. (2020). Faune du sol et production végétale. Planet-Vie. https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/faune-du-sol-et-production-vegetale

MINEAGRIE. (2022). Fiche technique de la vulgalisation agricole. 36.

MINEEATU. (2011). Etude sur les coûts de l'inaction contre la dégradation des sols au Burundi [Rapport final].

Mohamed, B. A. (2021). Prétraitement des échantillons pour analyse du sol des formations végétales a Marrubium vulgare L. a Hammam Bouhadjar (Wilaya d'Ain Témouchent). Université–Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib.

Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol* (Vol. 6). PPUR presses polytechniques. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=eGuqqoyF2bgC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Les+caracteristiques+du+sol&ots=glTRW27inw&sig=HZ10iFpfUuPnVlOEUXOv5Xrgmgw

Nabahungu, L., & Ruganzu, V. (2005). Effet du travertin et de Tithonia diversifolia sur la productivité du haricot volubile en sols acides du Rwanda.

Namkoong, W., Hwang, E.-Y., Cheong, J.-G., & Choi, J.-Y. (2013). A Comparative Evaluation of Maturity Parameters for Food Waste Composting. *Compost Science & Utilization*, *7*, 55-62. https://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701964

Nanjappa, H. V., Saravanane, P., & Ramachandrappa, B. K. (2005). Biology and management of Lantana camara L.–a review. *Agricultural Reviews*, *26*(4), 272-280.

Nijimbere, S., Kaboneka, S., Ndihokubwayo, S., Irakoze, W., & Ndikumana, J. (2021). *Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi)*.

Nill, D., & Nill, E. (1993). The efficient use of mulch layers to reduce runoff and soil loss.

Niyungeko, C., Ndikuriyo, L., Niyuhire, M.-C., Sindayihebura, A., Nihorimbere, M., Nkengurutse, J. C., Ntakiyiruta, P., Nijimbere, S., & Kaboneka, S. (2022). Evaluation des propriétés physicochimiques liées à la disponibilité du phosphore des différents types de sols du Burundi. 33.

Olabode, O. S., Sola, O., Akanbi, W. B., Adesina, G. O., & Babajide, P. A. (2007). Evaluation of Tithonia diversifolia (Hemsl.) A Gray for soil improvement. *World Journal of Agricultural Sciences*, *3*(4), 503-507.

Ontario. (2023). Les effets du fumier sur la teneur du sol en matière organique | ontario.ca. https://www.ontario.ca/fr/page/les-effets-du-fumier-sur-la-teneur-du-sol-en-matiere-organique

Onwosi, C. O., Ozoegwu, C. G., Nwagu, T. N., Nwobodo, T. N., Eke, I. E., Igbokwe, V. C., Ugwuoji, E. T., & Ugwuodo, C. J. (2022). Cattle manure as a sustainable bioenergy source : Prospects and environmental impacts of its utilization as a major feedstock in Nigeria. *Bioresource Technology Reports*, *19*, 101151. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101151

Ouattara, B., Sédogo, M. P., Assa, A., Lompo, F., Ouattara, K., & Fortier, M. (1998). Modifications de la porosité du sol après trente-trois années de labour d'enfouissement de fumier au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, *7*(1), 9-14.

Pousset, J. (2002). Engrais verts et fertilité des sols. France Agricole Editions.

Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, *116*(1-2), 61-76.

Rechcigl, J. E., & MacKinnon, H. C. (Éds.). (1997). Agricultural Uses of By-Products and Wastes (Vol. 668). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-1997-0668

Rengasamy, P., North, S., & Smith, A. (2010). Diagnosis and management of sodicity and salinity in soil and water in the Murray Irrigation region. *The University of Adelaide, SA*, 16-25.

Schjønning, P., Elmholt, S., & Christensen, B. T. (Éds.). (2004).Managing soil quality : Challenges in modern agriculture. CABI Pub.

Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil Salinity : Historical Perspectives and a World Overview of the Problem. In M. Zaman, S. A. Shahid, & L. Heng, *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques* (p. 43-53). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2

Sharma, O. P., Makkar, H. P. S., Dawra, R. K., & Negi, S. S. (1981). A review of the toxicity of lantana camara (linn) in animals. *Clinical Toxicology*, *18*(9), 1077-1094. https://doi.org/10.3109/15563658108990337

Smith, J. L., & Doran, J. W. (2015). Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis. In J. W. Doran & A. J. Jones (Éds.), *SSSA Special Publications* (p. 169-185). Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c10

Stevenson, F. J. (1986). *CYCLES OF SOIL:* Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrents.

Tale, K. S., & Ingole, D. S. (2015). A Review on Role of Physico-Chemical Properties in Soil Quality.

Tarnawski, M., Else K, Bunemann, & Paul, M. (2017). *Biotic indices for soil quality assessment." Soil Biology and Biochemistry.*

Tessens E, & Gourdin J. (1993). *Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Programme de Pédologie. Laboratoire de Chimie Agricole. Département des Etudes du Milieu et des Systèmes de production. Fiche de labo n°19. ISABU, Bujumbura, 36 p.*

Tirichine, A., Abid, A. F., Dahliz, A., Hafouda, L., Merouchi, W., & Khaled, H. (2017). Étude de l'effet de substitution du fumier par le phragmite (Phragmites communis Trin.) sur la qualité du compost à base de sous-produits du palmier dattier. *Algerian journal of arid environment*, *7*, 4-17.

Turner, B. L. (2008). Resource partitioning for soil phosphorus : A hypothesis. *Journal of Ecology*, *96*(4), 698-702. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01384.x

Uehara, G., & Gillman, G. (1981). *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays.* Westview Press Inc.

Valérie, G., Gilles, C., Vincent, B., & Laurent, B. (2007). L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4—Sol 1 de « L'État de l'Environnement Wallon 2006–2007 »). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/26594301

Van Groenigen, J. W., Lubbers, I. M., Vos, H. M., Brown, G. G., De Deyn, G. B., & Van Groenigen, K. J. (2014). Earthworms increase plant production : A meta-analysis. *Scientific reports*, *4*(1), 6365.

Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., Van Der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota. *Science*, *304*(5677), 1629-1633. https://doi.org/10.1126/science.1094875

Wencel, D., Abel, T., & McDonagh, C. (2014). Optical Chemical pH Sensors. Analytical Chemistry, 86(1), 15-29. https://doi.org/10.1021/ac4035168

ANNEXES

ANNEXES 1 : Tableau des données analysées

N°ordre	Description d'échantillon	pH H_2O	pH KCl	Conductivité électrique (µS/Cm)	Azote total, %N	Carbone organique (%C)	Phosphore assimilable, mg/kg	Complexe d'échange (meq/100g)							
								Ca	Mg	K	Na	CEC,	Acidité échangeable, méq/100g		
													Al3+	AT (total)	H+
1	Echantillon de Sol : E101	4,78±0,05	3,98±0,06	32,1	0,509	1,51	32,6	0,975	0,509	0,158	0,136	8,44	0	1,36	1,36
2	E102	4,78±0,05	3,95±0,06	43	0,122	1,67	12,6	1,19	0,784	0,306	0,077	10,1	0,455	1,49	1,04
3	E103	4,83±0,05	3,96±0,06	29,9	0,056	1,62	10,4	1	1,46	0,258	0,124	9,34	0,101	0,977	0,876
4	E104	4,52±0,05	3,88±0,06	27,8	0,14	1,81	9,63	0,715	1,53	0,216	0,42	8,29	0,783	2,09	1,31
5	E105	5,02±0,05	4,14±0,06	47	0,234	1,78	7,88	0,957	0,494	0,317	0,125	10,9	0,833	1,9	1,07
6	E106	4,77±0,05	4,17±0,06	26,6	0,107	1,71	7,92	1,13	0,782	0,095	0,185	8,59	0	1,06	1,06
7	E107	4,86±0,05	4,21±0,06	30,3	0,086	1,55	8,97	1,09	1,04	0,121	0,059	7,83	0	1,03	1,03
8	E108	5,14±0,05	4,15±0,06	30,5	0,164	1,78	17,8	1,76	0,895	0,274	0,151	9,44	0	0,842	0,842
9	E109	5,06±0,05	4,03±0,06	38,8	0,166	1,7	11,6	1,59	0,921	0,243	0,045	11,3	0	1,06	1,06
10	E110	5,09±0,05	4,19±0,06	30,6	0,09	1,56	10,8	1,57	1,08	0	0,029	18,3	0	0,516	0,516
11	E111	4,89±0,05	4,08±0,06	30	0,128	1,73	10,7	1,52	1,52	0,077	0,17	10,8	0	0,896	0,896
12	E112	4,89±0,05	4,07±0,06	31,4	0,149	1,65	9,41	1,28	0,806	0,089	0,06	9,97	0	0,815	0,815
13	E113	5,14±0,05	4,27±0,06	51	0,139	1,67	10,2	1,88	1,19	0,38	0,112	10,7	0	0,706	0,706
14	E114	4,92±0,05	4,20±0,06	33,5	0,211	1,64	6,94	1,28	0,794	0,126	0,087	9,97	0	0,95	0,95
15	E115	5,38±0,05	4,57±0,06	36,4	0,131	1,79	6,93	2,16	1,66	0,103	0,163	10,7	0	0,217	0,217
16	E201	4,67±0,05	3,95±0,06	24,1	0,103	1,69	36,4	0,973	0,496	0,153	0,169	8,53	0	0,977	0,977
17	E202	4,65±0,05	3,88±0,06	31,3	0,172	1,64	8,7	1,09	2,63	0,166	0,26	10	0	1,36	1,36
18	E203	4,94±0,05	3,99±0,06	41,7	0,119	1,64	12,7	0,758	0,481	0,507	0,061	8,7	0	1,11	1,11
19	E204	4,57±0,05	3,89±0,06	24,3	0,244	1,47	6,72	0,558	0,189	0,075	0,045	7,98	0	1,6	1,6

N°ordre	Description d'échantillon	pH H_2O	pH KCl	Conductivité électrique (µS/Cm)	Azote total, %N	Carbone organique (%C)	Phosphore assimilable, mg/kg	Complexe d'échange (meq/100g)							
								Ca	Mg	K	Na	CEC,	Acidité échangeable, méq/100g		
													Al3+	AT (total)	H+
20	E205	4,37±0,05	3,82±0,06	29,2	0,156	1,55	19,7	0,653	0,522	0,094	0,105	9,54	0,379	2,2	1,82
21	E206	5,25±0,05	4,14±0,06	32,4	0,14	1,87	12,2	2,46	1,14	0,241	0,087	8,74	0	0,679	0,679
22	E207	5,03±0,05	4,17±0,06	36,8	0,149	1,5	17,5	1,9	0,786	0,165	0,072	7,22	0	0,76	0,76
23	E208	5,41±0,05	4,41±0,06	37	0,215	1,58	10,2	2,09	1,29	0,177	0,071	7,63	0	0,217	0,217
24	E209	4,9±0,05	4,04±0,06	34,7	0,185	1,75	7,61	1,63	1,62	0,147	0,026	7,88	0	1	1
25	E210	4,84±0,05	4,01±0,06	32,2	0,14	1,65	7,98	1,16	0,642	0,044	0,104	7,81	0,429	1,17	0,738
26	E211	5,10±0,05	4,16±0,06	31,4	0,084	1,68	6,29	2,28	1,26	0,197	0,257	8,03	0	0,76	0,76
27	E212	4,94±0,05	4,06±0,06	34,5	0,094	1,68	6,03	2,07	0,843	0,196	0,248	9,2	0	0,977	0,977
28	E213	5,40±0,05	4,59±0,06	41,6	0,101	1,53	7,39	1,68	1,16	0,064	0,072	7,2	0	0,163	0,163
29	E214	4,83±0,05	4,05±0,06	45,6	0,185	1,67	7,03	1,68	1,08	0,12	0,091	9,34	0,202	1,38	1,18
30	E215	5,23±0,05	4,29±0,06	28,2	0,111	1,72	6,35	2,07	1,67	0,13	0,293	7,86	0	0,516	0,516
31	E301	4,49±0,05	3,84±0,06	31,1	0,135	1,73	7,72	0,663	0,321	0,06	0,112	9,1	0,758	2,72	1,96
32	E302	4,65±0,05	3,87±0,06	34,2	0,138	1,48	8,17	0,476	0,146	0,213	0,175	7,22	0,53	2,39	1,86
33	E303	4,59±0,05	3,90±0,06	28,8	0,171	1,38	6,99	0,83	0,691	0,06	0,282	7,83	0,354	1,68	1,33
34	E304	4,53±0,05	3,91±0,06	27	0,073	1,49	5,4	0,69	0,539	0,04	0,032	7,86	1,31	2,25	0,94
35	E305	4,49±0,05	3,87±0,06	34,5	0,089	1,43	7,66	0,583	0,475	0,029	0,113	7,17	0,859	2,06	1,2
36	E306	4,73±0,05	4,01±0,06	31,7	0,101	1,54	6,65	0,794	1,04	0,02	0,036	7,83	0,505	1,85	1,34
37	E307	4,78±0,05	3,96±0,06	54,6	0,096	1,6	10,8	1,34	1,44	0,237	0,296	8,68	0,606	2,06	1,46
38	E308	5,42±0,05	4,23±0,06	48,6	0,119	1,78	11,9	2,13	1,65	0,88	0,461	9,41	0	0,679	0,679
39	E309	5,05±0,05	5,08±0,06	29,2	0,072	1,49	7,62	1,46	0,965	0,031	0,117	7,93	0	1,09	1,09
40	E310	4,89±0,05	4,06±0,06	31,3	0,135	1,51	8,24	1,55	1,03	0,015	0,093	7,63	0,101	1,33	1,23
41	E311	4,93±0,05	4,05±0,06	30	0,147	1,58	9,03	1,32	1,05	0,08	0,066	7,25	0	0,977	0,977
42	E312	5,39±0,05	4,48±0,06	32,2	0,101	1,44	12,4	2,1	1,87	0,11	0,002	7,37	0	0,38	0,38
43	E313	5,42±0,05	4,43±0,06	33,3	0,115	1,7	6,96	2,67	2,41	0,23	0,004	8,64	0	0,434	0,434

N°ordre	Description d'échantillon	pH H_2O	pH KCl	Conductivité électrique (µS/Cm)	Azote total, %N	Carbone organique (%C)	Phosphore assimilable, mg/kg	Complexe d'échange (meq/100g)							
								Ca	Mg	K	Na	CEC,	Acidité échangeable, méq/100g		
													Al3+	AT (total)	H+
44	E314	5,29±0,05	4,59±0,06	53	0,101	1,72	13,7	3,35	2,91	0,138	0,082	9,15	0	0,407	0,407
45	E315	5,92±0,05	4,82±0,06	30,3	0,153	1,7	6,62	3,39	1,65	0,018	0,021	8,63	0	0,163	0,163

ANNEXES 2 : Composition chimique des échantillons de Sols de départ

Description d'échantillon	pH H_2O	pH KCl	Conductivité électrique (µS/Cm)	Carbone organique (%)	Azote total (%)	Phosphore assimilable (P-Olsen) (mg/kg)	Complexes d'échange (meq/100g)							
							Ca	Mg	K	Na	CEC	Acidité échangeable,		
												Al^{3+}	H^+	AT
Echantillon de Sol Zege	4,2±0,05	3,11±0,06	70,5	1,69	0,098	3,64	0,872	0,39	0,203	0,051	8,21	0	0,5	0,5

ANNEXE 3 : Composition chimique de la dolomie utilisée

Description d'échantillon	pH	Granulométrie, % retenus par les tamis				
		2mm	1mm	0,500mm	0,250mm	Reste
Dolomie	9,09	0,004	13,9	24,3	22,2	39,5

ANNEXE 4 : Composition de l'engrais utilisé

Description d'échantillon	pH	Carbone organique, %C
FOMI-Imbura	6,94	3,75

ANNEXE 5. Illustration photographique de quelques activités de terrain





Figure 1 : Délimitation des parcelles (photo prise en février 2023)





Figure 2 : Chaulage des parcelles (photo prise en février 2023)