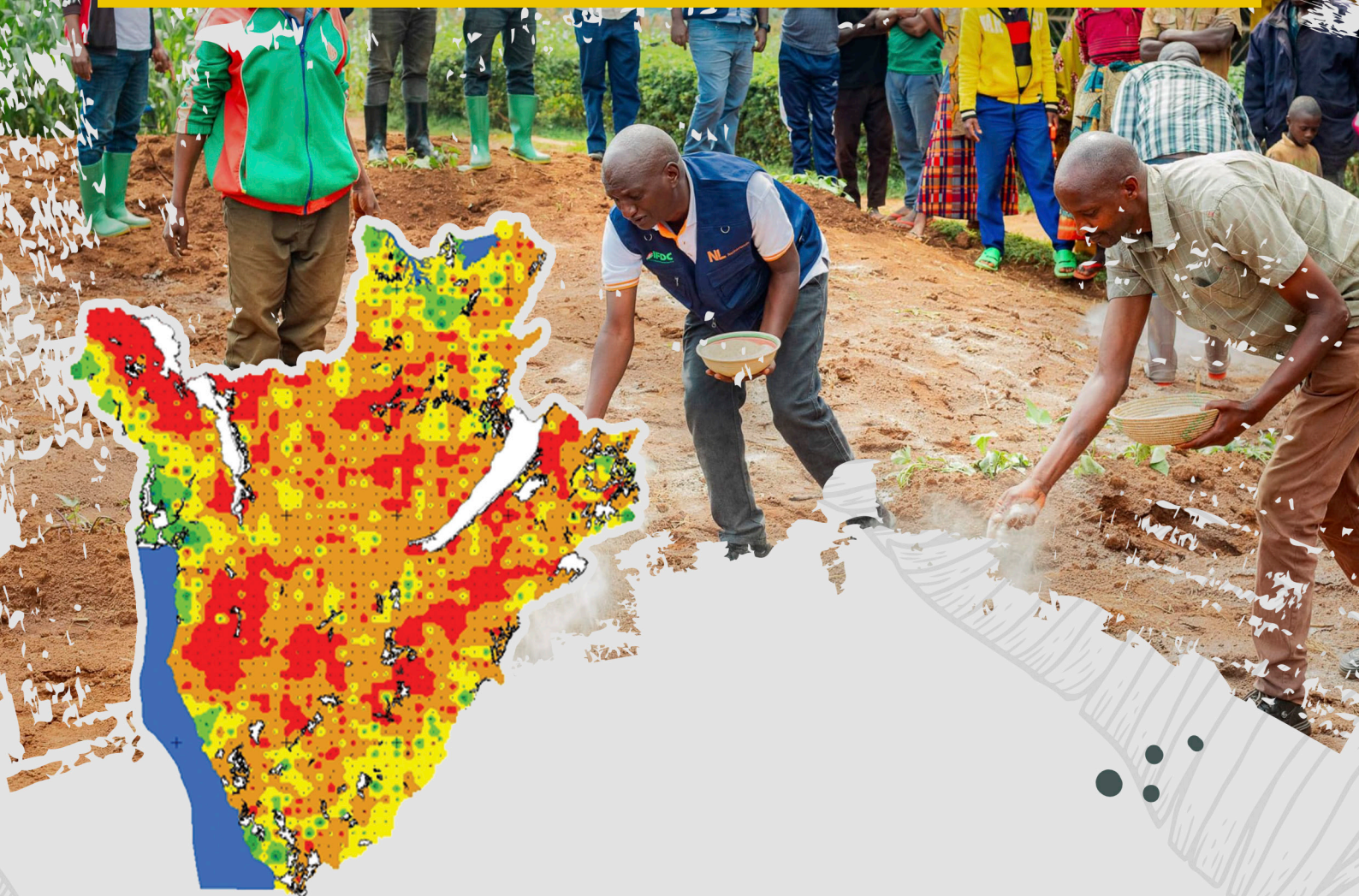




FORUM

SUR LA DOLOMIE ET LA CORRECTION
DE L'ACIDITE DES SOLS AU BURUNDI



12 - 13 Juin 2025

Bujumbura, La Détente

Conférences CRAVE 2025

Table des Matières

Sigles et Abréviations	3
Equipe de travail	5
Discours d'Ouverture par Prof. David NAHIMANA	6
Discours de Micael BEUN	9
Note Introductive de Cadrage	11
Thème 1 : Acidification et acidité des sols : Mécanismes d'action et principes de gestion	14
Thème 2 : Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi : Distribution spatiale et composition chimique	40
Thème 3 : Utilisation agricole de la dolomie au Burundi : Evolution des statistiques dans l'espace et dans le temps	51
Thème 4 : Acquis de la recherche sur la chaux/dolomie au Burundi : Expériences de l'ISABU et de la FACAGRO/FABI-Université du Burundi	63
Thème 5 : Contribution de l'International Fertilizer Development Center (IFDC) à la connaissance de l'état des lieux de l'acidité des sols du Burundi et à sa correction par application de la dolomie	73
Thème 6 : Détermination de la dose de dolomie et du type de fumure organique efficaces pour la correction de la forte acidité des sols du Burundi	91
Thème 7 : Effets combinés de la dolomie et des fumures organiques sur les rendements du haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) et du maïs (<i>Zea mays</i> L.) dans les Plateaux Centraux du Burundi	106
Thème 8 : Evaluation de l'effet combiné du chaulage et de la fumure organique sur la nodulation du haricot commun (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) sur sols acides d'altitude du Burundi	134
Thème 9 : Efficacité agronomique et efficience économique du chaulage en milieu réel sur la culture de haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	142
Thème 10 : Dynamique de l'acidité du sol et détermination de la dose optimale de la dolomie à recommander pour la culture de haricot commun (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) sur sols acides représentatifs des Plateaux Centraux du Burundi	175
Thème 11 : Evaluation de l'effet des classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité aluminique et de la disponibilité du P assimilable dans le sol	203
Recommandations	235
Liste des Participants	247

SIGLES ET ABREVIATIONS

ADISCO	: Appui au Développement Intégral et à la Solidarité sur les Collines
ANOVA	: Analyse de la Variance
BFG	: Building on Fertile Ground
CaO	: Oxyde de Calcium (chaux vive calcitique)
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CECE	: Capacité d'Echange Cationique Effective
CIMMYT	: Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo
CM	: Carrés Moyens
COPROSEBU	: Collectif des Producteurs de Semences du Burundi
CRAVE	: Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales
DAP	: Di-Ammonium Phosphate
DDL	: Degré de Liberté
DFS	: Direction de la Fertilisation des Sols
DGMAVA	: Direction Générale de la Mobilisation pour l'Auto-Développement et la Vulgarisation Agricole
DPEAE	: Direction Provinciale de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage
DRI	: Direction de la Recherche et des Innovations
ECC	: Equivalent Carbonate de Calcium (CaCO_3)
FABI	: Faculté d'Agronomie et de Bio-ingénierie
FACAGRO	: Faculté des Sciences Agronomiques
FAO	: Food and Agriculture Organisation of the United Nations
FBN	: Fixation Biologique de l'Azote atmosphérique
FOMI	: Fertilizer Organo-Minéraux Industries
GIS	: Geographic Information System
HCB	: Help Channel Burundi
HI	: Harvest Index (Indice de Récolte)
IDW	: Inverse Distance Weighted
IFDC	: International Fertilizer Development Centre
ISABU	: Institut des Sciences Agronomiques du Burundi
ITACOM	: International Trading Company
IUSS	: International Union for Soil Sciences
LASPA	: Laboratoire d'Analyses des Sols et des Produits Agro-alimentaires
MEEATU	: Ministère de l'Environnement, de l'Equipement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme

MF	: Masse (biomasse) foliaire
MgO	: Oxyde de Magnésium (chaux vive magnésienne)
MINEAGRIE	: Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage
MR	: Masse (biomasse) racinaire
NN	: Nombre de nodules
NRCS	: National Resources Conservation Service
OAP	: Organisation d'Appui à l'Auto-Promotion
OBM	: Office Burundais des Mines et Carrières
ONG	: Organisations Non Gouvernementales
PAGRIS	: Projet d'Appui à la Gestion Responsable et Intégrée des Sols
pH	: Potentiel Hydrogène
PIB	: Produit Intérieur Brut
PNCZ	: Point de Charge Nette Zéro
PND	: Programme National de Développement
PNSEB	: Programme National de Subvention des Engrais au Burundi
PSSD	: Private Seed Sector Development
PTF	: Partenaires Techniques et Financiers
R/S	: Root Shoot Ratio
RGPHAE	: Recensement Général de la Population, Habitat, Agriculture et Elevage
SCE	: Somme des Carrés des Ecart
SPSS	: Statistical Package for Social Sciences
UB	: Université du Burundi
UCODE	: Union pour la Coopération et le Développement
USDA	: United States Department of Agriculture
V/C	: Valeur sur Coût
VN	: Valeur Neutralisante de la dolomie
WRB	: World Reference Base for Soil Resources
ZOA	: Zuid Oost Azië

EQUIPE DE TRAVAIL

Comité de Parrainage

1. Recteur de l'Université du Burundi
2. Représentant de l'Ambassade des Pays Bas
3. Représentant Pays IFDC Burundi
4. Ministre/Représentant du MINEAGRIE
5. DG/Représentant de l'ISABU

Comité de Supervision

1. Directeur de la Recherche et des Innovations (UB)
2. Doyen de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (UB)
3. Directeur des Productions ISABU
4. Responsable du Projet PAGRIS/IFDC
5. Directeur de la Fertilisations Sols(DFS)/MINEAGRIE

Comité d'Organisation, de Rédaction et d'Édition du Rapport/Modération

1. Séverin Nijimbere (FABI/UB)
2. Salvator Kaboneka (FABI/UB)
3. Chantal Niyuhire (ISABU)
4. Oscar Nduwimana (PAGRIS/IFDC)
5. Cyrille Hicintuka (Privé)

Secrétariat

1. Richard Habonayo (FABI/UB)
2. Zacharie Nzohabonayo (IFDC/PAGRIS)
3. Jacques Banyaga (DFS/MINEAGRIE)
4. Jeanine Niyogendako (Secrétaire FABI)
5. Gordien Birayi (Assistant de Recherche Projet Dolomie FABI/IFDC)

Conférenciers/Présentateurs/Étudiants

1. Séverin Nijimbere (FABI/UB, Projet Dolomie FABI/IFDC)
2. Salvator Kaboneka (FABI/UB, Projet Dolomie FABI/IFDC)
3. Oscar Nduwimana (Projet PAGRIS/IFDC)
4. Chantal Niyuhire (ISABU)
5. Venant Sibomana (DFS/MINEAGRIE)
6. Aristide Gisanganya (OBM)
7. Yves Bukeyenzeza (Master/UB)
8. Trinitas Iradukunda (Master/UB)
9. Innocent Hatungimana (Master/UB)
10. Joë Ntiyantetereje (Master/UB)
11. Anicet Niyonkuru (Master/UB)
12. Désiré Nizigiyimana (Master/UB)
13. Diomède Hatungimana (Master/UB)
14. Béatrice Nijimbere (Doctorante/UB)

DISCOURS D'OUVERTURE

DU FORUM SUR LA DOLOMIE ET L'ACIDITE DES SOLS

AU BURUNDI



Monsieur le Secrétaire Permanent en Charge de l'Environnement auprès du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage

Messieurs les Représentants du Corps Diplomatique et Consulaire,

Monsieur le Représentant Pays de l'IFDC au Burundi,

Messieurs les Hauts Cadres de la Présidence et de la Primature,

Messieurs les Représentants des Organisations Internationales et Régionales,

Monsieur le Responsable du Projet PAGRIS/IFDC,

Messieurs les Directeurs Généraux,

Messieurs les Responsables de Projets et d'Organisations Non Gouvernementales,

Messieurs les Directeurs,

Monsieur le Doyen de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi,

Messieurs les Professeurs,

Mesdames, Messieurs les Membres des Média,

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

Bonjour,

A travers un appui du Projet d'Appui à la Gestion Intégrée et Responsable de la Fertilité des sols (PAGRIS) au Burundi, financé par l'Ambassade des Pays Bas au Burundi via l'International Fertilize Development Company (IFDC), le Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE) de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, organise un deuxième cadre technique d'échanges, cette fois sur la problématique de la dolomie et la correction de l'acidité des sols au Burundi, après le Forum sur l'érosion hydrique au Burundi, tenue dans cette même enceinte, en dates des 24-25 Janvier de l'année dernière.

Le présent évènement scientifique, auquel collaborent, l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), le Département du MINEAGRIE en charge de la Fertilisation des Sols (DFS), ainsi que l'Office Burundais des Mines et Carrières (OBM) se tient pour une durée de deux jours, du 12 au 13 Juin 2025. Cela rentre dans le cadre de partage des résultats des recherches menées au sein de notre institution avec la société et c'est dans l'exécution de la mission qui revient à l'Université du Burundi, KAMINUZA MPANUZI, RUMURI RUMURIKIRA ABARUNDI, appelée avec honneur à éclairer scientifiquement et techniquement les décisions des autorités dans divers domaines de la vie socio-économique de notre pays.

L'objectif principal de ce forum est de faire un large état des lieux de tous les travaux ayant été effectués jusqu'à ce jour dans le domaine de la gestion de l'acidité des sols au Burundi. De ce cadre d'échanges et de concertation sur cette problématique qui constitue un des facteurs limitant la sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi, devra sortir un document-synthèse des travaux de recherche sur la dolomie et l'acidité des sols menés au Burundi jusqu'à ce jour, soit par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), l'Université du Burundi, ou alors l'Office Burundais des Mines et Carrières (OBM) et les services

techniques centraux du MINEAGRIE. Cette synthèse pourra éventuellement servir à l'élaboration par les services habilités de ce Ministère des directives techniques et des recommandations consensuelles en matière de gestion de l'acidité des sols à mettre au profit de tout projet ou programme agricole investis dans le pays.

Mesdames et Messieurs,

Distingués invités, Tout Protocole Observé,

Il n'est un secret pour personne au monde que le sol constitue le premier capital productif de l'agriculture, ici au Burundi et bien au-delà. De ce fait, la protection et la gestion durable de ce capital « sol » constitue un enjeu prioritaire et majeur pour prétendre augmenter les rendements agricoles et les revenus, et améliorer de manière durable les conditions de vie des ménages ruraux agricoles. Dans ce même contexte, il est utile de rappeler que la grande partie des sols du Burundi sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), très bourrés en Aluminium et pauvres en éléments nutritifs. Cette alarmante analyse a été récemment confirmée par une étude cartographique conduite par l'ISABU sous financement du Projet PAGRIS de l'IFDC. Cette étude relève que 73 % des sols du Burundi sont acides. L'extrême acidité se manifestant beaucoup plus sur la crête Congo-Nil et dans les Plateaux centraux. De manière générale, 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. Cependant, nous devons être conscients que, même dans les régions les moins touchées aujourd'hui, l'effet des changements climatiques récurrents pourrait les affecter dans l'avenir.

La réaction acide du sol est d'autant plus grave qu'elle induit une série de contraintes à la croissance, la productivité et la production des plantes, aussi bien en terme quantitatif que qualitatif. Elle affecte autant les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Elle a entre autres conséquences (i) l'indisponibilité des éléments nutritifs, (ii) la toxicité des métaux et leur solubilité, à l'exemple de l'Aluminium, du Fer et du Manganèse. (iii) l'inhibition de l'activité microbienne doublée de celle du fonctionnement optimal des cycles biogéochimiques, nous avons nommé les cycles du carbone, de l'Azote, du Phosphore, du Potassium, du Soufre et des microéléments. Devant une telle situation d'extrême acidité des sols du Burundi, la solution la plus logique serait de les abandonner à eux-mêmes et de ne pas les exploiter par l'activité agricole. Or, la majeure partie de la population burundaise (plus de 90%) vit du secteur agricole. On est alors dans l'obligation de les exploiter pour l'agriculture. Cela n'est possible qu'en procédant à la correction de cette forme de dégradation chimique. A cet effet, des gisements de calcaires sont disponibles au Burundi et peuvent être mobilisés à grande échelle pour la correction de l'acidité, dans une perspective globale de gestion intégrée de la fertilité des sols. L'intervention de l'Office Burundais des Mines et Carrières (OBM) donne beaucoup de lumière à ce propos.

Cette approche holistique de valorisation des terres agricoles du Burundi doit inclure non seulement l'usage rationnel de la dolomie pour la correction de l'acidité des sols, mais également l'aménagement des bassins versants et la lutte contre l'érosion hydrique, ainsi que la valorisation agronomique des différentes fumures organiques, sans oublier le recours raisonné aux engrais chimiques.

Mesdames et Messieurs,

Auguste assemblée,

Au niveau de l'Université du Burundi, dotée, à côté du CRAVE, de 15 autres Centres/Laboratoires de Recherche, la présente initiative scientifique constitue, à coup sûr, une contribution significative du projet PAGRIS/IFDC à la politique nationale de gestion rationnelle des terres agricoles, garante d'un Burundi Emergeant en 2040 et d'un Burundi Développé en 2060. Aussi, nous sommes persuadés que les résultats de ce forum aboutiront à l'actualisation de nos connaissances sur la problématique de l'acidité des sols au Burundi, de même que celle de nos enseignements, tant techniques qu'universitaires.

Ce bel exemple de collaboration entre l'IFDC et la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi constitue, pour les deux partenaires que nous sommes, un cas de succès exemplaire. Nous sommes grandement ravis d'annoncer que ce fructueux partenariat entre l'Université du Burundi à travers la FABI et le projet PAGRIS de l'IFDC a permis l'encadrement scientifique de 6 étudiants de Master et d'une Doctorante, à côté de nombreux stagiaires qui ont été hébergés et encadrés par les différents cadres de l'IFDC au cours des dernières années. A ce juste et noble effet, nous profitons de cette occasion pour réitérer nos remerciements à l'égard de l'IFDC pour ses appuis à la recherche action en matière agronomique et environnementale. Par la même occasion, nous interpellons tous les autres intervenants en matière de développement rural, d'envisager d'emboîter le pas à l'IFDC, en les assurant que l'Université du Burundi est largement ouverte à toute collaboration et dispose de ressources humaines suffisantes et compétentes pour mener à bon port de fructueux projets de recherche et contribuant à réaliser la vision du Burundi.

Mesdames et Messieurs, Auguste assemblée, c'est par ces mots que je clôture mon propos de grande satisfaction et de vifs remerciements à l'égard des organisateurs de ce Forum, sur la Dolomie et l'Acidité des sols au Burundi.

Vive la Collaboration interinstitutionnelle pour le Développement Durable du Burundi

Vive la Sécurité Alimentaire, Nutritionnelle et Environnementale au Burundi

Vive la Qualité de l'Enseignement et de la Recherche

Je vous remercie et que Dieu vous bénisse.

Prof. David NAHIMANA

Directeur de la Recherche et des Innovations

Université du Burundi

Discours de Micael BEUN,

Responsable du Projet PAGRIS

AU BURUNDI



Monsieur le Secrétaire Permanent en Charge de l'Environnement auprès du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Élevage

Messieurs les Représentants du Corps Diplomatique et Consulaire,

Monsieur le Recteur de l'Université du Burundi,

Messieurs les Hauts Cadres de la Présidence et de la Primature,

Messieurs les Représentants des Organisations Internationales et Régionales,

Messieurs les Directeurs Généraux,

Messieurs les Responsables de Projets et d'Organisations Non Gouvernementales,

Messieurs les Directeurs,

Monsieur le Doyen de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi,

Messieurs les Professeurs,

Mesdames, Messieurs les Membres des Média,

Mesdames et Messieurs, Tout Protocole Observé,

Bonjour,

C'est un honneur pour IFDC, et pour le projet PAGRIS, de participer activement dans ce 2ème Forum national sur la problématique d'acidification des sols au Burundi, lequel fait suite à un 1er Forum sur la problématique d'érosion des sols qui s'est tenu en janvier 2024.

En effet, la protection et la gestion du capital sol constitue de plus en plus un enjeu majeur pour une agriculture durable. Dans le contexte du Burundi, et d'un pays avec une forte densité de population vivant majoritairement de l'agriculture, le capital sol est soumis à de nombreuses pressions : (1) exigüité des terres et surexploitation, (2) dégradation des sols dû à la diminution du couvert végétal et de la déforestation, (3) acidification des sols et augmentation de la toxicité aluminique, (4) faible disponibilité et capacité de rétention des éléments nutritifs du sol, (5) diminution de l'activité microbiologique des sols et par conséquent une faible productivité agricole.

Dans un objectif d'améliorer durablement la sécurité alimentaire des ménages agricoles, IFDC concentre ses actions sur des sols sains, et des plantes saines. Au Burundi, IFDC met en œuvre 2 projets complémentaires et totalement alignés avec sa vision, à savoir le projet PAGRIS (Projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée des Sols) et le projet PSSD (Private Seed Sector Development), tous deux financés par l'Ambassade du Royaume des Pays-Bas au Burundi. A travers ces 2 projets, IFDC apporte son soutien stratégique et technique dans de le secteur de la recherche, dans l'accompagnement des ménages agricoles, dans l'appui au secteur privé et le développement des marchés ainsi que dans le développement d'un environnement favorable. Dans le cadre de son appui à la recherche, IFDC contribue d'une part à renforcer les connaissances des institutions et parties prenantes sur les problématiques spécifiques auxquels les ménages agricoles font faces, et d'autre part appuie dans le développement des nouvelles technologies adaptées aux ménages agricoles.

Avec l'appui du projet PAGRIS, En 2022, l'ISABU a produit et publié des cartes actualisées de la fertilité des sols au Burundi. Ces dernières mettent davantage en avant la problématique d'acidification des sols avec plus de 73% des sols qui sont très acides. Par la suite, IFDC a soutenu la FABI dans la recherche sur la correction des sols très acides à travers plusieurs combinaisons associant dolomie et fumure organique, ainsi que sur la granulométrie de la dolomie, dont les résultats vous seront présentés plus tard. IFDC, à travers le financement de l'Ambassade du Royaume des Pays-Bas, et en collaboration avec 9 organisations partenaires ici représentées (Twitezimbere, INADES, ADISCO, OAP, Réseau Bdi 2000+, UCODE, HCB et Tubura) ont aussi mis en œuvre un projet pilote dolomie pendant 4 campagnes agricoles successives entre 2023A et 2025B, visant à faciliter l'accès à plus de 70,000 ménages agricoles vivant dans les zones considérées très acides à accéder et appliquer une dose de correction de dolomie permettant de restaurer plus durablement la fertilité de leur sol. De plus, ce projet pilote avait pour objectif de renforcer la compréhension de la problématique d'acidité des sols et de toxicité aluminique, et de l'importance de l'utilisation raisonnée de la dolomie à travers une approche intégrée. Ici aussi, les résultats de cette activité vous seront présentés plus tard.

Toutefois, bien que le Burundi dispose d'un atout majeur ayant de la roche dolomitique présente en grande quantité dans son sol, et que plusieurs investissements sont effectués dans ce domaine (essentiellement à travers la subvention), la problématique de l'acidification des sols reste un enjeu majeur pour la plupart des ménages agricoles. Des efforts restent à faire. Je mentionne ici (1) l'importance de renforcer les capacités de mesure du pH des sols et de proposer des itinéraires techniques adaptés permettant de neutraliser plus durablement la toxicité aluminique et l'acidité des sols et de restaurer la fertilité des sols à travers une approche intégrée. (2) Améliorer la disponibilité des intrants de qualité et à un prix abordable qui reste encore un enjeu de taille. A ce jour, la dolomie mise à disposition à travers le PNSEB est distribuée en même temps que les engrais, alors que son application devrait se faire 1 mois avant le semis. (3) Renforcer le contrôle-qualité de la production de la dolomie qui ne respecte pas toujours les normes et standards de qualité (roches et granulométrie). (4) Renforcer l'accessibilité de la dolomie. Tout comme la matière organique, la dolomie est un amendement et doit donc être appliqué avec des doses conséquentes. La facilitation du transport de la dolomie à proximité des exploitations agricoles contribuerait significativement à améliorer son application selon les recommandations appropriées.

Mesdames et Messieurs,

Distingués invités, Tout Protocole Observé,

J'espère donc que ce Forum National sur la problématique d'acidification des sols, et les résultats qui y seront présentés, contribueront significativement à renforcer la prise de conscience sur l'importance de protéger et d'investir dans le capital sol au Burundi, à travers une Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols, afin d'accompagner au mieux les ménages agricoles dans l'augmentation durable de leur production, et par conséquent d'assurer une meilleure sécurité alimentaire des ménages vivant de l'agriculture. J'espère aussi que ce Forum permettra d'initier des engagements concrets de la part du Gvt en faveur de la protection des sols et la restauration de leur fertilité de manière durable, mais aussi de renforcer la coopération et l'alignement des investissements pour un impact plus significatif et plus durable !

Mesdames et Messieurs, Auguste assemblée, c'est par ces mots que je clôture mon propos en saluant la bonne collaboration entre IFDC et l'Université du Burundi, et en particulier la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), à travers l'ensemble des travaux menés conjointement, ainsi que pour l'organisation de cet événement d'importance capitale pour une agriculture durable au Burundi. Je salue aussi la bonne collaboration et l'engagement des organisations partenaires dans le projet pilote dolomie qui ont significativement contribué à l'atteinte des résultats qui vous seront présentés sous peu.

Micael BEUN

Chef du projet PAGRIS/IFDC

Note Introductive de Cadrage

Salvator Kaboneka¹

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). Département des Sciences Agronomiques et Environnementales. Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

Le Forum sur la dolomie et la correction de l'acidité des sols du Burundi a un antécédent. Organisé en dates des 12-13 Juin 2025 et facilité par le Projet d'Appui à la Gestion Intégrée et Responsable de la Fertilité des sols (PAGRIS), financé par l'Ambassade des Pays Bas au Burundi, via l'International Fertilizer Development Centre (IFDC), il fait suite au Forum sur l'érosion hydrique au Burundi, tenue en dates des 24-25 Janvier 2024.

Organisé conjointement par l'IFDC et la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, à travers le Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), le présent évènement scientifique a bénéficié de la collaboration de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), du Département du Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage (MINEAGRIE) en charge de la Fertilisation des Sols (DFS), de l'Office Burundais des Mines et Carrières (OBM), et une active participation de nombreux cadres techniques du MINEAGRIE et des ONG locales et internationales engagées dans le développement rural du Burundi.

L'objectif principal du Forum était de faire un large état des lieux de tous les travaux ayant été effectués jusqu'à ce jour dans le domaine de la gestion de l'acidité des sols au Burundi et, dans la foulée produire un document-synthèse de ces travaux de recherche menés, soit par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), l'Université du Burundi, l'Office Burundais des Mines et Carrières (OBM) et les services techniques centraux du MINEAGRIE.

Allant du général aux études de cas 11 thèmes ont été présentés et discutés lors du Forum

Thème 1.

Acidification et acidité des sols : Mécanismes d'action et principes de gestion

Thème 2.

Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi : Distribution spatiale et composition chimique

Thème 3.

Utilisation agricole de la dolomie au Burundi : Evolution des statistiques dans l'espace et dans le temps

Thème 4.

Acquis de la recherche sur la chaux/dolomie au Burundi : Expériences de l'ISABU et de la FACAGRO/FABI- Université du Burundi

Thème 5.

Contribution de l'International Fertilizer Development Centre (IFDC) à la connaissance de l'état des lieux de l'acidité des sols au Burundi et à sa correction par application de la dolomie

Thème 6.

Détermination de la dose de dolomie et du type de fumure organique efficaces pour la correction de la forte acidité des sols du Burundi

Thème 7.

Effets combinés de la dose de dolomie et des fumures organiques sur les rendements du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et du maïs (*Zea mays* L.) dans les Plateaux Centraux du Burundi

Thème 8.

Evaluation de l'effet combiné du chaulage et de la fumure organique sur la nodulation du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides d'altitude du Burundi

Thème 9.

Efficacité agronomique et efficience économique du chaulage en milieu réel sur la culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)

Thème 10.

Dynamique de l'acidité du sol et détermination de la dose optimale de la dolomie à recommander pour la culture de haricot commu (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides représentatifs des Plateaux Centraux du Burundi

Thème 11.

Evaluation de l'effet des classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité échangeable et de la disponibilité du P assimilable dans le sol

Ces thèmes viennent compléter ceux couverts par les travaux de l'ISABU et de la FACAGRO/FABI étayés dans le Thème 4 du présent rapport. Ceux-ci sont :

1. Inventaire et caractérisation des amendements calco-magnésiens
2. Combinaison amendements organiques, dolomitiques et engrais (fertilisation intégrée)
3. Evaluation des provenances, granulométrie et vitesse de réaction des amendements calco-magnésiens
4. Engrais minéraux et modifications physico-chimiques du sol
5. Acidité et toxicité Al des sols et techniques de correction
6. Analyse agronomique et économique de l'application de la dolomie et de la correction de l'acidité
7. Pouvoir de neutralisation comparé de l'acidité/toxicité Al des amendements organiques et minéraux
8. Arrière effet du chaulage
9. Sensibilité différentielle des cultures à l'acidité et à la toxicité des sols

Au bout du compte, ce document-synthèse est appelé à servir de base pour l'élaboration par les services habilités du MINEAGRIE des directives techniques et des recommandations consensuelles en matière de gestion de l'acidité des sols à mettre au profit de tout projet ou programme agricole investis dans le pays.

A cet effet, il est universellement établi que le sol constitue le principal capital productif de l'agriculture. Or, pour le cas du Burundi, la grande partie des sols sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), sursaturés en cations acides (Al, Fe) et pauvres en éléments nutritifs. Cette situation a été récemment confirmée par une étude cartographique conduite par l'ISABU sous financement du Projet PAGRIS de l'IFDC. L'étude relève que 73 % des sols du Burundi sont acides. De ce fait, la protection et la gestion durable de ce capital « sol » constitue un enjeu prioritaire et majeur pour prétendre augmenter les rendements agricoles et les revenus, et, de cette façon, améliorer de manière durable les conditions de vie des ménages ruraux agricoles burundais.

Pour reproduire les interventions des autorités ayant lancé les travaux du présent cadre d'échanges, l'acidité des sols est d'autant plus grave qu'elle induit une série de contraintes à la croissance, la productivité et la production des plantes, aussi bien en terme quantitatif que qualitatif. Elle affecte autant les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Elle a entre autres conséquences (i) l'indisponibilité des éléments nutritifs, (ii) la toxicité des métaux et leur solubilité, à l'exemple de l'Aluminium, du Fer et du Manganèse. (iii) l'inhibition de l'activité microbienne doublée de celle du fonctionnement optimal des cycles biogéochimiques. En conséquence, la protection et la gestion du capital sol constitue inévitablement un enjeu majeur pour une agriculture durable.

Des gisements de calcaires sont disponibles au Burundi et peuvent être mobilisés à grande échelle pour la correction de l'acidité, dans une perspective globale de gestion intégrée de la fertilité des sols. Cette approche holistique de valorisation des terres agricoles du Burundi doit inclure, non seulement l'usage rationnel de la dolomie pour la correction de l'acidité des sols, mais également l'aménagement des bassins versants et la lutte contre l'érosion hydrique, ainsi que la valorisation agronomique des différentes fumures organiques, sans oublier le recours raisonné aux engrais chimiques, pour autant que les sols burundais, intensivement soumis à l'érosion, sont appauvris en éléments nutritifs.

Des recommandations pratiques ont été relevées au cours du Forum sur la dolomie et la correction de l'acidité des Sols du Burundi. Celles-ci sont adressées aux enseignants-chercheurs et aux chercheurs, aux agriculteurs, aux décideurs politiques, aux producteurs de dolomite, aux ONG et autres institutions d'appui et aux services techniques décentralisés du MINEAGRIE.

Par-dessus tout, les participants au Forum ont conseillé et encouragé une collaboration interdisciplinaire entre les agronomes, les écologues et autres économistes pour développer des recommandations de gestion intégrée de la fertilité des sols qui prennent en compte les aspects environnementaux et économiques.

Par ce que, la rentabilité est l'ultime visée de toute entreprise, fût-elle agricole.

**Pr Salvator KABONEKA
(FABI-UB)**



Acidification et acidité des sols :

Mécanismes d'action et principes de gestion

Salvator Kaboneka^{1*}

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: salvator.kaboneka@gmail.com

Résumé

Ce chapitre général introductif a comme visée la compréhension des mécanismes d'action et des principes de gestion des processus d'acidification et d'acidité des sols. Il énumère avec des réactions chimiques à l'appui les sources d'acidité des sols et, aussi, les sources d'alcalinisation. S'il est vrai que la grande problématique de la gestion des sols du Burundi est leur acidité, le plus souvent doublée de toxicité, plus à base d'Al que de Fe, nous avons jugé opportun de couvrir également les aspects d'alcalinité, de salinité et de sodicité. Car en effet, sans être de grande ampleur, certains sols du Burundi sont alcalins sodiques et salins, particulièrement dans la plaine de l'Imbo Centre. Ce même chapitre propose des méthodes de correction, aussi bien minérales qu'organiques, y compris les aspects mycorhiziens. Les conséquences agronomiques et physiologiques de l'acidité des sols sont multiples. Ses solutions sont aussi variées. L'approche méthodologique est tracée. D'abord et avant tout corriger l'acidité et la toxicité aluminique des sols (les ressources minérales sont localement disponibles), en augmenter la CEC par application de la matière organique, puis, après, suivront alors l'application des engrais, le choix de meilleures variétés et techniques culturales et antiérosives et, enfin procéder à une analyse de la rentabilité de l'opération, comme dans toute entreprise de production.

Mots clés : Acidité du sol, toxicité Al/Fe, alcalinité, sodicité, salinité, chaulage, matière organique

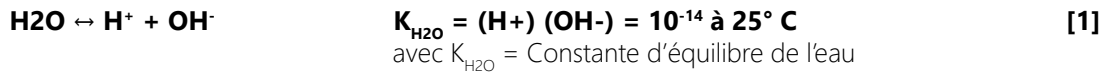
Abstract

This introductory general chapter aims at a basic understanding acting mechanisms and management principles of the soil acidification and acidity processes. It lists chemical reactions describing soil acidification and alcalisation. Although the soil management challenge in Burundi is definitely related to soil acidity, in most cases associated with Al and Fe, certain aspects of soil salinity, soil alcalinity as well as soil sodicity are described. More so, because soil of the Central Imbo plain are alkaline, sodic and/or saline. In the same chapter are discussed soil acidity correction or management techniques, both mineral and organic, including mycorrhizal processes and adaptative crop selection. Agronomic and physiological consequences of soil acidity/Altoxicity or Fe toxicity are multiples. Solutions are varied as well. First and most of all, soil acidity/Al toxicity must be corrected (sufficient liming materials are locally available), then follow in order, organic matter application to increase CEC, fertilisers application, crop variety selection, adoption of innovative cultural and erosion control techniques, completed with, as in any productive entreprise, a profitability analysis.

Mots clés : Soil acidity, Al/Fe toxicity, alcalinity, sodicity, salinity, liming, organic matter

1. CONCEPTS D'ACIDITE DES SOLS

Le pH est l'une des propriétés les plus intéressantes et informatives du sol. C'est la mesure du degré d'acidité ou d'alcalinité de la solution du sol. La notion de pH a été introduite par le chimiste suédois Sorenson sur base de l'hydrolyse de l'eau, composante essentielle des systèmes aqueux. Non seulement l'eau est un excellent solvant, mais aussi elle joue un rôle clé dans les réactions acide-base.



Le pH (qui varie sur une échelle de 0 à 14) est le logarithme négatif de la concentration en ions H^+ d'une solution de sol :

$$\text{pH} = -\log (\text{H}^+) \quad [2]$$

Il existe plusieurs classifications du niveau d'acidité suivant les auteurs. Le tableau 1 en donne un exemple.

Le pH est un indicateur du degré de pédogenèse. Il est révélateur du degré de pédogenèse en termes de contenu minéral du matériel parental, temps/importance de la pédogenèse et le degré de lessivage des bases (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Les facteurs qui influencent le pH sont : (i) le type de végétation ; (ii) la quantité et la distribution de la pluviométrie ; (iii) le degré de drainage interne du sol; (iv) les activités humaines (système cultural, érosion, fertilisation minérale..). Il indique le contenu minéral du matériel parental, le temps et l'importance de la pédogenèse, plus spécialement le degré de lessivage des bases comme Ca^{2+} , Mg^{2+} , et K^+ , et la concentration des cations acides comme Al^{3+} , H^+ , Fe^{2+} (Figure 5).

2. QUELQUES DEFINITIONS UTILES

Acidification : augmentation de la concentration des ions H^+ dans les solutions du sol due au lessivage des cations par des eaux de pluie chargées de gaz carbonique, aux prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes, à l'action des engrais acidifiants (à base d'ammonium), à l'action de certains types de végétation et aux pertes d'éléments nutritifs par érosion. Elle s'exprime par une diminution du pH.

Acidité actuelle (active, réelle) : acidité correspondant aux ions H^+ libres présents dans la solution du sol. Elle est mesurée par le pH_{eau} .

Acidité échangeable (de réserve) : acidité résultant de la libération dans la solution du sol, en présence d'un sel (p.e KCl) d'ions H^+ absorbés sur le complexe argilo-humique. Elle est mesurée par le pHKCl dont la valeur est inférieure à celle du pH_{eau} . Leur différence est indicative du pouvoir tampon du sol vis-à-vis des variations du pH du sol, c'est-à-dire la résistance au changement du pH du sol, laquelle est contrôlée par la quantité de matière organique et d'argile.

Capacité d'échange cationique (CEC) : quantité de cations, quelle que soit leur nature, que peut adsorber le complexe (argilo-humique) adsorbant du sol constitué de substances colloïdales électronégatives (argile et matière organique du sol). Elle est exprimée en $\text{m\acute{e}q}/100 \text{ g}$ de sol ou en cmolc/kg de sol. Ces deux expressions étant équivalentes.

Taux de saturation en cations : rapport exprimé en % de la quantité de cations adsorbés (échangeables) sur le complexe argilo-humique sur la quantité totale de cations susceptibles de l'être (CEC). Le taux de saturation en $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ est indicatif du taux d'acidité du sol. Plus ce taux est élevé, plus l'acidité est élevée et vice versa.

3. CLASSIFICATION DE L'ACIDITE DES SOLS

Globalement sont considérés deux types d'acidité : (i) l'acidité active ou réelle ; (ii) l'acidité de réserve, acidité échangeable ou acidité potentielle. L'acidité de réserve contrôle (tamponne) l'acidité active.

L'acidité active ou acidité réelle est la mesure de la concentration/activité des ions H^+ dans la solution du sol. Quantitativement, les ions H^+ mesurés à travers l'acidité active constituent une infime partie des ions H^+ associés à l'acidité échangeable. Cependant, l'acidité active (pH_{eau}) est très importante par ce qu'elle constitue l'environnement auquel, les plantes (racines), la microfaune et la microflore du sol sont constamment exposés.

L'acidité échangeable est principalement associée aux ions Al^{3+} et H^+ échangeables présents dans les sols très acides. Ces ions sont libérés dans la solution du sol par le KCl. Leur concentration est estimée par le pH_{KCl} . La garniture de la somme des cations retenus par les colloïdes minéraux et organiques du sol (complexe adsorbant) constitue sa capacité d'échange cationique (CEC) exprimée en méq/100 g de sol ou en cmole_c/kg de sol.

La proportion (%) des cations échangeables basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+) constitue le taux de saturation en bases. Celle des cations échangeables acides (Al^{3+} et H^+) est une estimation du taux de saturation en acides, qui est d'autant plus élevé que les sols sont plus acides (pH faible) et d'autant plus faible que les sols sont alcalins.

Le taux de saturation en bases du complexe adsorbant par les cations basiques (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , NH_4^+) est un précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du milieu, laquelle détermine l'activité biologique et de degré de décomposition de la matière organique, la qualité de la structure, les réserves en éléments fertilisants, etc.

Le taux de saturation en Al^{3+} échangeable (parfois dénommé indice de Kamprath-m-, du nom d'un scientifique américain de l'Université de Caroline du Nord) présente un intérêt pour les pédologues. Au $pH < 5,5$, la concentration des ions H^+ est fonction des ions H^+ et Al^{3+} échangeables, alors que dans les sols à $pH > 5,5$, la concentration des ions H^+ en solution est seulement fonction des ions H^+ échangeables. Autrement dit, résoudre le problème d'acidité des sols à $pH < 5,5$ revient à neutraliser l'Al échangeable. Le tableau 2 donne la gamme des valeurs de pH des sols agricoles.

Au Burundi, le taux de saturation en Al^{3+} a été utilisé pour mieux caractériser la classification des sols acides en y incorporant la composante « allique ». Selon ce groupe de chercheurs (ISABU, 1990 ; Shehata, 1991), les sols acides peu alliques sont caractérisés par des $pH < 5,5$ et un taux de saturation en Al échangeable $< 30\%$. De l'autre côté, les sols acides alliques qui couvrent près de 1 000 000 ha, sont caractérisés par des $pH < 5,5$ et un taux de saturation en Al $> 60\%$.

Tableau 1. Classification des sols en fonction du pH. (Source : Brady, 1990).

PH	Type
< 4,5	Extrêmement acide (toxicité Al, Fe, Mn)
4,5-5,0	Très fortement acide
5,1-5,5	Fortement acide
5,6-6,0	Moyennement acide
6,1-6,5	Faiblement acide
6,6-7,3	Neutre
7,4-7,8	Légèrement alcalin
7,9-8,4	Moyennement alcalin
8,5-9,0	Fortement alcalin (concentration en $CaCO_3$ libre)
> 9,1	Très fortement alcalin (risque de sodicité)

Tout compte fait, l'acidification du sol est un processus naturel doublé de l'action anthropique.

Un diagnostic actuel alarmant: ¾ du Burundi est fortement à très fortement acide

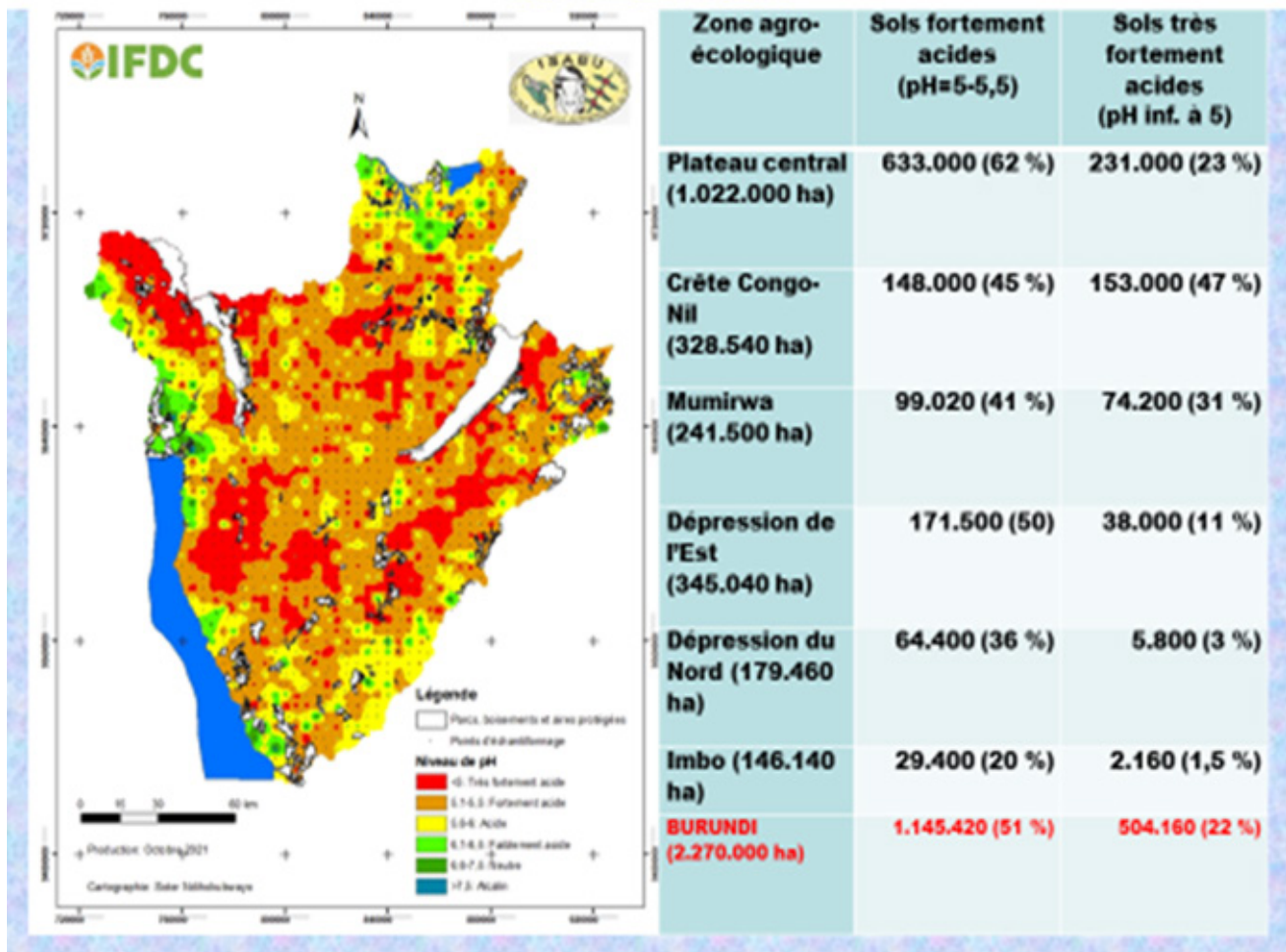


Figure 1. Distribution de l'acidité des sols par zone agro-écologie au Burundi (Musonerimana et al., 2025).

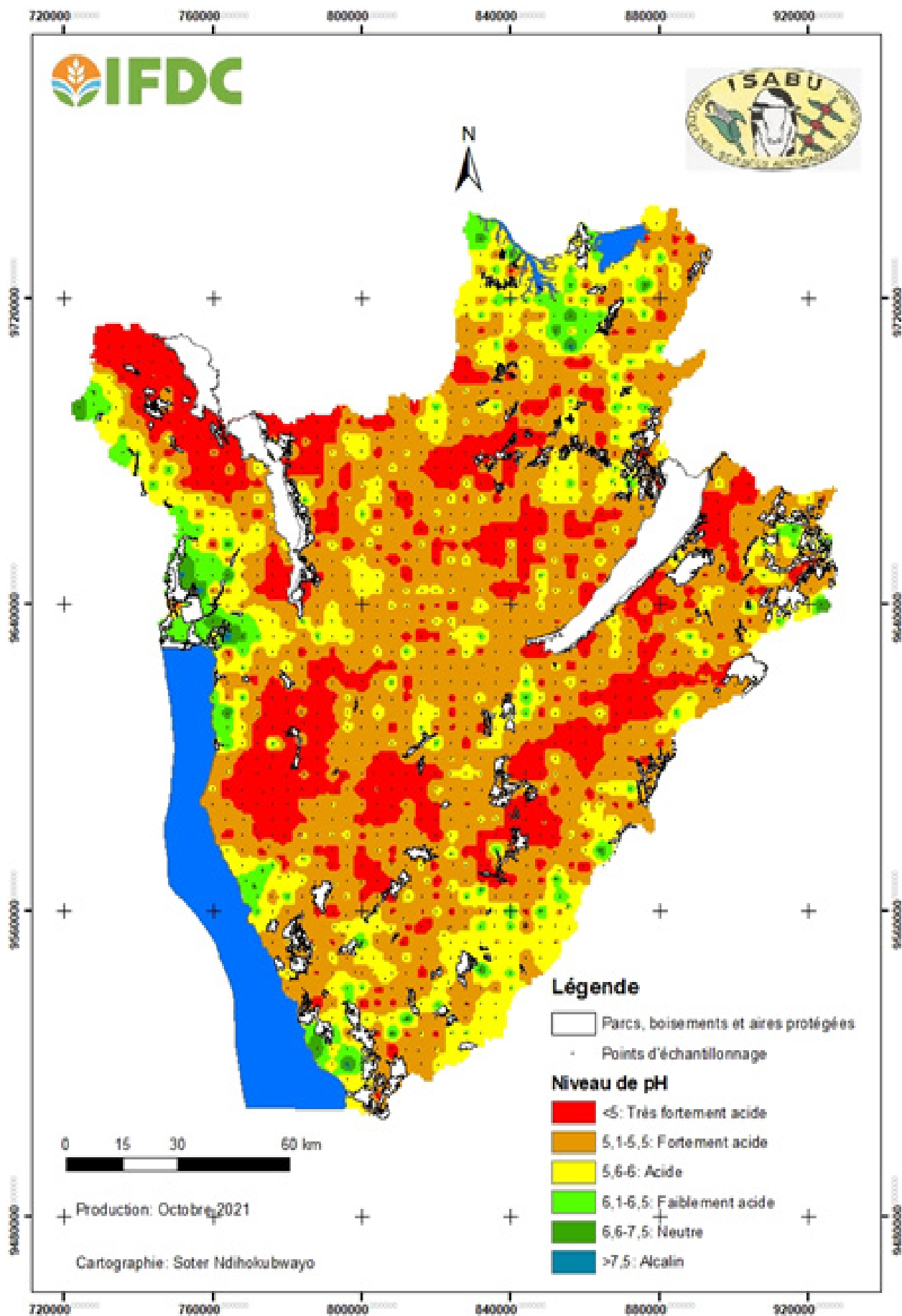


Figure 2. Distribution de l'acidité des sols au Burundi (Musonerimana et al., 2025)

C'est ainsi que l'acidité des sols se retrouve dans toutes régions du monde où les précipitations sont suffisamment élevées pour causer les pertes par lessivage à partir des horizons de surface de quantités appréciables de cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+), au profit de l'accumulation dans ces mêmes horizons des cations acides échangeables (Al^{3+} , H^+). Au Burundi, les zones de haute altitude et les plateaux centraux (Figure 1 et 2) sont caractérisés des sols acides ($\text{pH} < 5,5$). Toute la bande intertropicale (Figure 3) du monde est constituée dans la grande majorité des sols acides qui constituent 30 % des terres émergées (George et al., 2012).

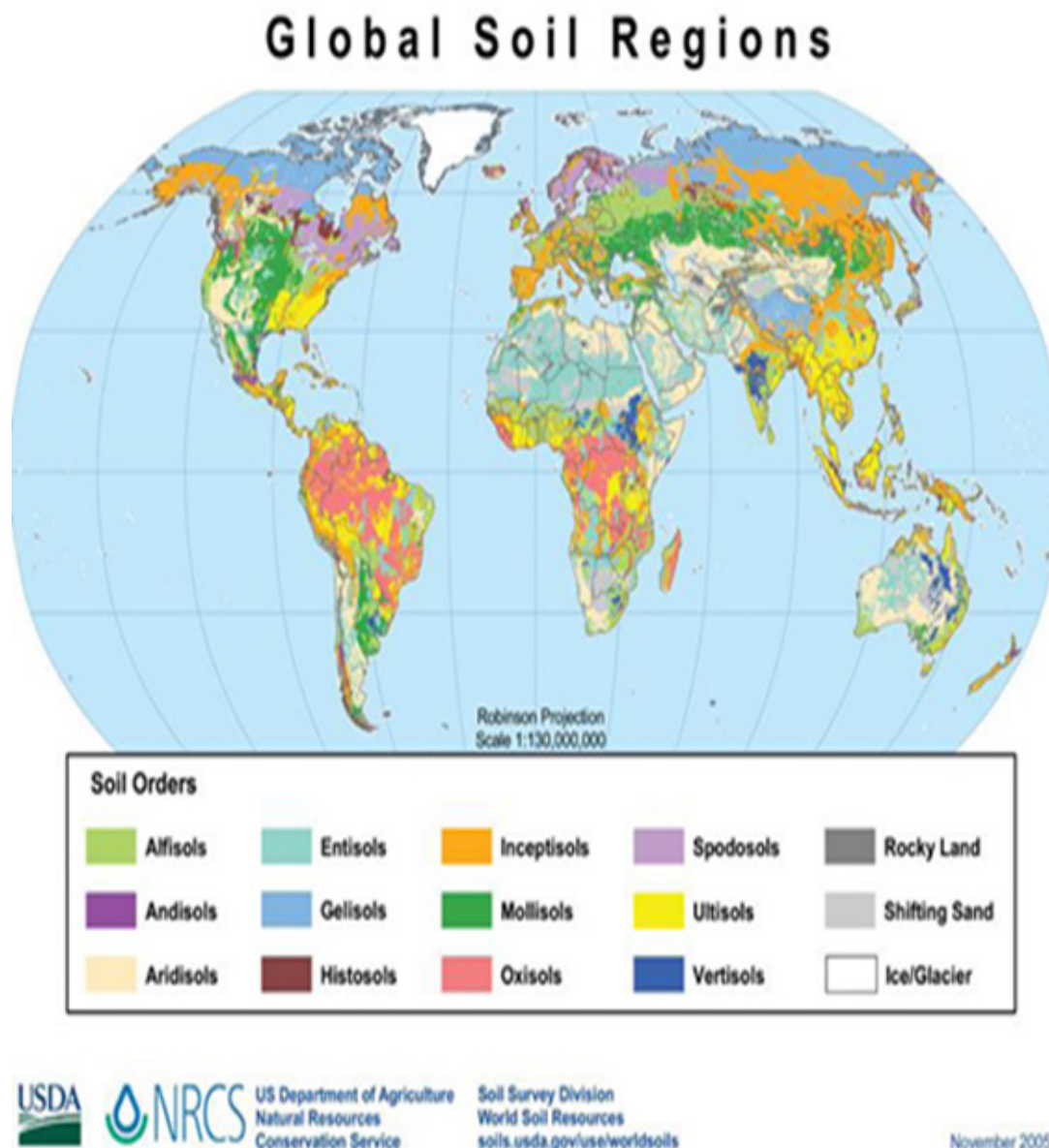


Figure 3. Distribution intertropicale des sols acides (Oxisols).

4. Mécanismes qui contrôlent le pH

La formation du sol en régions humides et subhumides est en général un processus acidifiant. En principe, un matériel géologique non perturbé par érosion, sédimentation ou glaciation à un pH \cong 7 (neutralité) ou même plus si le matériel parental contient de la calcite (CaCO_3) ou de la dolomite ($\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$). Au cours de la pédogenèse, le matériel parental et le sol qui en résulte sont soumis à une variété de processus qui modifient la composition minéralogique et chimique du sol et ont comme effet la diminution du pH du sol.

En fonction du pH, les mécanismes contrôlant le pH du sol sont résumés dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2. Mécanismes de contrôle de pH dans le sol (Source : Hassett et Banwart, 1992).

Intervalle de pH	Mécanisme de contrôle
2 – 4	Oxydation de la pyrite et les autres minéraux à base de S réduit, dissolution des minéraux du sol
4 - 5,5	Al^{3+} échangeable et les ions hydroxydes associés ; H^+ échangeable.
5,5 - 6,8	H^+ échangeable, groupes des acides faibles associés aux minéraux du sol et aux substances humiques, les formes dissoutes de CO_2 et autres produits associés.
6,8 - 7,2	Groupes d'acides faibles sur les substances humiques et les minéraux du sol.
7,2 - 8,5	Dissolution de carbonates à l'exemple de CaCO_3 .
8,5 - 10,5	Na^+ échangeable, dissolution de Na_2CO_3 (s)

Dans les lignes qui suivent, nous passons en revue les processus biochimiques qui contrôlent (positivement ou négativement du point de vue agronomique) le pH du sol dans l'intervalle de situé entre 2 et 10,5. A cet effet, nous rappellerons de prime à bord que les pH du sol se situent entre 4,5 et 9,1 comme il a été indiqué ci-avant dans le tableau 1.

Pour la suite de la discussion, nous nous conviendrons aussi que : (i) tout processus qui augmente la concentration des ions H^+ dans le sol est un processus acidifiant ; (ii) tout processus qui augmente les ions OH^- dans le sol est un processus alcalinisant ou autrement dit basifiant (par exemple le chaulage) ; (iii) tout processus qui augmente la concentration des ions Al^{3+} dans le sol est un processus acidifiant ; (iv) tout processus qui augmente la concentration des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) dans le sol est un processus alcalinisant; (v) tout processus qui diminue la concentration des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) dans le sol est un processus acidifiant (par exemple les exportations des cultures, l'érosion, le lessivage).

4.1 Oxydation de composés S réduits.

Quand les sols contenant les formes réduites du S, comme le sulfide de Fer sont exposés aux conditions aérobiques, le processus d'oxydation est déclenché avec la libération concomitante des ions H^+ dans la solution du sol.



Cette réaction est assurée par les bactéries chimio-autotrophes comme Thiobacillus ferroxidans. L'énergie chimique libérée par ces oxydations est utilisée par les bactéries pour conduire leurs processus métaboliques.

4.2 Aluminium échangeable

Al^{3+} est un cation capable d'hydrolyser l'eau en produisant les ions H^+ . La combinaison des ions Al^{3+} , les différents ions Al produits par l'hydrolyse et la base $\text{Al}(\text{OH})_3$ constituent un système tampon pour les sols de pH = 5-5,5, c'est-à-dire la majorité des sols d'altitude du Burundi. Les espèces solubles sont : Al^{3+} , AlOH_2^+ et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, alors que la forme $\text{Al}(\text{OH})_3$ (gibbsite) est insoluble. Le fer suit la même dynamique que l'Al.



Quand le sol est acidifié, Al^{3+} et les autres formes solubles d'Al augmentent dans la solution du sol et sur les sites du complexe argilo-humique du sol comme cations échangeables. L'Al soluble est toxique pour beaucoup de plantes. Les basses productions enregistrées avec plusieurs espèces végétales sur les sols à $\text{pH} < 5$ sont dues à la faible disponibilité des éléments nutritifs et à la toxicité aluminique.

4.3 H^+ échangeable

La concentration d'un ion donné sur le complexe d'échange relativement à la concentration de tous les autres cations sur le complexe contrôle la concentration dudit cation en solution du sol. Il y a un équilibre entre les cations sur le complexe et ceux en solution du sol. Les ions H^+ échangeables tamponnent ceux dans la solution du sol.

4.4 Groupes des acides faibles sur les argiles, les hydroxydes et la M.O. du sol.



Quand des ions H^+ sont ajoutés, les acides faibles tamponnent le sol en réagissant avec ces ions et quand les ions OH^- sont ajoutés, il y a dissociation de groupes acides faibles produisant des ions H^+ qui réagissent avec les ions OH^- pour produire de l'eau. Les groupes hydroxyles dissocient dans un intervalle de pH limité contrairement aux groupes associés à la M.O.

Pendant, les substances organiques peuvent donner lieu à une augmentation du pH. Cette augmentation du pH d'un milieu acide suite à l'apport d'une substance organique pourrait être due : (i) à la chélation de l'Al par les anions organiques et à la formation de complexes organo-aluminiques non solubles ; (ii) à la réduction des oxydes de Mn et de Fe induite par la décomposition rapide de la matière organique créant un environnement riche en électrons ; (iii) aux déplacements des groupements hydroxyles à la surface des sesquioxides par des anions organiques, suivi par la précipitation de l'Al par les hydroxydes ; (iv) à l'addition des cations basiques suite à la minéralisation de la matière organique ; (v) à la production de NH_3 durant le processus de décomposition.

De l'autre côté, la diminution du pH consécutivement à l'addition de substances organique pourrait être due : (i) à la libération des ions H^+ suite à la dissociation des groupes fonctionnels acides ; (ii) à la nitrification de NH_4^+ issu de l'ammonification, surtout quand elle est suivie de pertes de NO_3^- ; (iii) à l'augmentation de H^+ échangeable suite à l'augmentation de la CEC.

4.5 Acide carbonique/ CO_2 (aqueux)

Dans la nature, ce système constitue une source importante de H^+ . Il constitue un système tampon des sols et des eaux naturelles. La chimie du CO_2 est illustrée ci-dessous.



La concentration de CO_2 , produit de la respiration (des racines des plantes et des microorganismes du sol) contrôle l'acide carbonique. La paire acide carbonique/bicarbonate tamponne le pH dans les sols acides.



4.6 Pertes de cations basiques par les exportations des plantes (action de l'homme)

Comme relevé ci-haut, tout processus qui diminue la concentration des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+) contribue à l'acidification des sols par concentration des cations acides (Al^{3+} et H^+). Parmi ces processus peuvent être cités les exportations des éléments nutritifs (transfert vertical ascendant) par les cultures.

Les cultures de sorgho, de tabac, d'arachide et de maïs sont des cultures qui exportent d'importantes quantités de cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+}). A la longue, elles appauvrissent les sols en ces éléments à tel point qu'ils deviennent improductifs, avec comme corollaires la concentration d'ions acides, particulièrement l'ion Al^{3+} . La disparition de la culture de sorgho dans les régions du Bututsi et du Kirimiro trouverait son origine dans ce processus.

4.7 Pertes de cations basiques par érosion hydrique

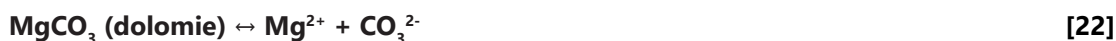
L'érosion hydrique contribue également aux pertes de cations basiques du sol et à l'acidification progressive du sol. Les travaux de l'ISABU dans le Mumirwa central au cours des années 1980-1990 (Duchaufour et al., 1992) mettent en exergue d'importantes pertes en cations basiques (particulièrement le Ca^{2+}) par érosion hydrique aboutissant à une réduction du pH, une augmentation concomitante des ions Al^{3+} , ainsi qu'une diminution du contenu en matière organique du sol (réduction de l'activité microbienne et de la capacité d'échange cationique -CEC-).

4.8 Engrais ammoniacaux



4.9 Sols calcaires

Le pH des sols calcaires est contrôlé par les sels comme les carbonates de Ca et de Mg. Leur dissolution donne invariablement les ions CO_3^{2-} .



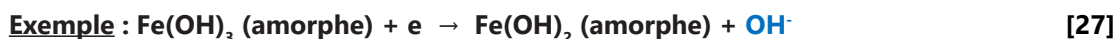
4.10. Sols sodiques

L'augmentation du pH observé dans les sols sodiques est due à une combinaison de réactions d'échange et l'auto-hydrolyse de l'eau. L'échange des ions H^+ pour les ions Na^+ peut avoir lieu sous certaines conditions et résulte dans une augmentation de pH (alcalisation).



4.11. Réduction des substances oxydées du sol

La réduction des ions Fe, Mn et les autres substances oxydées consomme les ions H^+ et libèrent les ions OH^- augmentant ainsi le pH du sol. Cette situation a essentiellement lieu en conditions de sols inondés.



Ce changement de valence entre $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ libère des ions OH^- .

4.12 Transfert vertical ascendant des cations basiques (Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺)

Des plantes à enracinement profond recyclent les éléments nutritifs par transfert vertical (Agroforesterie). L'absorption des cations basiques par les racines dans les horizons de profondeur et leur dépôt dans les horizons de surface par suite de la mort des plantes (décomposition) va contrebalancer le mouvement vertical et la perte par lessivage des cations. Ce processus maintient la saturation en bases et augmentent le pH du sol ou prévient l'acidification des horizons supérieurs du sol. L'une des espèces les plus efficaces dans le transfert vertical remontant (ascendant) des cations basiques est *Tithonia diversifolia*. C'est une espèce candidate pour un engrais vert avec un potentiel de correction des sols acides. L'espèce est présente et prolifique au Burundi.

La nature basique ou acide des substances organiques détermine leur effet sur le pH des sols amendés. Les résidus de légumineuses ont un pouvoir tampon plus élevé que celui des graminées, en raison de leur teneur élevée en Ca et Mg.

4.13 Hydrolyse des sels des bases fortes et des acides faibles

L'hydrolyse des sels issus de bases fortes et d'acides faibles conduit à l'augmentation des ions OH⁻ et par conséquent celle du pH.



5. EFFETS DE L'ACIDITE SUR LES PROPRIETES DES SOLS

L'acidité des sols contrôle la vie dans le sol, la croissance et la production des plantes et l'environnement. Elle contrôle le fonctionnement physique, chimique et microbiologique du sol dans son ensemble. A ce titre, elle constitue l'une des propriétés du sol les plus étudiées et discutées dans tous les ouvrages classiques des sciences du sol. Certains chercheurs avancent que le pH est le principal indicateur de la qualité d'un sol et de sa productivité potentielle.

5.1 Disponibilité des éléments nutritifs

L'acidité causée par le cation Al³⁺ échangeable constitue un des problèmes majeurs de la fertilité des sols du Burundi, comme dans la plupart des régions intertropicales. La présence de l'Al³⁺ dans le sol est accompagné d'une modification de beaucoup de caractéristiques. Beaucoup d'éléments comme le P sont disponibles aux plantes dans des sols légèrement acides à neutres et sont déficients dans les sols acides.

La figure 22 indique que la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol est contrôlée par le pH du sol, de même que les substances potentiellement toxiques. Les composés toxiques comme Al et Pb ont très peu d'effet sur la croissance des plantes en conditions alcalines, mais les affectent très sensiblement en conditions de sols acides. Le pH est aussi un indicateur de sérieux problèmes du sol. Les sols à pH > 8,5 sont indicateurs de problèmes de sodicité (excès de Na dans le sol), tandis que les sols à pH < 4 indiquent que l'oxydation de composés S réduits a lieu.

**FORTE À TRÈS FORTE DEFICIENCE EN ELEMENTS NUTRITIFS SUR
3/4 DU BURUNDI**

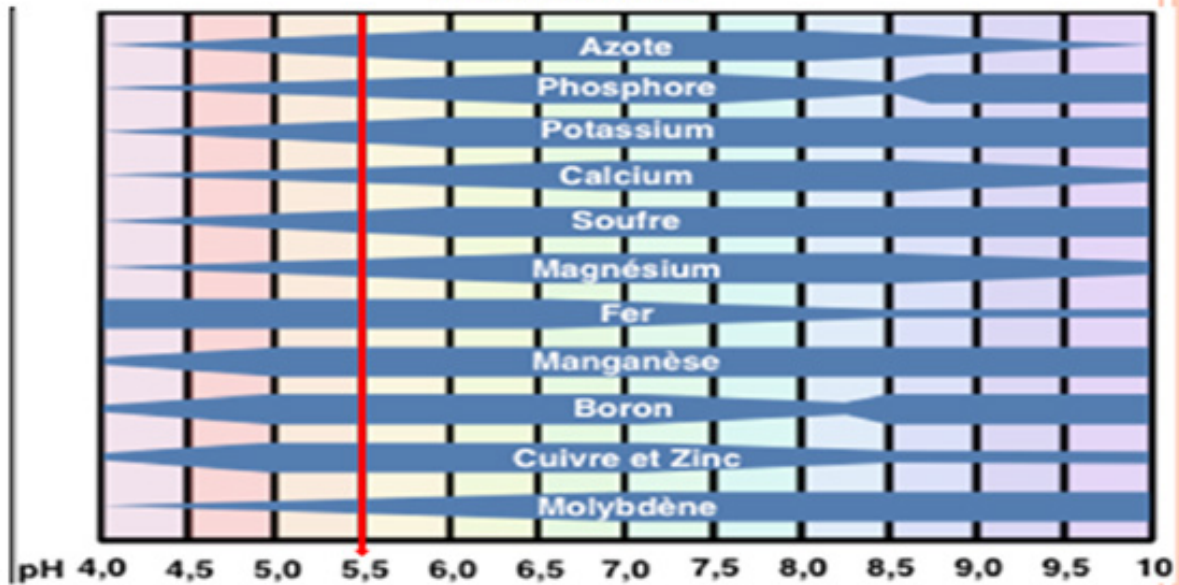


Figure 4. Disponibilité des éléments nutritifs en fonction du pH du sol (Source : H. Chamayou et J.P. Legros, 1989).

L'élément dont la disponibilité dans le sol est sérieusement affectée par l'acidité du sol (mais aussi par son alcalinité) est le P. Dans les sols acides, le **P** est indisponible (fixé) par l' Al^{3+} (et le Fe^{3+}) sous des formes de minéraux secondaires peu solubles dans le sol, à l'exemple de la variscite ($Al(OH)_2H_2PO_4$) et de la strengite ($Al(OH)_3H_2PO_4$). Le pH idéal pour la disponibilité du P se situe entre 6 et 7 (Figure 4). Dans cette marge de pH, tous les éléments nutritifs et l'activité microbienne sont à leurs optima.



Photo 1. Couleur pourpre caractéristique des feuilles de maïs déficientes en P (Vugizo). Source: Projet BFG/ZOA, 2016. Sur la photo Prof. S. Kaboneka.

Le **P** est considéré comme l'élément nutritif le plus limitant de la productivité des sols tropicaux. Les symptômes de déficience en cet élément, qui commencent sur les vieilles feuilles, sont caractéristiques. Les feuilles d'une plante affectée par la déficience en **P** sont de couleur pourpre (voir Photo N°1) indicatrice d'une concentration élevée de **l'anthocyanine** par rapport aux autres pigments (chlorophylle).

5.2. Capacité d'échange cationique (CEC)

Le pH est le principal indicateur de la qualité chimique d'un sol. Il est lié à son pouvoir de rétention cationique (CEC) contrôlé par la quantité et la qualité des colloïdes minéraux (argile 2:1, 1:1 comme la kaolinite, les oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al) et organiques (composés humiques) du sol. Le processus de dégradation des minéraux dans les conditions tropicales et subtropicales humides comme le Burundi aboutissent à la formation de la kaolinite (argile 1 : 1), les oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al qui sont caractérisés par de très faibles capacités de rétention cationique (CEC). En conséquence, de tels sols valorisent très peu les engrais appliqués qui sont soumis à des pertes par lessivage ou par érosion.

La matière organique joue un rôle crucial dans l'amélioration de la CEC de ce type de sol (le plus répandu au Burundi) à travers l'augmentation de la CEC. La CEC de l'humus étant la plus élevée de tous les colloïdes du sol, deux fois plus élevée que celle des smectites/montmorillonite (argile 2 : 1) et plus de 25 fois plus élevée que la CEC de la kaolinite (argile 1 : 1 la plus répandue au Burundi). A titre d'illustration de l'effet améliorateur de la matière organique sur la CEC des sols acides à kaolinite comme ceux des zones de haute altitude et des plateaux du Burundi, considérons quatre cas de sol tous contenant 40 % de kaolinite (CEC = 5 méq/100 g de kaolinite) et évaluons l'effet de % croissants de M.O (200 méq/100 g d'humus) sur leur CEC.

5.3. Efficience de la nutrition minérale des plantes

L'un des effets mesurables de l'acidité des sols est la faible efficience (utilisation) des éléments nutritifs appliqués aux sols acides.

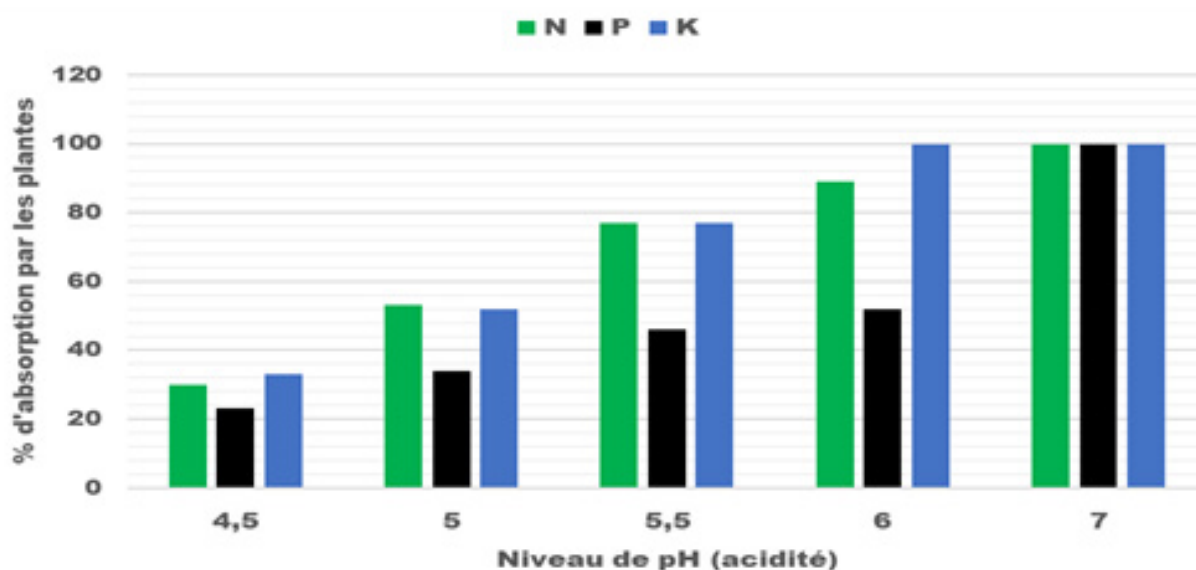


Figure 5. Inhibition de l'absorption racinaire des éléments nutritifs en conditions acides.

La figure 5 illustre cet état de fait. Toute autre chose étant égale par ailleurs, l'efficience de l'absorption de l'Azote, du Phosphore et du Potassium est $\leq 30\%$ au pH=4,5, elle est au maximum 50 % au pH=5, et est située entre 50 (P) et 80 % (N et K). Même au pH=6, considéré comme optimal, l'efficience de l'absorption du P dépasse à peine 50 %.

5.4. Toxicité aluminique (Al^{3+}), manganique (Mn^{2+}) et ferreuse (Fe^{2+})

Cette faible efficacité de l'absorption des éléments nutritifs est entre autre et surtout due à la faible croissance racinaire consécutivement aux effets toxiques des ions H^+ , Al^{3+} , Mn^{2+} et Fe^{2+} . Les deux derniers éléments étant responsables de toxicité dans les conditions inondées.

5.5. Faible décomposition de la matière organique du sol

La dynamique de la matière organique du sol et des matières organiques appliquées est sous le contrôle microbien. La minéralisation des matières organiques est assurée par la faune et la microflore du sol, particulièrement les bactéries et les actinomycètes. Les conditions de pH acides (avec toxicité aluminique) affectent la nature, la densité et l'activité des microorganismes donnant lieu à un faible taux de décomposition de la matière organique, une faible libération des éléments nutritifs y contenus et une faible formation de l'humus. La minéralisation de l'azote et du soufre organiques est très faible dans des $\text{pH} < 5,5$.

De même, la nitrification de l'azote organique (*Nitrosomonas sp*, *Nitrobacter sp*) et l'activité des bactéries responsables de la fixation biologique de l'azote (*Rhizobium sp*) sont également inhibées par les pH acides. Ces microorganismes autotrophes ont des besoins élevés en Ca^{2+} (Hassett et Banwart, 1992), élément qui est justement déficient dans les sols acides avec risques de toxicité aluminique, comme ceux du Burundi.

5.6. Structure du sol

La structure du sol est un paramètre physique essentiel à son aération (disponibilité de O_2 qui contrôle les réactions d'oxydo-réductions) et de l'eau (véhicule des éléments nutritifs), ainsi qu'à l'extension du système racinaire des plantes. Les agents structurants du sol (formation des agrégats) sont la matière organique, les argiles, les carbonates de Ca et de Mg, les oxydes de Fe, les racines et les filaments des microorganismes du sol (Brady, 1990).

Dès lors, il se pose un problème de structure de sol dans les sols acides. La déficience en Ca dans ces sols affecte son effet flocculant des particules du sol et la formation de complexes argilo-humiques, à travers la formation de pont cationique à base de Ca entre les colloïdes minéraux et les composés humiques. L'on se souviendra que, comme discuté ci-haut, l'activité des microorganismes du sol et la formation même de l'humus sont réduites dans les conditions de sols acides. Ce qui aboutit en fin de compte à une faible formation des agrégats du sol.

5.7. Inhibition de la croissance racinaire et la formation des poils absorbants

Les plantes poussent mal sur les sols acides. Les premiers auteurs à ce sujet ont supposé que cela était une conséquence soit de la toxicité de l'ion H^+ , soit des déficiences en calcium et magnésium (George et al., 2012).

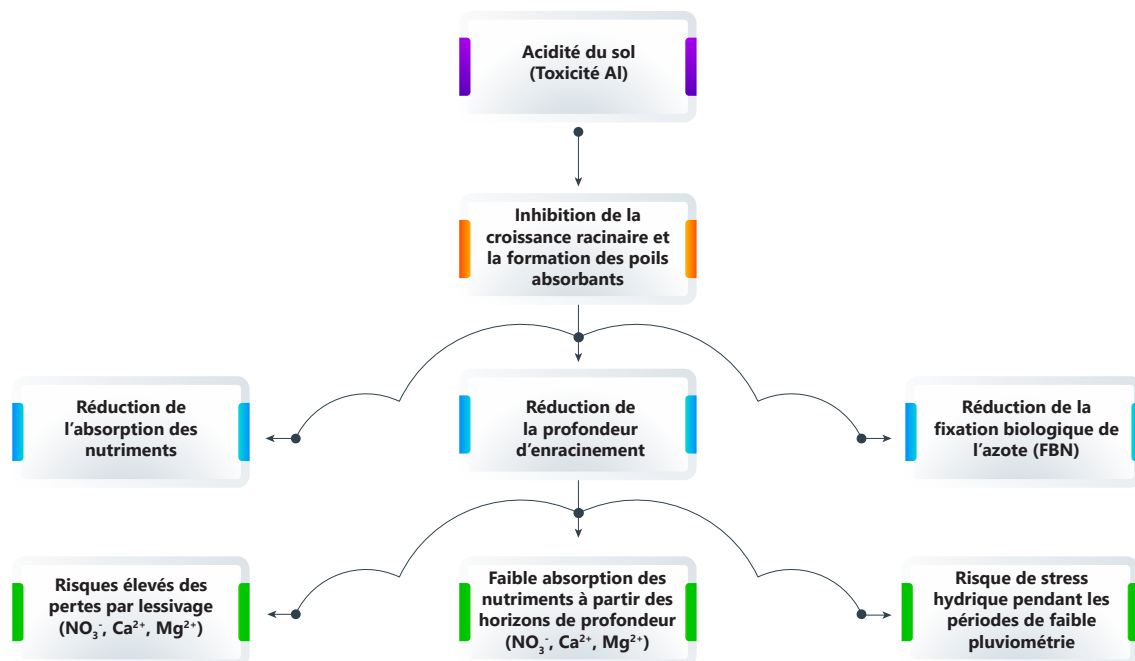


Figure 6. Conséquences de l'inhibition de la croissance racinaire, de l'absorption de l'eau et des nutriments par l'acidité du sol (toxicité Al). (Source : George et al., 2012).

L'effet à long terme de l'acidité du sol et la phyto-toxicité liée à l'Al est la réduction de l'absorption des éléments nutritifs et de l'eau consécutivement à l'inhibition de la croissance racinaire qui constitue leur effet direct (Figure 6). Cela a comme conséquence l'induction du stress hydrique et la déficience et une faible absorption et translocation des éléments nutritifs dans les parties aériennes des plantes, particulièrement le Ca et le Mg. Contrairement au Ca et Mg, la nutrition K n'est pas tant affectée par l'acidité du sol et Al, ce qui conduit à l'augmentation du rapport K/Ca+Mg dans les parties aériennes des plantes avec comme conséquence la déficience en Ca et Mg dans les plantes et les graines, et le déséquilibre alimentaire aussi bien chez l'homme que chez les ruminants qui se consomment ces plantes comme fourrage (tétanie herbeuse).

6. CONTRÔLE DE L'ACIDITÉ DES SOLS

En fin de compte le contrôle du pH et la réduction de la toxicité Al (amendements minéraux et organiques), ainsi que le choix ou la sélection des espèces et variétés tolérantes constituent les principaux mécanismes de la gestion de l'acidité des sols. Dans ce domaine, les avancées de la biotechnologie constituent une voie de recherche à explorer au Burundi, bien que, par le passé, la recherche de l'ISABU avait diffusé une variété de blé (Triticale, un hybride entre le blé tendre et le seigle) réputée tolérante à l'acidité et à la toxicité Al (ISABU, 1990).

6.1. Amendements minéraux (chaulage)

Le matériau le plus couramment utilisé pour le chaulage des sols est la chaux agricole ou la calcite, qui contient principalement du carbonate de calcium (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), un double carbonate de Ca et de Mg.

En simplifiant, dans les sols acides, le carbonate de calcium se dissocie :



La saturation basique s'accroît à mesure que le Ca (et le Mg, si celui-ci est présent) remplace les ions d'hydrogène à la surface du sol :



Dans le processus, les ions d'hydrogène sont neutralisés, et il en résulte une augmentation du pH et une modification des ratios de cations basiques absorbés (dans les particules du sol) et en solution. Ces deux résultats rendent le sol plus propice à la croissance des végétaux (Gitari, 2009).

Les ions aluminium fixés par des sites négatifs à la surface des particules de sol sont déplacés dans la solution du sol et, avec les ions Al déjà présents dans la solution, sont retransformés en sesquioxydes à l'état solide.

Ce qui réduit la concentration d'aluminium en-dessous du niveau qui pourrait être toxique pour les plantes. A mesure que la quantité de sesquioxydes d'Al solides augmente, la capacité du sol à tenir et à échanger les nutriments végétaux cationiques s'accroît. Inversement, la capacité du sol à tenir et à échanger des anions, laquelle dépend du pH, diminue et force les anions comme le sulfate à se dissoudre dans la solution où ils sont plus facilement absorbés par les plantes ou lessivés hors du sol (Hue et Mai, 2002).

L'augmentation du pH du sol a une incidence sur la solubilité des nutriments des plantes, rendant la plupart d'entre eux plus disponibles aux plantes tout en rendant quelques autres moins disponibles. Les concentrations toxiques d'Al, de Mn et possiblement d'autres substances sont neutralisées (Hue et Mai, 2002).

La méthode classique de correction du pH est le chaulage qui consiste à apporter au sol de la calcite (CaCO_3) ou de la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en cas de déficience en Ca et en Mg (Figures 7-9). Le choix de ces minéraux dans la gestion de l'acidité du sol est dicté par le fait qu'ils libèrent par l'hydrolyse les ions OH^- et les ions bivalents Ca^{2+} et Mg^{2+} , qui, en grande quantité (principe d'action de masse), neutralisent l' Al^{3+} .

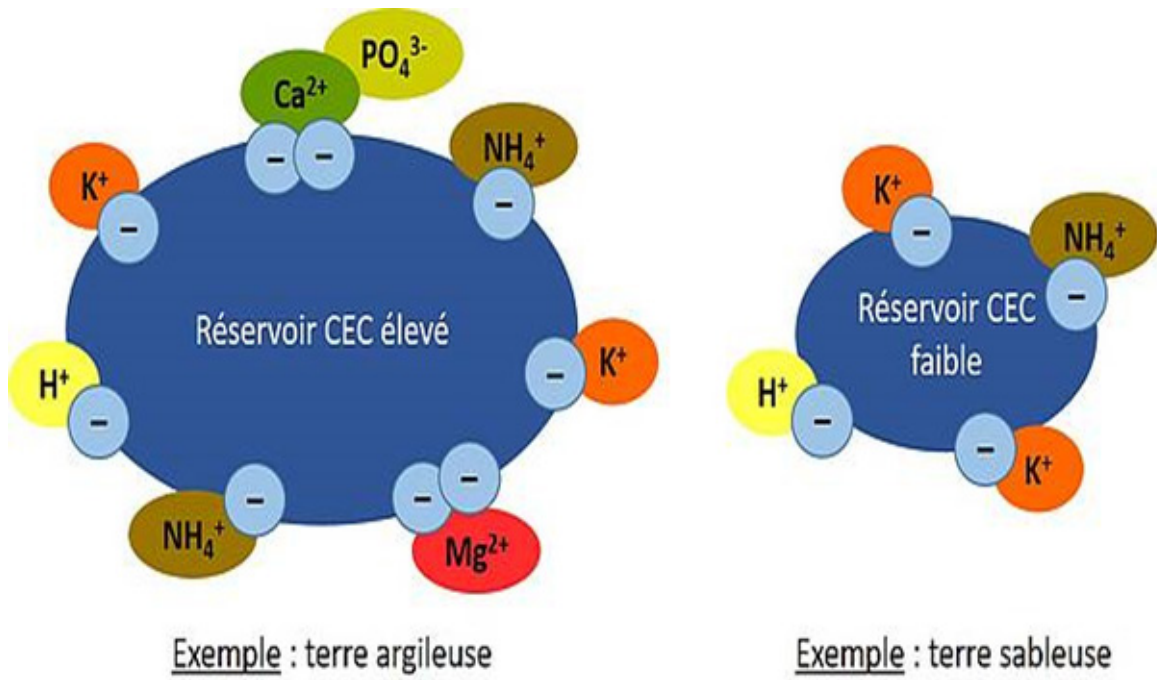


Figure 7. Relation entre la CEC et la texture du sol

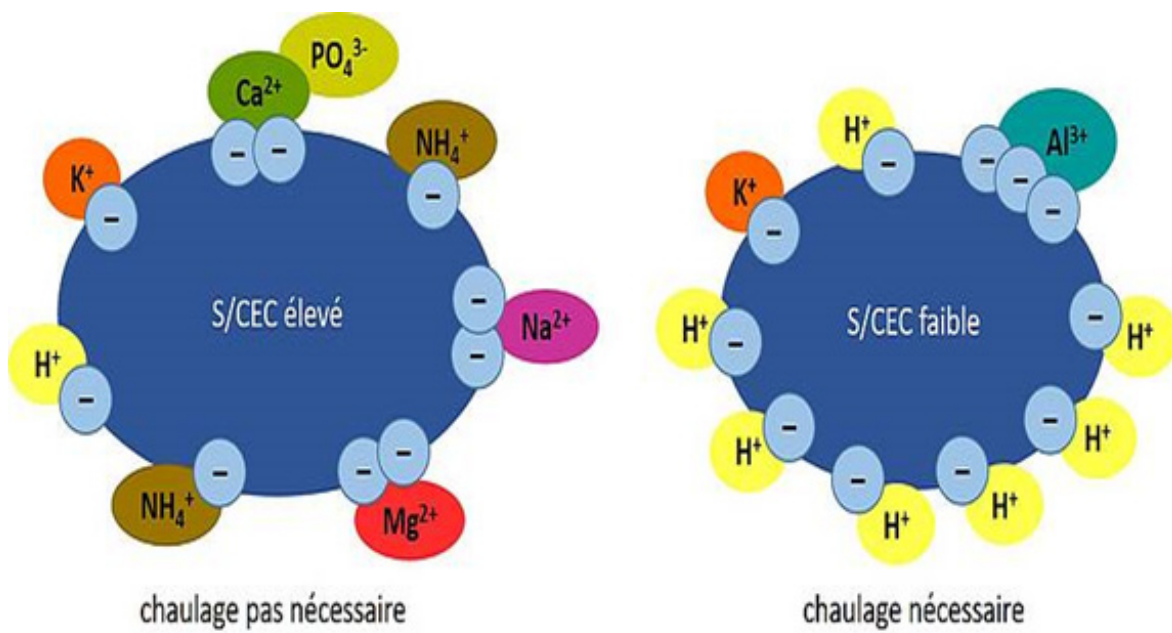


Figure 8. Illustration des conditions d'application de la chaux (dominance des cations acides : Al^{3+} et H^+).

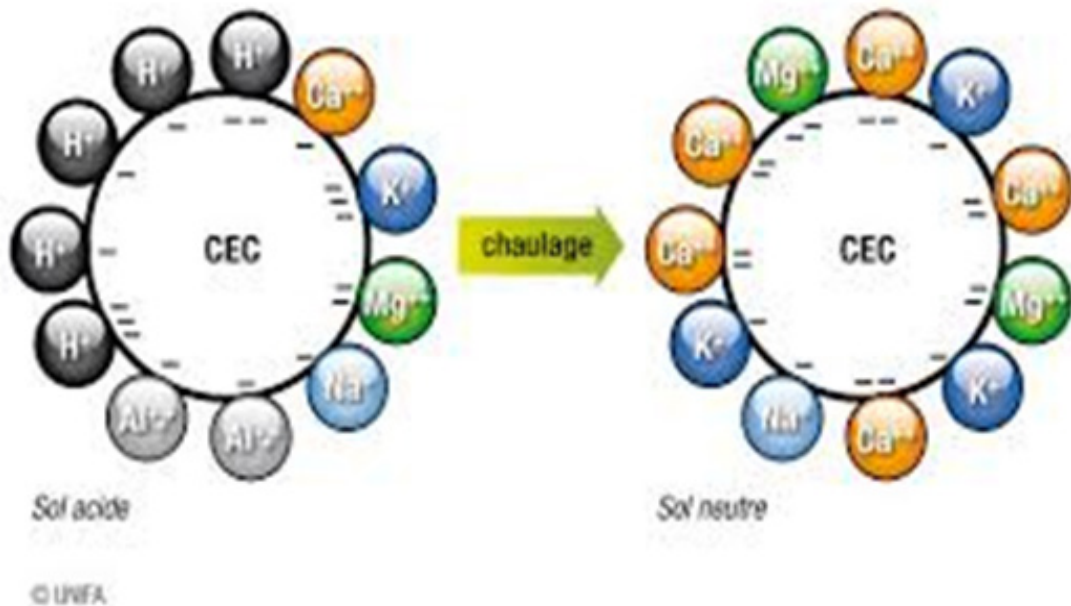


Figure 9. Effet du chaulage : Remplacement des cations acides par les cations basiques.

Le Burundi dispose d'assez grandes quantités de calcaires dolomitiques pour la correction de l'acidité de ses sols (Sebahene, 1991). L'on estime à plus de 600 millions de tonnes de produits de chaulage répartis à travers le pays

Les quantités de chaux à appliquer au sol pour corriger son acidité sont issues des travaux de recherche sur une période assez étendue dans l'espace et dans le temps. Les travaux de l'ISABU proposent des formules d'amendements minéraux selon les cultures (De Keyser, 1991 ; Pacquay, 1991). Par exemple, l'ISABU propose l'application de 1,5 à 2 T/ha pour la culture de la pomme de terre.

Quatre approches/formules ont été proposées par différents spécialistes pour estimer la quantité de chaux à appliquer au sol pour corriger son acidité.

- (i) Méthode basée sur le pH_{eau} ;
- (ii) Méthode basées sur l' Al^{3+} échangeable ;
- (iii) Méthode basée sur l' Al^{3+} échangeable et les cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+}) ;
- (iv) Méthode tenant compte de l' Al^{3+} , de la densité apparente et de la profondeur du sol.

A. La formule qui tient compte du pH_{eau} est la suivante :

B.C (besoins en chaux) = 16 - 2,87 pH (eau). [33]

Cette formule s'applique aux sols dont les $pH_{\text{eau}} < 5,57$ (~ 5,6) pour lesquels les besoins en chaux sont nuls (=0). La formule a été mise au point par Yamoah et al. (1990) au Rwanda voisin.

B. Les formules qui considèrent l' Al^{3+} échangeable comme critère de calcul de la chaux à appliquer au sol sont les suivantes :

B.C = 1,5 Al échangeable, sols avec 2-7 % de M.O [34]

B.C = (2-3 Al échangeable), sols avec 7 % M.O > 7 [35]

L'équation 5.33 tient compte de l'effet tampon de la matière organique, laquelle est dotée de capacité de résistance au changement de pH. Autrement dit, au même pH acide, un sol avec plus de matière organique nécessitera plus de chaux qu'un sol acide pauvre en matière organique. C'est ce qui transparaît dans la formule 4.32.

L'application de ces deux formules 4.32 et 4.33 requiert la **double mesure** de l' Al^{3+} échangeable et de la matière organique (du C en réalité, mesure très laborieuse par les méthodes classiques, par voie humide).

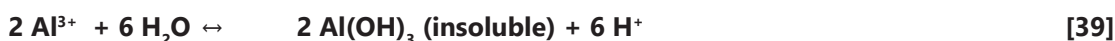
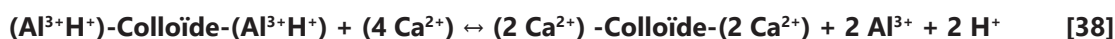
C. La formule ci-après se veut plus précise que les équations 5.32 et 5.33, auxquelles elle peut être assimilée, parce que basée essentiellement sur l' Al^{3+} échangeable. En plus des équations 4.23 et 4.33, l'équation 4.35a et b inclut la densité apparente (un indicateur indirect du contenu en matière organique) et la profondeur du sol.

$$B.C = A (\text{még-Al}/100 \text{ g-sol}) \times B (\text{g-sol}/\text{cm}^3) \times (100 \text{ cm/m})^3 \times (10.000 \text{ m}^2/\text{ha}) \times D \text{-m-profondeur}) \times (50 \text{ mg-CaCO}_3/\text{még-Al}) \times 10^{-9} \text{ t-CaCO}_3/\text{mg CaCO}_3); \quad [36a]$$

$$B.C = 5 A \times B \times D \text{ t-CaCO}_3/\text{ha}; \text{ avec } A = \text{Al échangeable}; B = \text{Densité apparente}, D = \text{profondeur du sol où la chaux doit être appliquée (en m)} \quad [36b]$$

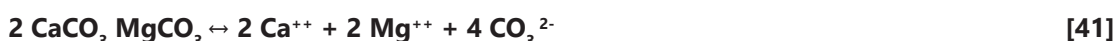
L'application de la formule 5 requiert **une mesure chimique** (Al^{3+} échangeable) et **deux mesures physiques** (la densité apparente) et la profondeur du sol.

Le mécanisme d'action de la chaux appliquée au sol est illustré par la succession des réactions suivantes qui aboutissent à la précipitation de l'Al échangeable sous forme de $Al(OH)_3$ et la neutralisation des ions H^+ par les carbonates en produisant du CO_2 et de l'eau.



La mise en valeur de ces sols amendés réduit progressivement la concentration des ions Ca^{2+} par exportations par les cultures pratiquées, avec comme conséquence la dissolution de $Al(OH)_3$ et la formation de Al^{3+} soluble. Il est alors nécessaire de recommencer l'opération de chaulage, généralement après 2 à 3 ans.

La méthode classique de correction du pH est l'application de la calcite ($CaCO_3$) ou de la dolomie ($CaMg (CO_3)_2$) en cas de déficience en Ca et en Mg. Le choix de ces minéraux dans la gestion de l'acidité du sol est dicté par le fait qu'ils libèrent par l'hydrolyse les ions OH^- et les ions bivalents Ca^{2+} et Mg^{2+} , qui, en grande quantité (principe d'action de masse), neutralisent l' Al^{3+} suivant la succession des réactions suivantes.



La mise en valeur de ces sols amendés réduit progressivement la concentration des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par exportations par les cultures pratiquées ou par pertes par érosion, avec comme conséquence la dissolution de $Al(OH)_3$ et la formation de Al^{3+} soluble. Il est alors nécessaire de recommencer l'opération d'application des amendements calcaires/dolomitiques, généralement après 2 ans.

L'efficacité de la dolomie est fonction du type d'amendement (composition chimique, pureté), granulométrie (distribution des particules, finesse), profondeur d'incorporation homogène dans le sol, volume de réaction et de correction de l'acidité.

En corollaire aux conséquences de l'acidité les effets améliorateurs des amendements calcaires/dolomitiques sont :

1. Réduction de l'acidité des sols
2. Optimisation des engrais, du fumier organique et des variétés améliorées
3. Augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol
4. Augmentation de la Capacité d'Echange Cationique (CEC)
5. Réduction de la toxicité Al, Mn, Fe
6. Structuration du sol = amélioration du drainage, l'infiltration, la perméabilité, la profondeur d'enracinement et la réduction de l'érosion et le ruissellement
7. Augmentation de la croissance et la production des plantes (Figures 3.5 et 3.6)
8. Augmentation des cations basiques (Ca, Mg, K)

6.2. Amendements organiques

La matière organique joue un rôle de chaulage en ce sens que les molécules organiques complexent (chelation) Al^{3+} et le rende ainsi inoffensif. Les molécules impliquées sont les acides organiques di- et tri-carboxylés dont les principaux sont les suivants par ordre décroissant d'action : Acide citrique, acide oxalique, acide tartrique, acide malique, acide malonique, acide salicylique, acide succinique, acide phthalique et acide acétique.

Le pouvoir détoxifiant de ces acides organiques est lié aux positions relatives des radicaux OH/COOH favorables à la formation des structures stables 5 ou 6 cycliques.

Selon Hue et al. (1986), le pouvoir de détoxification de l'Al monomérique par les acides organiques suit l'ordre décroissant suivant :

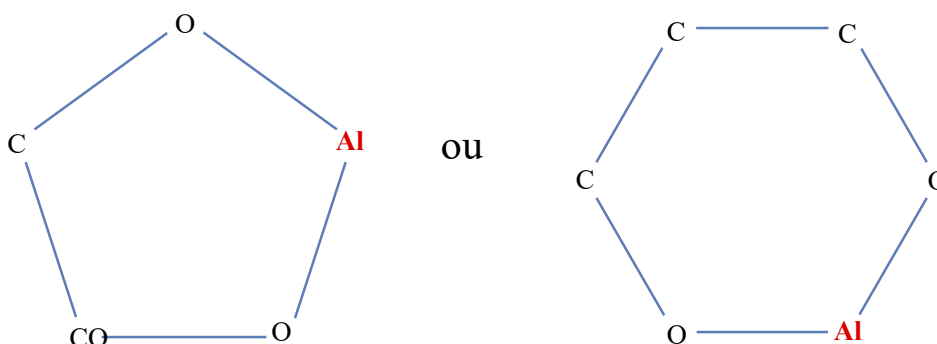
Acide citrique > Acide oxalique > Acide malique > Acide succinique

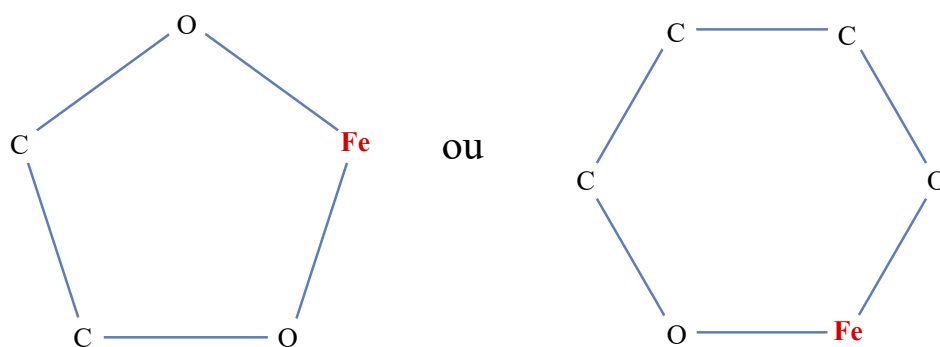
La stabilité des complexes Al-organiques formés suivant le sens inverse.

De la même manière, les acides fulviques et les phénols (à travers leurs groupes fonctionnels carboxyles et phénoliques) détoxifient l'Al. D'où l'importance de la matière organique dans la gestion des sols, non seulement comme sources d'éléments nutritifs pour les plantes (N, S, P) et les microorganismes du sol (C, N, S, P ...) ou comme source majeure de la CEC du sol (voir plus haut), mais également à travers son rôle dans la neutralisation de Al^{3+} présent dans les sols acides.

La matière organique joue un rôle de chaulage en ce sens que les molécules organiques complexent (chelation) Al^{3+} et le rende ainsi inoffensif. Les molécules impliquées sont les acides organiques di- et tri-carboxylés dont les principaux sont les suivants par ordre décroissant d'action : Acide citrique, acide oxalique, acide tartrique, acide malique, acide malonique, acide salicylique, acide succinique, acide phthalique et acide acétique.

Le pouvoir détoxifiant de ces acides organiques est lié aux positions relatives des radicaux OH/COOH favorables à la formation des structures stables 5 ou 6 cycliques, comme :





Selon Hue et al. (1986), le pouvoir de détoxification de l'Al monomérique par les acides organiques suit l'ordre décroissant suivant :

Acide citrique > Acide oxalique > Acide malique > Acide succinique

Stabilité du complexe ←

De la même manière, les acides fulviques et les phénols (à travers leurs groupes fonctionnels carboxyles et phénoliques) détoxifient l'Al. D'où l'importance de la matière organique dans la gestion des sols, non seulement comme sources d'éléments nutritifs pour les plantes (N, S, P) et les microorganismes du sol (C, N, S, P ...) ou comme source majeure de la CEC du sol (voir plus haut), mais également à travers son rôle dans la neutralisation de l'Al³⁺ présent dans les sols acides.

6.3. Choix des cultures et leurs mécanismes d'adaptation

Les cultures diffèrent dans leur adaptation aux sols acides. Certaines plantes exigent des pH proches de la neutralité avec des marges étroites de pH. C'est le cas de la canne à sucre, l'avocatier et le groupe des légumineuses.

Ainsi, les légumineuses (les dicotylédones en général) absorbent plus de Ca²⁺ que de K⁺, alors que c'est l'inverse pour les céréales (monocotylédones) qui absorbent plus de K⁺ que de Ca²⁺ ou de Mg²⁺.

Un certain nombre de cultures poussent et produisent sur des sols franchement acides, c'est l'exemple du théier et du manioc qui ont développé des mécanismes physiologiques d'adaptation aux conditions acides du sol et à de fortes concentrations d'Al soluble dans le sol.

La première réponse des plantes à l'acidité des sols et à la phyto-toxicité Al est l'inhibition de l'élongation racinaire. Selon George et al. (2012), un autre indicateur de la phyto-toxicité aluminique est l'induction de la synthèse de callose dans l'apex racinaire et la concentration sur les parois cellulaires de groupes carboxyliques caractérisés par une forte affinité pour l'Al³⁺.

Cette production d'anions organiques qui complexent l'Al³⁺ est un processus important dans la tolérance des plantes à la toxicité aluminique. Lorsque la formation de complexe Al-organique a lieu sur les surfaces des parois cellulaires, l'on parle de plantes tolérantes « exclusives ». Lorsque cette complexation se passe à l'intérieur des parois cellulaires, les plantes qui en sont capables sont dites « inclusives ». Ces espèces inclusives appartiennent aux familles des plantes les plus tolérantes à l'Al³⁺. Les exemples sont le théier et le *Grevillea robusta* (Proteaceae). Le théier constitue un cas particulier des plantes inclusives du fait que sa croissance et sa qualité organoleptique seraient même améliorées par des concentrations élevées en Al (Konishi et al., 1985).

Au niveau des cultures vivrières, le manioc est plus tolérant à l'acidité des sols, comparé à la patate douce. D'autres plantes tolérantes à l'acidité des sols sont le riz, l'arachide et la pomme de terre, alors que le haricot, le maïs, le blé et la tomate sont des espèces sensibles.

Ces dernières espèces sont caractérisées par des valeurs de capacité d'échange cationique racinaire (CEC racinaire) très élevées, une indication qu'il y aurait une corrélation entre la CEC racinaire et la tolérance ou la sensibilité à l'acidité des sols. Cette tolérance à l'acidité (phyto-toxicité Al) est contrôlée par la sécrétion des acides organiques et d'autres

composés organiques tels que les polypeptides, les phénols et le mucilage (George et al., 2012).

Avec sa faible CEC racinaire, l'Eragrostis, qui domine les pâturages dégradés des régions de haute altitude du Burundi serait un exemple de graminées indicatrices d'acidité des sols et de phyto-toxicité aluminique, alors que les légumineuses, avec des CEC élevées sont très sensibles à l'acidité et à la phyto-toxicité Al^{3+} . Il y aurait donc une relation entre le niveau d'acidité des sols et leur couverture végétale (plantes indicatrices), un domaine de recherche très intéressant dans un contexte de changements climatiques.

Les cultures diffèrent dans leur adaptation aux sols acides (Tableau 5). Certaines plantes exigent des pH proches de la neutralité avec des marges étroites de pH. C'est le cas de la canne à sucre, l'avocatier et le groupe des légumineuses. Ainsi, les légumineuses (les dicotylédones en général) absorbent plus de Ca^{2+} que de K^+ , alors que c'est l'inverse pour les céréales (monocotylédones) qui absorbent plus de K^+ que de Ca^{2+} ou de Mg^{2+} . Un certain nombre de cultures poussent et produisent sur des sols franchement acides, c'est l'exemple du théier et du manioc qui ont développé des mécanismes physiologiques d'adaptation aux conditions acides du sol et à de fortes concentrations d'Al soluble dans le sol.

Tableau 5. Intervalle de pH idéal pour certaines espèces végétales cultivées. (Source : Hassett et Banwart, 1992).

Culture	Marge de pH/croissance optimale
Avocat	6,0-6,5
Théier	4,5-5,5
Macadamia	5,0-6,5
Ananas	4,7-5,7
Canne à sucre	6,5-7,0
Taro/Colocase	5,5-6,5
Carotte	5,5-6,2
Manioc	4,4-5,0
Chou-fleur	5,8-7,2
Maïs	5,8-6,7
Pomme de terre	4,8-5,5
Arachide	5,8-6,2
Riz	5,8-6,2
Soja	5,8-6,7
Tabac	5,0-6,2
Légumineuses	5,8-6,7

La première réponse des plantes à l'acidité des sols et à la phyto-toxicité Al est l'inhibition de l'élongation racinaire. Selon George et al. (2012), un autre indicateur de la phyto-toxicité aluminique est l'induction de la synthèse de callose dans l'apex racinaire et la concentration sur les parois cellulaires de groupes carboxyliques caractérisés par une forte affinité pour l' Al^{3+} .

Cette production d'anions organiques qui complexent l' Al^{3+} est un processus important dans la tolérance des plantes à la toxicité aluminique. Lorsque la formation de complexe Al-organique a lieu sur les surfaces des parois cellulaires, l'on parle de plantes tolérantes « exclusives ». Lorsque cette complexation se passe à l'intérieur des parois cellulaires, les plantes qui en sont capables sont dites « inclusives ». Ces espèces inclusives appartiennent aux familles des plantes les plus tolérantes à l' Al^{3+} . Les exemples sont le théier et le *Grevillea robusta* (Proteaceae). Le théier constitue un cas particulier des plantes inclusives du fait que sa croissance et sa qualité organoleptique seraient même améliorées par des concentrations élevées en Al (Konishi et al., 1985).

Au niveau des cultures vivrières, le manioc est plus tolérant à l'acidité des sols, comparé à la patate douce. D'autres plantes tolérantes à l'acidité des sols sont le riz, l'arachide et la pomme de terre, alors que le haricot, le maïs, le blé et la tomate sont des espèces sensibles.

Ces dernières espèces sont caractérisées par des valeurs de capacité d'échange cationique racinaire (CEC racinaire) très élevées (Tableau 34), une indication qu'il y aurait une corrélation entre la CEC racinaire et la tolérance ou la sensibilité à l'acidité des sols. Cette tolérance à l'acidité (phyto-toxicité Al) est contrôlée par la sécrétion des acides organiques et d'autres composés organiques tels que les polypeptides, les phénols et le mucilage (George et al., 2012).

Avec sa faible CEC racinaire, l'Eragrostis, qui domine les pâturages dégradés des régions de haute altitude du Burundi serait un exemple de graminées indicatrices d'acidité des sols et de phyto-toxicité aluminique, alors que les légumineuses, avec des CEC élevées sont très sensibles à l'acidité et à la phyto-toxicité Al^{3+} . Il y aurait donc une relation entre le niveau d'acidité des sols et leur couverture végétale (plantes indicatrices), un domaine de recherche très intéressant dans un contexte de changements climatiques.

6.4. Rôle des mycorhizes

Les pH acides du sol sont associés à de nombreux effets négatifs sur les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques, la croissance des plantes et l'environnement.

Une série de ces effets négatifs est liste ci-après :

1. Déficiences des plantes en nombreux éléments essentiels à sa croissance (N, P, K, S, Ca, Mg, Mo, B).
2. Toxicité Aluminique, Manganique et ferreuse
3. Faible activité microbienne et faible décomposition de la matière organique
4. Faible capacité d'échange cationique (CEC)
5. Faible fixation biologique de N (déficience en Mo, besoin très élevé en Ca)
6. Faible formation des agrégats et structuration du sol qui impacte négativement la porosité, l'infiltration et la perméabilité du sol, de même que rétention en eau du sol
7. Faible absorption des éléments nutritifs en particulier les engrais (voir Figure 3.2 ci-bas)
8. Inhibition de la croissance racinaire et la formation des poils absorbants
9. Réduction de la profondeur d'enracinement et du volume d'exploration racinaire
10. Risques élevés des pertes de lessivage des nutriments
11. Risques de stress hydrique pendant les périodes de faible pluviométrie.
12. Faible production quantitative et qualitative (sécurité alimentaire et nutritionnelle), valeur nutritive des aliments, du lait et même la valeur fertilisante du fumier
13. Pertes de la biodiversité et mutation végétale au bénéfice de plantes indicatrices d'acidité (e.g. Eragrostis - Ishinge, plantes indicatrices, fougère - Igishurushuru)

La colonisation des racines par les mycorhizes est une composante des mécanismes d'adaptation aux sols minéraux acides naturellement déficients en P avec des concentrations élevées d'Al. Le rôle des mycorhizes est particulièrement mis en évidence pour les cultures avec un système racinaire du type manioc (Howeler et al., 1987). Il a été également démontré que les mycorhizes détoxifient l'Al à travers sa neutralisation et complexation par des acides organiques (Klugh-Steward et Cumming, 2009).

La colonisation des racines par les mycorhizes est une composante des mécanismes d'adaptation aux sols minéraux acides naturellement déficients en P avec des concentrations élevées d'Al. Le rôle des mycorhizes est particulièrement mis en évidence pour les cultures avec un système racinaire du type manioc (Howeler et al., 1987). Il a été également démontré que les mycorhizes détoxifient l'Al à travers sa neutralisation et complexation par des acides organiques (Klugh-Steward et Cumming, 2009).

Dans un sol acide, certains nutriments, comme le P, Ca et le Mg, deviennent moins disponibles pour les plantes. Cela peut entraîner des carences nutritionnelles. L'acidité peut favoriser la solubilité de certains éléments toxiques comme l'Al, qui peuvent nuire aux racines des plantes. Les cultures sensibles à l'acidité, comme le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), le soja (*Glycine max* L.) et le maïs (*Zea mays* L.), peuvent souffrir de rendements plus faibles en raison d'une mauvaise disponibilité des nutriments et de conditions de croissance sous-optimales (Crawford et al., 2008).

Les racines des plantes peuvent être endommagées dans un sol acide, ce qui limite leur capacité à absorber l'eau et les nutriments. Ci-dessous sont listées quelques conséquences notables de l'acidité des sols.

- Un pH faible peut affecter la communauté microbienne du sol, réduisant la décomposition de la matière organique et la disponibilité des nutriments.
- Les processus comme la nitrification peuvent être altérés, ce qui affecte la santé globale du sol.
- Les plantes peuvent montrer des symptômes tels que le jaunissement des feuilles (chlorose) et un développement racinaire limité.
- Des sols acides peuvent rendre les plantes plus vulnérables aux maladies et aux ravageurs.
- Le lessivage d'éléments toxiques comme l'aluminium peut contaminer les eaux souterraines et de surface, affectant la faune aquatique (Hue, 2008).

7. EFFETS DE LA DOLOMIE SUR LE pH DU SOL

Le complexe argilo humique (constitué de très fins éléments d'argile et d'humus) d'un sol est naturellement chargé négativement. Les cations ont donc tendance à s'y agglomérer, notamment l'aluminium (Al^{3+}) et l'hydrogène (H^+ , H_3O^+) appelés ions forts (Cations acides). Or, d'un point de vue nutritif et pour limiter l'acidité du sol, les ions faibles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) sont plus intéressants. D'où l'ajout de la chaux dolomitique.

La chaux dolomitique, composée de carbonate de Ca (CaCO_3) et de carbonate de Mg (MgCO_3), agit en neutralisant l'acidité du sol, augmentant ainsi son pH. Ce processus repose sur une réaction chimique où le carbonate de Ca et de Mg réagit avec les ions H^+ , responsables de l'acidité dans le sol. Cette neutralisation produit de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2), réduisant ainsi la concentration des ions H^+ dans le sol, ce qui fait monter le pH.

La dolomie se dissout pour former des ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), bicarbonate (HCO_3^-) et hydroxyle (OH^-). Le calcium se déplace à la surface des particules du sol remplaçant ainsi l'ion H^+ . Une illustration de ce principe est donné ci-dessous (figure 10).

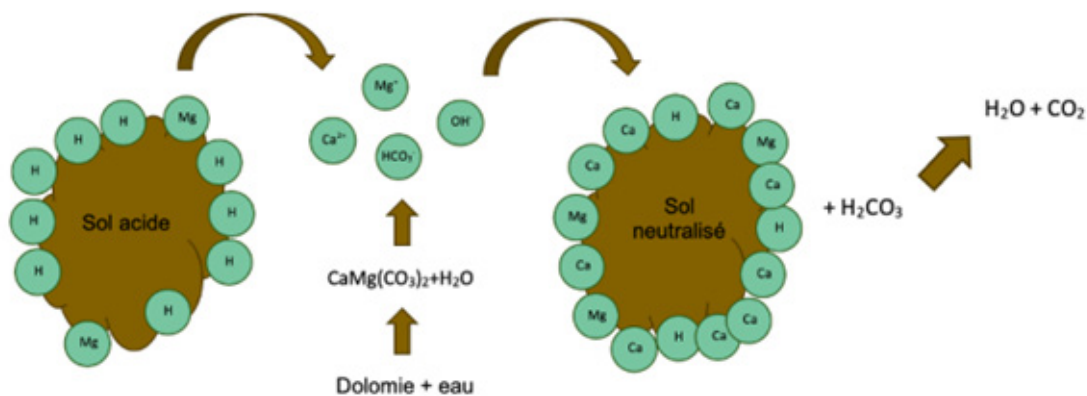


Figure 10. Représentation schématique du remplacement des cations acides par les cations basiques et dégagement du CO_2 au cours du processus de chaulage.

En milieu acide, l'aluminium (Al^{3+}) est souvent soluble et peut devenir toxique pour les plantes. En augmentant le pH du sol, la chaux dolomitique précipite l'aluminium sous forme de composés moins solubles, comme l'hydroxyde d'aluminium ($Al(OH)_3$), ce qui diminue la toxicité aluminique.

Lorsque les carbonates se solubilisent, sous l'effet des précipitations, ils libèrent des ions Ca (et Mg) qui viennent compenser les pertes dues à la lixiviation par les pluies, et des ions carbonates (anions d'une base forte) qui neutralisent les ions H^+ en augmentant le pH Van, 2018

En augmentant le pH, la dolomie contribue à rendre certains nutriments, comme le P, plus disponibles. Dans des sols acides, le P est souvent lié à d'autres éléments, le rendant difficilement assimilable pour les plantes.

En plus de neutraliser l'acidité, la chaux dolomitique fournit également des éléments nutritifs essentiels comme le Ca et le Mg. Ces éléments sont importants pour le développement des plantes, car le Ca contribue à la formation des parois cellulaires et le Mg est nécessaire à la photosynthèse. Ces nutriments sont libérés lentement dans le sol, ce qui permet un effet prolongé sur la qualité du sol et la santé des plantes (Meda et al., 2002).

L'application de la chaux dolomitique est particulièrement utile dans les sols acides où les nutriments deviennent moins disponibles pour les plantes. Le Ca contenu dans la chaux dolomitique favorise également une meilleure structure du sol en améliorant la capacité de rétention d'eau et d'éléments nutritifs.

Pour de meilleurs résultats, il est recommandé de tester le pH du sol avant l'application afin de déterminer la quantité nécessaire pour atteindre le pH optimal pour les cultures. L'application de dolomie augmente le pH et réduit la solubilité de l'Al, diminuant ainsi son impact toxique (Meda et al., 2002).

L'efficacité de la chaux dolomitique dépend de plusieurs facteurs, dont:

1. Le type de sol : Les sols argileux nécessitent généralement plus de chaux pour corriger l'acidité que les sols sableux.
2. L'humidité du sol qui facilite la dissolution du produit.
3. La quantité appliquée : Un calcul précis doit être fait pour ne pas trop ou trop peu modifier le pH.
4. Le temps : Il peut prendre plusieurs mois pour que l'effet complet soit atteint.
5. La granulométrie : Les particules plus fines réagissent plus rapidement avec le sol.

Plus la dolomie est fine, plus elle neutralise rapidement l'acidité du sol. Les particules grossières réagissent très lentement. Un mélange de tailles de particules est souhaitable dans les matériaux de chaulage. Alors que les particules fines sont utiles pour augmenter le pH du sol, les particules plus grossières réagissent pendant un an ou davantage pour maintenir le pH du sol. La préférence de la chaux dolomitique sur la chaux calcique est probablement due à l'équilibre du Ca et du Mg dans la chaux dolomitique (Altland et Jeong, 2016).

Le pH influence la forme sous laquelle le P est disponible pour les plantes. Un pH neutre favorise la disponibilité des ions phosphates (Johan et al., 2021). Une teneur élevée en matière organique dans le sol peut améliorer la disponibilité du P en empêchant la fixation avec des minéraux comme l'Al et le Ca (Félix-Faure et al., 2013).

La matière organique améliore également la structure du sol, favorisant une meilleure aération, un meilleur drainage, et une capacité accrue à retenir l'eau. Cela crée un environnement propice pour les racines et les micro-organismes qui contribuent à la libération du P, en réduisant les conditions de saturation en eau qui favorisent la fixation du phosphore (Hue et Mai, 2002).

Dans les sols acides, l'Al et le Fe sont abondants et forment des complexes peu solubles avec le P, rendant ce dernier indisponible pour les plantes. Cependant, la matière organique, en particulier les acides organiques (comme les acides fulviques et humiques), peut complexer les ions Al^{3+} et Fe^{3+} , les empêchant de se lier au phosphore selon les équations suivantes:

Complexation avec l'Aluminium (Al^{3+}):



où R-COO^- représente un groupement carboxylate d'un acide humique ou fulvique (Caudron, 2004).

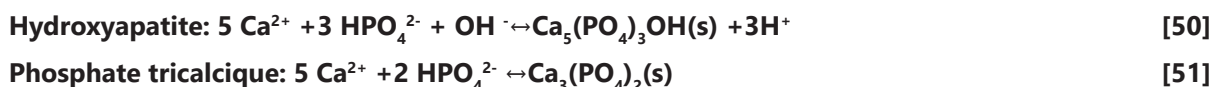
La complexation du Fer (Fe^{3+}) suit le même principe que pour Al^{3+} . Ces réactions empêchent les ions Al^{3+} et Fe^{3+} de précipiter avec le phosphate

Ce processus de chélation stabilise l'Al et le Fe sous des formes non réactives, ce qui permet au P de rester plus disponible sous forme de phosphate dans la solution du sol. Dans un sol acide sans matière organique suffisante, les ions Al^{3+} et Fe^{3+} réagissent avec le phosphate disponible (H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-}) pour former des précipités peu solubles ((Burgat, 2020)



Les acides les plus efficaces pour neutraliser l'aluminium sont les acides aliphatiques du groupe des acides oxaliques, maliques et citriques (Hue, 1986). La matière organique en décomposition libère du phosphore sous forme biodisponible. Lorsque les organismes du sol (bactéries, champignons, etc.) dégradent la matière organique, ils minéralisent le P organique en formes inorganiques (phosphates) que les plantes peuvent absorber. Cela améliore la disponibilité du phosphore, surtout dans les sols où les réserves de P inorganique sont faibles.

Dans les sols alcalins, le Ca tend à précipiter le P en formant des phosphates de Ca peu solubles, comme (AIEA, Vienna, 2002) :



La matière organique peut réduire cette précipitation en complexant les ions Ca, les rendant ainsi moins disponibles pour réagir avec le P. Cela permet de maintenir une plus grande fraction de P sous une forme dissoute et assimilable (Roche et al., 1980).

8. CONCLUSION

L'acidité des sols, souvent associée à la toxicité aluminique, manganique ou ferreuse constitue pour bien d'agriculteurs et d'agronomes le principal facteur limitant de la production et la productivité agricole dans les pays tropicaux. Cependant, sa gestion est bien possible moyennant bien entendu des moyens adéquats, mais surtout en adoptant une stratégie rationnelle dans cette gestion. Au Burundi, nous sommes d'avis que la gestion des sols acides, alliques et non alliques, doit passer par les étapes suivantes. D'abord et avant tout corriger l'acidité et la toxicité aluminique des sols (les ressources minérales sont localement disponibles), en augmenter la CEC par application de la matière organique, puis, après, suivront alors l'application des engrais, le choix de meilleures variétés et techniques culturales et antiérosives et, enfin procéder à une analyse de la rentabilité de l'opération, comme dans toute entreprise de production.

Remerciements

L'auteur est gracieusement reconnaissant vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir facilité la dissémination et le partage des informations scientifiques contenues dans cet article durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. ADRAO. 2002. Toxicité ferreuse dans les bas-fonds : la rouille du riz. 9 p.
2. Brady, N.C. 1990. The nature and properties of soils. Tenth Edition. Macmillan Publishing Company. New York. 621 p.
3. Clodi, M., C. Hicintuka, S. Kaboneka, J. Le Turioner. 2022. Etude de faisabilité pour le renforcement de la filière « Amendements calcaires/Dolomie » au Burundi. Rapport Final de Mission pour le compte d'IFDC (Projet PAGRIS). RODEVA. 15 février 2022. 112 p. Financement de l'Ambassade des Pays Bas au Burundi.
4. Cochrane, T.T., J.G. Salinas, and P.A. Sanchez. 1980. « An equation for liming acid mineral soils to compensate for crop tolerance ». *Trop. Agric. (Trinidad)* 57: 133-140.
5. Crawford Jr, T.W., U. Singh and H. Breman. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa Great Lakes Region. An IFDC Catalist Project Report. 138 p. Kigali, Rwanda.
6. De Keyser, S. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de correction (p. 58-80). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
7. Duchaufour H., Bizimana M., Mikokoro C., 1992. Les acquis de la recherche à l'ISABU en matière de protection et de restauration des sols. Séminaire sur l'érosion au Burundi, 24 p.
8. Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
9. George E., W.J. Horst and E. Neumann. 2012. Adaptation of plants to adverse chemical soil conditions. Chapter 17 (409-472). In Marschners's Mineral nutrition of higher plants. Third Edition. Elsevier Ltd. 651 p.
10. Hassett, J.J. and W.L. Banwart. 1992. Soils and their environment. Prentice Hall. New Jersey. 424 p.
11. Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 2005. Soil Fertility and
12. Howeler, R.H., Sieverding, E. and Saif, S. 1987. Practical aspects of mycorrhizal technology in some tropical crops and pastures. *Plant Soil* 100: 249-283.
13. Hue, N.V., Graddock, G.R. and Adams, F. 1986. Effect of organic acids on Al toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 28-34.
14. Hue N.V. and Mai. 2002. Manganese toxicity in watermelon a affected by lime and compost amended to a Hawaiian acidic oxisol. *Hortscienc* 37(4): 656-661. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.4.656>.
15. IFDC/Catalist.2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa's Great Lakes Region. Kigali, Rwanda. 138 p.
16. ISABU. Objectifs et résultats du programme de fertilité des sols à l'ISABU. In Journées de la recherche agronomique. Bujumbura, 3 au 8 Décembre 1990. 471 p.
17. Johan, P.D., Ahmed O.H., Omar L. and Hasbullah N.A. 2021. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. *Agronomy* 11(10). 2010. <https://doi.org/10.3390/agronomy/11102010>.
18. Jones, J.B. 2012. Plant Nutrition and Soil Fertility Manual. 2nd Edition. CRC Press. 282 p.
19. Kaho, F., Yemefack, M., Feujio-Teguefouet et Tchantchaoang, J.C. 2011. Effet combiné des feuilles de *Tithonia diversifolia* et des engrais inorganiques sur les rendements du maïs et les propriétés d'un sol ferrallitique au Centre Cameroun. *Tropicultura* 29 (1) : 39-45.
20. Klugh-Stewart, K. and J.R. Cumming. 2009. Organic acid exudation by mycorrhizal *Andropogon virginicus* L. roots in response to aluminum. *Soil Biol. Biochemistry.* 41: 367-373.
21. Konishi, S., Miyamoto, S. and T. Taki. 1985. Stimulatory effects of aluminum on tea plants grown under low and high phosphorus supply. *Soil sci. Plant Nutr.* 31: 361-368.
22. Meda, A.R. Pavan M.A., Cassiolato M.E. and Miyazawa M. 2020. Dolomitic lime's reaction applied on the surface

of a sandy soil of the Northern Parana Brasil. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 45(2): 219-222. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132002000200014>

23. Morita, A., Yanagisawa, O., S. Takatsu, S. Maeda and S. Hiradate. 2008. Mechanisms for the detoxification of aluminum in roots of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze). *Phytochemistry* 69: 147-153.
24. Musonerimana, S., A. Niyonkuru, P. Ndayihanzamaso, E. Semenova, M.C. Niyuhire, M. Sendegeya, S. Kaboneka, S. Ndiokubwayo, O. Nduwimana, M. Beun & A. Nibasumba. 2025. Maps of major soils parameters : A reference for monitoring soil fertility in Burundi. *Sustainable Environment* 11 : 1. 2521932. Doi : 10.1080/27658511.2025.251932.
25. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, C. Hicintuka et M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110 p.
26. Ntiburumusi, F., S. Ntibashirwa et Z. Nzohabonayo. 2002. Synthèse référentielle des travaux de recherche sur la fertilisation des cultures au Burundi. ISABU. Programme Fertilité des Sols. 92 p.
27. Pacquay, R. Expériences de la recherche/développement sur l'amendement calcaire (p. 81-92). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
28. Prasad, R. and J.F. Power. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture. CRC Press LLC, Boca Raton, FL. 356 p.
29. Rengel, Z. and D.L. Robinson. 1989b. Aluminum effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. *Agron. J.* 81 : 208-215.
30. Roche, P., Grière L., Babre D., Calba H. et Fallavier P. 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux : Appréciation des niveaux de carence et des besoins en Phosphore.
31. Schalbroeck, J. J., and L. Opedecamp. 1985. Sensibilités Différentielles du Blé (*Triticum aestivum*) et du Triticale (*X. triticosecale*) à l'Acidité des Terres Dans la Mugamba (Burundi). Actes du Dixième Forum International Sur la Soil Taxonomy et Les Transfers d'Agrotechnologie : Burundi et Rwanda, 1–12 avril 1985.
32. Sebahene, M. 1991. Les ressources en calcaire du Burundi (p. 113-118). Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. p. 310.
33. Shehata N. 1991. Recherches menées dans le but de l'amélioration des sols acides et/ou alliques d'altitude (p. 93-107). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
34. Van Den Berghe. 1991. Le problème des engrais acidifiants (p. 108-112). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
35. Van L. and Westerman A. 2018. Soil pH and Lime Requirement Determination. *SSSA Book Series* (p. 73-126). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/SSAbookrev.3.3.ed.C5>.
36. Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, and M. R. Malcolm. 1990. "Application of Expert Systems to the Study of Acid Soils in Rwanda," *Agric. Ecosystems Environ.* 30:203–218.

Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi : Distribution spatiale et composition chimique

**Aristide Gisanganya* . Directeur de la Recherche Géologique et du Cadastre Minier. B.P. 3238.
Bujumbura Burundi.**

* Auteur pour correspondance : aristide.gisanganya@ub.edu.bi. gisanganya_aristide@hotmail.com

Résumé

Dès les années 1960, les travaux de divers experts ont mis en évidence l'inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins du Burundi. Les premiers géologues se sont concentrés au Sud-Est du Burundi (région de Mosso et du Nkoma) où des gisements de calcaires dolomitiques ont été identifiés. Dans l'ensemble, les gisements sont répartis sur trois régions géographiques distinctes que sont: la région du Nord-Ouest du pays, la région Nord à Busiga et la région du Moso dans les dépressions de l'Est. Ces différents gisements ont été chimiquement caractérisés pour étudier leur potentiel d'utilisation dans l'industrie du ciment et en agriculture. La présente note a relevé deux statistiques quantitatives contradictoires. En effet, les statistiques vieilles de 30 ans indiquent que le Burundi dispose d'assez grandes quantités de calcaires dolomitiques pour la correction de l'acidité de ses sols. A l'époque, l'on estimait à plus de 600 millions de tonnes d'amendements répartis à travers le pays, de loin supérieurs aux données avancées par l'auteur de cette note. Dès lors, une actualisation des statistiques s'impose. Dans tous les cas, bien que certains gisements de calcaires et de dolomies soient de taille modeste ou peu connus, il existe des dépôts exploitables, permettant ainsi de répondre aux besoins immédiats. L'intérêt économique des gisements calcaires et calco-dolomitiques connus au Burundi est crucial pour l'industrie, la construction et l'agriculture (correction de l'acidité du sol).

Mots clés : Gisements calcaires et calco-dolomitiques, Moso, Busiga, Nord-Ouest du Burundi, construction, agriculture.

Abstract

As early as 1960, notable expert work has been accomplished on calcareous, dolomitic and travertine deposits in Burundi. The first (Belgian) geologists have concentrated their explorations in the South-West on Burundi (Mosso and Nkoma regions) where substantial dolomitic deposits have been identified. Overall, deposits are allocated in three distinctive geographic regions : North West, North and the Mosso region (Eastern depressions). All these different deposits have been chemically characterised to evaluate their potential usage in cementery and agriculture. The present article shows contradictory quantitative statistics. In fact, old data (30 years) indicates that Burundi calcareous and dolomitic deposits are estimated to 600 millions tons, a tonnage much higher than that advanced by the author of the present note. This situation calls for a statistical update of calcareous, dolomitic and travertine deposits in Burundi. Although certain calcareous and dolomitic deposits are small and little circumscribed, there are sufficient immediately available mineral resources in the country for use in the industry, construction and agriculture (correction of soil acidity).

Keywords : Calcareous, dolomitic, travertine, deposits Moso, Busiga, Mosso, North-West, Burundi, cementery, agriculture.

1. INTRODUCTION

Des travaux de recherche géologique et minière menés sous la supervision du Ministère en charge de la Géologie et des Mines du Burundi, ont abouti à la découverte d'indices de diverses minéralisations ou fossiles. Certaines de ces minéralisations ont connu une évaluation détaillée: le nickel, les terres rares, l'or, le fer-titane-vanadium, le colombotantalite et minerais associés, les phosphates et la carbonatite, le kaolin, la tourbe, le calcaire et la dolomie, etc....

En 1964, des travaux menés par M. Verhaeghe ont mis en évidence l'inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins du Kivu, du Rwanda et du Burundi. En 1965, les travaux de l'expert Géologue Arnaud Waleffe sur l'Etude géologique du Sud-Est du Burundi (région de Mosso et du Nkoma) ont identifié les calcaires dolomitiques dans la région de Rutana-Bukemba.

Au Burundi, on enregistre trois sortes de gisements de calcaires: (1) Travertins: liés au volcanisme. (2) Origine ignée: pas très intéressante. (3) Sédimentaires: les plus nombreux. Ces gisements sont répartis dans trois régions géographiquement distinctes, à savoir: la région du Nord-Ouest du pays, la région nord à Busiga et la région du Moso (Figure 1).

2. REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES GISEMENTS CALCAIRES ET DOLOMITIQUES AU BURUNDI

Calcaires de la région Nord-Ouest

La région Nord-Ouest du pays où l'on y trouve deux types de calcaires d'origines très différentes: des travertins récents dans toute la plaine: à Cibitoke et à Gihanga; des calcaires métamorphiques dans les collines au Nord de Bubanza et qui longent cette plaine (Figure 2).

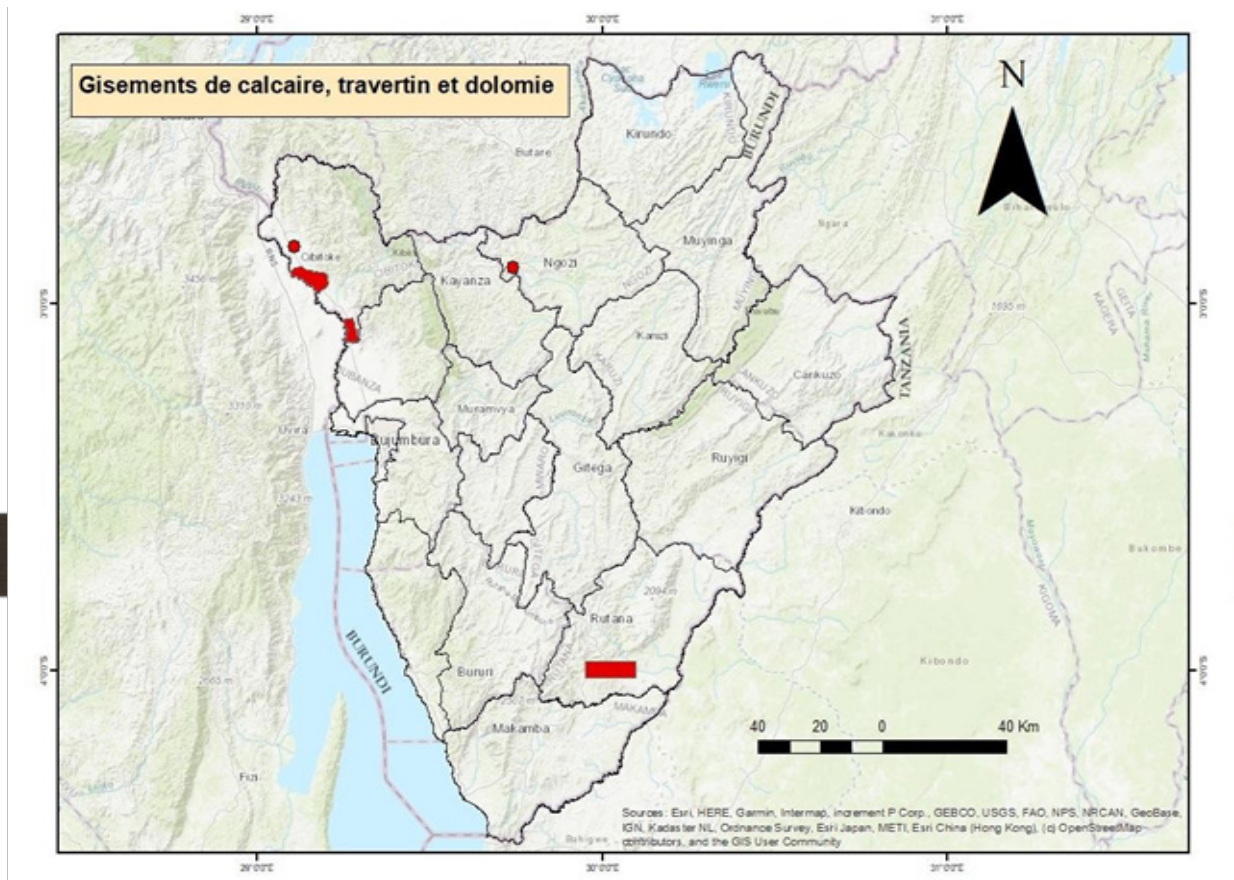


Figure1. Localisation de gisements calcaires travertin et dolomie au Burundi

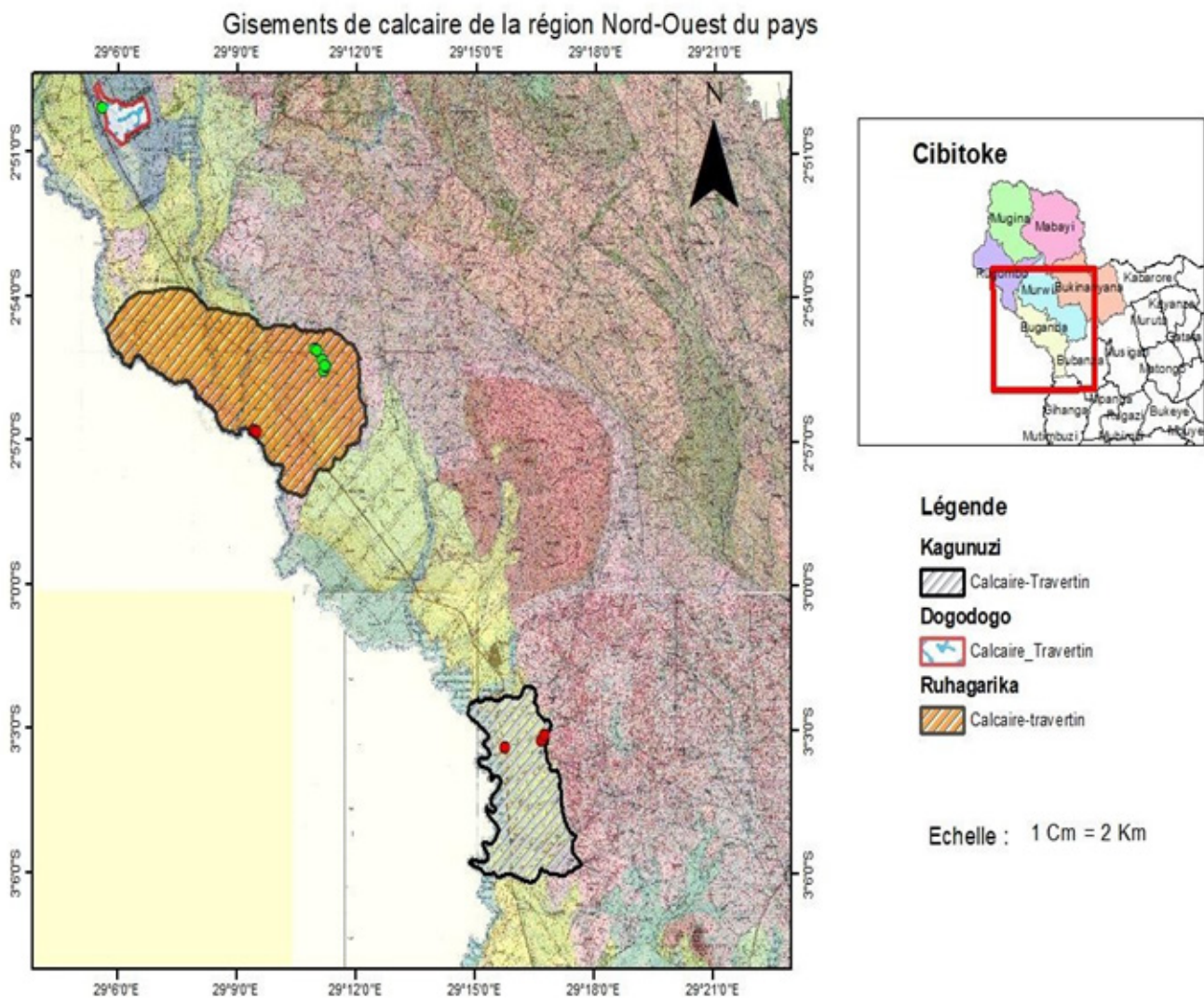


Figure 2. Localisation des gisements calcaires de la region Nord-Ouest du Burundi

Les travertins calcaires de la région sont trouvés dans de nombreux ravins surplombant la Rusizi. Ils ne forment pas souvent des masses compactes (croûtes), mais des rognons mélangés à de la terre ou à du sable micacé. Leur épaisseur est très variable mais ne dépasse jamais quelques mètres. La masse qui semble la plus volumineuse est située le long de la Rusizi sur la transversale VI. Les travertins de Gihanga se présentent sous forme de bancs massifs ou des nodules disséminés dans les alluvions lacustres. Ces couches sont de faible épaisseur et recouverte d'une masse importante de stérile.

Le calcaire dans cette région est entouré d'un complexe micacé (micaschistes et paragneiss feldspathisés). Ce sont des calcaires métamorphiques de couleur claire (blanche ou brune) avec des traces visibles d'oxydes hydrate de fer. Les minéraux de métamorphisme rencontrés sont assez fréquents et donnent en général de la wollastonite (silicate de calcium), du disthène et diverses amphiboles calciques. Sur la rive droite du marais Kagisa, à 3 km au Sud de la mission de Busiga (près de Ngozi), des travertins calcaires ont été déposés par les eaux dans un ancien thalweg, sur une épaisseur de 70 cm environ. Ce dépôt est recouvert de 50 à 60 cm de terre noire mêlée à du gravier fin.

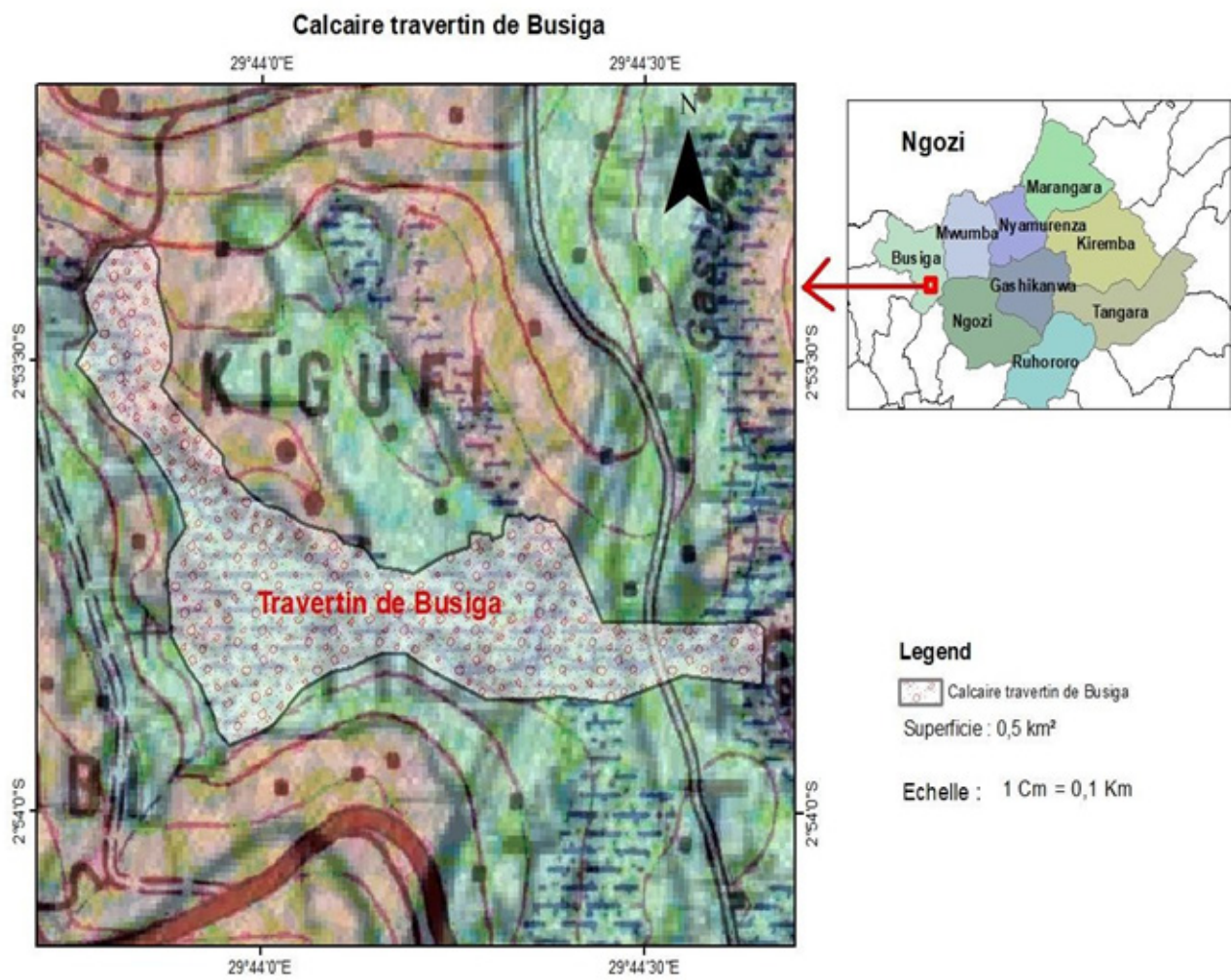


Figure 3. Localisation des gisements calcaires de la région Nord-Ouest du Burundi

Calcaires travertins de la région Busiga/Ngozi (Figure 3)

Sur la rive droite du marais Kagisa, à 3 km au Sud de la mission de Busiga (près de Ngozi), des travertins calcaires ont été déposés par les eaux dans un ancien thalweg, sur une épaisseur de 70 cm environ. Ce dépôt est recouvert de 50 à 60 cm de terre noire mêlée à du gravier fin.

Calcaires dolomitiques du Moso/Rutana

Les calcaires de Moso sont des calcaires dolomitiques, qui appartiennent au groupe de la Malagarazi, étage supérieur du système de la Lumpungwe (grès feldspathiques, psammites, schistes argileux calcaires). Ces calcaires dolomitiques sont appelés « calcaires de Musasa » par les premiers géologues les ayant étudiés (Delhaye et Salée).

Localisation géographique du calcaire dolomitique de Moso (Figure 4)

Les affleurements de roches calcaires dolomitiques de Moso se rencontrent sur plusieurs collines de Bukemba dont les plus importants sont situés sur les collines de Mutara, Murama, Bugiga et Butare.

Les deux premières collines sont séparées par la rivière Muyovozi un peu au Nord et au Nord Ouest de la confluence de la Musasa en bordure de la culture de l'ISABU Moso au Nord. Les deux autres collines Bugiga et Butare se retrouvent à droite de la Musasa à quelque 280 m de la route Bukemba-Rutana pour Bugiga et à la bifurcation de la route Makamba et Gitanga pour Butare.

Cadre géologique du calcaire dolomitique de Moso

Le calcaire fait partie de l'étage supérieur du système de la Lumpungu tel que définie par Delhaye et Salée. Il a été dénommé « calcaire dolomitique de la Musasa ». Les bancs de calcaires dolomitiques sont gris clair à gris foncé en bancs massifs, brèches intraformationnelles et horizons silicifiés à la base.

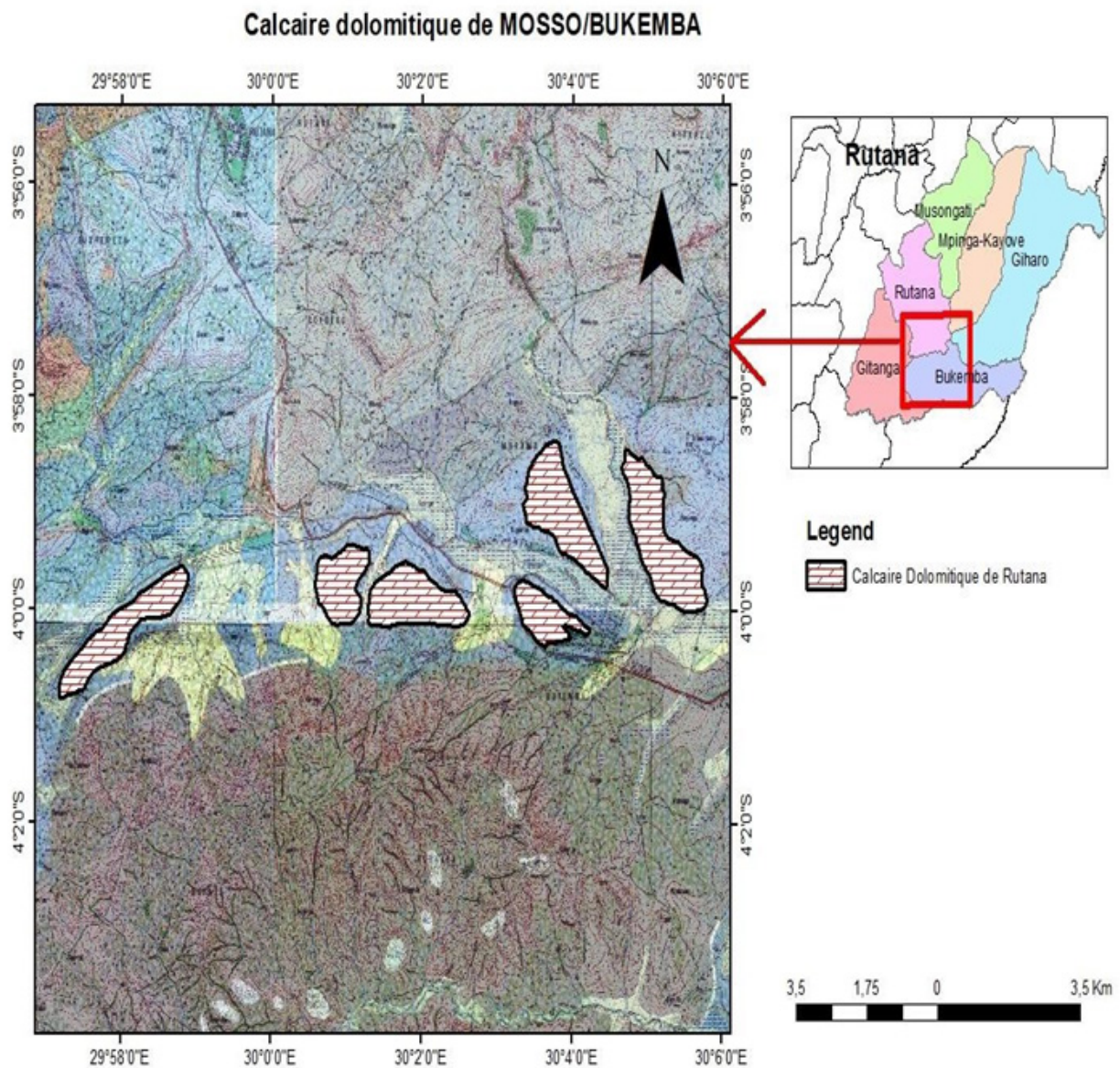


Figure 4. Localisation géographique des calcaires dolomitiques du Moso

3. COMPOSITION CHIMIQUE DES CALCAIRES DOLOMITIQUES DU BURUNDI

La composition chimique (% CaO et % MgO, % VN) d'un certain nombre d'échantillons de calcaires dolomitiques du Moso est indiquée dans le tableau 1 selon les localisations géographiques : Bukemba, Bugiga, Murama, Rurwe, Muzye.

Tableau 1. Analyse qualitative de calcaires dolomitiques du Moso

No Labo	% CaO	% MgO	VN (%)	Localisation
529	24	16,85	47,59	Bukemba
530	35,05	22,4	66,41	
531	3,09	1,49	5,18	
532	28,02	21,38	57,95	
533	26,42	17,26	50,58	
534	27,68	12,99	45,87	
535	28,88	21,08	58,39	
536	26,29	17,03	50,13	
537	27,48	19,05	54,15	
538	26,92	19,36	54,02	
539	1,94	0,83	3,55	
540	1,43	0,71	2,42	
541	25	12,79	42,91	
542	24,11	15,82	46,26	
543	24,09	16,55	47,26	
544	22,6	16,3	45,42	
545	30	21,3	59,82	
546	34,15	23,58	67,16	Bugiga
547	21,56	16,59	44,79	
548	20,94	15,72	42,95	
549	29,67	22,8	61,59	
550	21,5	16,05	43,97	
551	34,5	24,55	68,87	Murama
552	28,08	20,58	56,89	
553	24,02	16,04	46,48	
554	28,18	20,95	57,51	
555	30,28	21,9	60,94	
556	9,46	4,95	16,39	
557	26,52	18,41	52,29	
558	30,36	20,09	58,49	
559	27,67	19,03	54,31	
560	25	19,59	52,43	
561	22,52	15,45	44,15	Rurwe (Murama)
562	25,59	18,03	50,83	
563	25	17,7	49,78	
564	27	19,75	54,65	
565	24	28,5	63,90	
566	28,92	16,3	51,74	
567	31,07	17,72	55,88	
568	29,9	21,18	59,55	
569	31	46,39	109,85 ??	
570	29,50	12,05	46,37	
571	31	18,05	56,27	

572	2,5	0,75	4,75	
573	3	3,25	7,55	
574	35	25,6	70,84	Muzye (Rutamba)
575	2	0,95	3,33	
576	2	0,85	3,19	
577	1,5	0,80	2,62	
578	3,7	2,5	7,20	
579	2,89	0,96	4,23	
580	1,64	0,71	2,63	
581	2,08	10,42	16,67	
582	13,51	10,36	28,01	
583	22,22	18,18	47,67	Muzye (Ny.K.)
584	12,5	10	26,5	
585	21,5	17,29	45,71	
586	13,75	11,25	29,50	
587	11,54	9,4	24,70	
588	17,83	7,75	28,68	
589	22,3	0,4	22,86	Conglomérat de Bugiga

Les résultats d'analyses révèlent une forte variabilité compositionnelle et une insuffisance en CaO et une teneur élevée en MgO, ce qui n'est pas favorable à la fabrication du ciment. En effet, pour obtenir un ciment de bonne qualité, la teneur en CaO doit dépasser 50 %, tandis que celle de MgO ne doit pas excéder 5 %.

Aussi, en conformité avec les valeurs normatives de % en CaO et en MgO proposées pour le Burundi (Clodi et al., 2022), très peu d'échantillons répondent au critère. Le peu d'échantillons qui y répondent sont marqués en gras dans le tableau 1 ci-dessus. De l'autre côté, quelques échantillons partagés par la Direction en charge de la Géologie montrent des valeurs de MgO et des valeurs de neutralisation élevées (marquées en rouge). Elles renseignent sur un risque de déséquilibre Ca/Mg.

Par contre, les essais effectués par l'ISABU confirment que la chaux et les engrais chimiques issus respectivement des roches calcaires de Murama et de Butare donnent de bons résultats en agriculture pour corriger l'acidité des sols. Cette analyse est confirmée par les résultats analytiques des sites indiqués dans les tableaux 3 à 7 ci-dessous. Dans ses travaux d'inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins, effectués en 1964, Verhaeghe a partagé le calcaire dolomitique en 3 groupes : 1. Butare : environ 70 000 000 m³ ; 2. Shaka : environ 20 000 000 m³ ; 3. Gihofi : le gisement couvre plusieurs kilomètres carrés, mais aucune évaluation de volume n'est réalisée.

Bien que certains gisements de calcaires et de dolomies soient de taille modeste ou peu connus, il existe des dépôts exploitables, permettant ainsi de répondre aux besoins immédiats. L'intérêt économique des gisements calcaires et de dolomies connus au Burundi est crucial pour l'industrie, la construction et l'agriculture. La Direction de la recherche géologique et du cadastre minier avance les chiffres suivants en termes de réserves calcaires et dolomitiques (Tableau 2).

Tableau 2. Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi

Localisation	Réserves	Teneur	Observations
Kagisa/Busiga	100 000 T	45 % de CaO	En cours d'exploitation par la société Half Magara Meza
Cibitoke	2,1 MT	40,32 % CaO 2,2 % MgO	En grande partie exploitée par la Société BUCECO
Calcaires dolomitiques du Moso	9 MT		

La comparaison entre les tableaux 2 et 3 montre une certaine contradiction quantitative. En effet, les statistiques vieilles de 30 ans indiquent que le Burundi dispose d'assez grandes quantités de calcaires dolomitiques pour la correction de l'acidité de ses sols (Sebahene, 1991). L'on estime à plus de 600 millions de tonnes d'amendements répartis à travers le pays (Tableau 3). Possiblement, une actualisation de l'inventaire de ces gisements aboutirait à des tonnages plus élevés.

Les gisements rapportés par Sebahene (1991) appartiennent aux groupes des calcaires dolomitiques, de marbres dolomitiques et de travertins. Ces derniers apportent beaucoup plus de Ca et sont également caractérisés par de faibles valeurs chimiques : valeur neutralisante (VN) et Equivalent CaCO₃ (ECC).

Un travail datant de 2022 (Clodi et al., 2022) et commandité par le projet PAGRIS/IFDC avance les analyses en CaO, MgO, % Pertes au feu et % (CaMg)(CO₃)₂ pour les sites de Kibonobono-Mutara, Murama et Bitare au Moso, et Gasenyi à Cibitoke (Tableaux 4 à 7). Les statistiques descriptives (moyenne, écart-type, minimum, maximum) sont indiquées en bas de chacun de ces tableaux. Une analyse tabulaire comparative entre les sites précités peut être trouvée ailleurs dans ce document (Thème 3).

Tableau 3. Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi (Sebahene, 1991).

Gisement	Nature du gisement	% CaO	% MgO	VN	ECC	Réserves (10 ⁶ T)
Murama	Calcaire dolomitique	28,5	20	56,5	101,0	300
Busiga	Calcaire dolomitique	28,8	20	56,8	101,6	250
Butare	Calcaire dolomitique	29,6	18,9	56,1	100,2	200
Bukemba	Calcaire dolomitique	28,3	19,7	55,9	99,9	100
Buganda	Marbres dolomitiques	29	21	58,4	104,4	?
Imbo Nord	Travertins	41	3	45,2	80,9	2,5
Busiga	Travertins	45	1	46,4	83,1	0,25
						602,75

Tableau 4. Analyses chimiques de la dolomie de Kibonobono-Mutara au Moso

Echantillon	% CaO	% MgO	VN (%)	% Perte au feu	% (CaMg)(CO ₃) ₂
1	26,20	19,40	53,36	46,60	92,20
2	27,80	20,70	56,78	46,80	95,30
3	28,80	18,50	54,7	46,80	94,10
4	28,80	20,60	57,64	47,30	96,70
5	28,50	18,60	54,54	46,50	96,60
6	28,90	18,90	55,36	46,40	94,20
7	28,50	19,40	55,66	45,80	93,70
Moyenne	28,21	19,44	55,43	46,60	94,43
Ecart-type	0,96	0,90	-	0,46	1,47
Minimum	26,20	18,50	52,10	45,80	92,20
Maximum	28,90	20,70	57,88	47,30	96,70

Tableau 5. Analyses chimiques de la dolomie de Murama au Moso

Echantillon	% CaO	% MgO	VN (%)	% Perte au feu	% (CaMg)(CO ₃) ₂
1	29,45	19,92	57,34	43,93	93,30
2	28,60	20,20	56,88	46,80	95,60
3	29,10	19,20	55,98	46,30	94,60
4	28,60	18,70	54,78	46,60	93,90
5	27,70	20,30	56,12	46,50	94,50
6	28,40	21,70	58,78	46,80	96,90
7	28,60	19,30	55,62	47,00	94,90
8	27,40	19,70	54,98	46,20	93,30
9	27,80	20,60	56,64	46,50	93,30
10	28,60	19,60	56,04	46,40	94,60
11	28,70	22,40	60,06	47,10	98,20
12	29,30	18,90	55,76	46,80	95,00
Moyenne	28,52	19,93	56,42	46,61	94,98
Ecart-type	0,60	0,11	-	0,79	1,43
Minimum	27,40	18,70	53,58	43,93	93,30
Maximum	29,45	22,40	60,81	47,10	98,20

Tableau 6. Analyses chimiques de la dolomie de Gasenyi en Province Cibitoke

Echantillon	% CaO	% MgO	VN (%)	% Perte au feu	% (CaMg)(CO ₃) ₂
1	29,62	20,97	58,98	45,92	96,51
2	29,62	21,20	59,30	46,16	96,98
3	29,21	21,21	58,90	47,12	97,54
4	28,57	20,38	57,10	45,97	94,92
5	28,35	21,26	58,11	44,70	94,31
6	29,33	21,12	58,90	47,05	97,50
7	30,01	21,52	60,14	46,55	98,08
8	29,25	21,52	59,38	45,64	96,31
9	29,91	21,51	60,02	46,87	98,29
10	29,67	21,33	59,53	46,57	97,57
11	28,69	18,93	55,19	44,97	92,59
12	30,72	20,69	59,69	45,56	96,97
13	29,40	21,75	59,85	46,25	97,40
14	29,94	31,15	73,55	46,49	97,58
Moyenne	29,45	21,03	58,89	46,13	96,61
Ecart-type	0,61	0,67	-	0,70	1,55
Minimum	28,35	18,93	54,85	44,70	92,59
Maximum	30,72	31,15	74,33	47,12	98,29

Tableau 7. Analyses chimiques de la dolomie de Bitare au Moso

Echantillon	% CaO	% MgO	VN (%)	% Perte au feu	% (CaMg)(CO ₃) ₂
1	32,70	18,92	59,19	46,35	97,97
2	35,21	16,68	58,56	46,60	98,49
3	29,00	21,00	58,40	46,62	96,62
4	30,47	21,52	60,60	46,44	98,43
5	30,41	21,08	59,92	45,99	97,48
6	30,60	20,57	59,40	44,70	95,77
7	29,00	21,00	58,40	46,19	96,19
8	31,01	21,95	61,74	45,95	98,91
9	28,40	22,30	59,62	46,80	97,50
10	27,70	18,70	53,88	46,60	93,00
11	27,10	17,50	51,60	46,90	91,50
12	30,10	18,40	55,86	46,70	95,20
13	27,50	20,20	55,78	46,20	93,90
14	28,10	17,80	53,02	46,10	92,00
15	27,80	19,20	54,68	46,50	93,50
Moyenne	29,67	19,79	57,38	46,3	95,76
Ecart-type	0,61	1,68	-	0,51	2,38
Minimum	27,70	16,68	51,05	44,70	91,50
Maximum	35,21	22,30	66,43	46,90	98,91

4. CONCLUSION

Dès les années 1960, les travaux de divers experts ont mis en évidence l'inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins du Kivu, du Rwanda et du Burundi. Au Burundi, les premiers géologues se sont concentrés au Sud-Est du Burundi (région de Mosso et du Nkoma) ou des gisements de calcaires dolomitiques ont été identifiés dans la région de Rutana-Bukemba.

Au Burundi, on enregistre trois sortes de gisements de calcaires: (1) Travertins: liés au volcanisme. (2) Origine ignée: pas très intéressante. (3) Sédimentaires: les plus nombreux. Ces gisements sont répartis dans trois régions géographiques distinctes que sont: la région du Nord-Ouest du pays, la région Nord à Busiga et la région du Moso. Ces différents gisements ont été chimiquement caractérisés pour étudier leur potentiel d'utilisation dans l'industrie du ciment et en agriculture. La présente note a relevé deux statistiques quantitatives contradictoires. En effet, les statistiques vieilles de 30 ans indiquent que le Burundi dispose d'assez grandes quantités de calcaires dolomitiques pour la correction de l'acidité de ses sols. A l'époque, l'on estimait à plus de 600 millions de tonnes d'amendements répartis à travers le pays, de loin supérieurs aux données avancées par l'auteur de cette note. Dès lors, une actualisation des statistiques s'impose.

Dans tous les cas, bien que certains gisements de calcaires et de dolomies soient de taille modeste ou peu connus, il existe des dépôts exploitables, permettant ainsi de répondre aux besoins immédiats. L'intérêt économique des gisements calcaires et de dolomies connus au Burundi est crucial pour l'industrie, la construction et l'agriculture.

Remerciements

L'auteur est gracieusement reconnaissant vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir facilité la dissémination et le partage des résultats contenus dans cet article durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. Agricultural lime and liming. Part 3. Aglime product Selection and comparison calculator user guide. Soil acidification series. WSU Peer Reviewed. FS213E. Washington University Extension. 10 p. 2016.
2. Bamboneyeho, H.M.V. 1992. Etude des concrétions calcaires de l'Imbo-Nord (Burundi) comme matière première de ciment. Mémoire UB. Fac. Sc. Département des Sciences de la Terre.
3. Clodi, M., C. Hicintuka, S. Kaboneka, J. Le Turioner. 2022. Etude de faisabilité pour le renforcement de la filière « Amendements calcaires/Dolomie » au Burundi. Rapport Final de Mission pour le compte d'IFDC (Projet PAGRIS). RODEVA. 15 février 2022. 112 p. Financement de l'Ambassade des Pays Bas au Burundi.
4. Crawford Jr, T.W., U. Singh and H. Breman. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa Great Lakes Region. An IFDC Catalist Project Report. 138 p. Kigali, Rwanda.
5. De Keyser, S. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de correction (p. 58-80). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
6. Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
7. DFS/MINEAGRIE. 2015-2025. Rapports annuels.
8. Goodwin J.H. A guide to selecting agricultural limestone products. Illinois Agricultural Note 73. November 1979.
9. Hakizimana, S. 1989. Rapport de prospection détaillée des carbonates de Cibitoke-Rugombo. Ministère de la Géologie et des Mines. Département de Géologie.
10. IFDC Catalist. Fiche Technique 7. La gestion de l'acidité du sol.
11. IFDC/Catalist.2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa's Great Lakes Region. Kigali, Rwanda. 138 p.
12. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, C. Hicintuka et M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110 p.
13. Sebahene, M. 1984. Prospection de l'indice carbonaté de Gasenyi. Rapport géologique. Ministère de l'Energie et des Mines.
14. Sebahene, M. 1991. Les ressources en calcaire du Burundi (p. 113-118). Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. p. 310.
15. Sindimwo, P. Exemples d'analyses chimiques sur les dolomies de quelques sites. Gitega, 24-25 Novembre 2015.
16. Sinzumusi A. 1989. Contribution à l'étude des roches carbonatées du Mosso et de Busiga (Burundi) comme gisements d'amendements calco-magnésiens. Mémoire UB. Fac. Sc. Département des Sciences de la Terre. 69 p.
17. Verhaeghe M. 1964. Inventaire des gisements de calcaires, Doomies et Travertins du Kivu, du Rwanda et du Burundi.
18. Waleffe A. 1965. Etude géologique du Sud-Est du Burundi (régions du Mosso et du Nkoma). Musée Royal de l'Afrique Centrale – TERVUREN, Belgique. Annales. Série 1N-8° - Sciences Géologiques. N° 48. 312 p.

Utilisation agricole de la dolomie au Burundi : Evolution des statistiques dans l'espace et dans le temps

Venant Sibomana (MSc Ir)*, Directeur de la Fertilisation des Sols. Ministère de l'Environnement, Agriculture et Elevage (MINEAGRIE). B.P. 114 Gitega.

* Auteur pour correspondance : sibomanave@yahoo.fr

Résumé

La lutte contre l'acidité du sol par le chaulage est rentable comme une composante de l'intensification agricole qui comprend aussi l'utilisation d'engrais inorganiques et la GIFS. Le Gouvernement du Burundi et ses partenaires techniques et financiers (PTF) peuvent améliorer considérablement la situation de la production agricole en assurant que de la dolomie de haute qualité soit disponible à bas prix. Les cartes de fertilité des sols au Burundi produites avec l'appui de l'IFDC en 2013 et celles de décembre 2021 en collaboration avec l'ISABU et la Direction de la Fertilisation des Sols montrent que l'acidité des sols est un problème réel et commun pour la majorité des sols du Burundi. Les conséquences sont entre autres la non-disponibilité et non assimilabilité des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin, les pertes de rendement et la dégradation des sols. La correction de cette acidité qui affecte $\frac{3}{4}$ des sols du Burundi consiste en la promotion de l'utilisation de la fumure organique et de la dolomie, ainsi que la mise en œuvre de la politique de lutte antiérosive. Dans le cadre du Programme National de Subvention des Engrais au Burundi (PNSEB), la dolomie est subventionnée actuellement au taux qui a varié de 87 à 69 %, et qui était supposé être réduit progressivement avec le temps. Cette tendance n'a pas eu lieu, car après une réduction du taux de subvention à 69 % (2020-23), une tendance remontante s'observe au cours des années suivantes. Les statistiques du MINEAGRIE montrent : (i) une évolution de l'utilisation de la dolomie de 500 T/an en 2015 à plus de 38.000 T/an aujourd'hui, avec l'implication de 12 producteurs distributeurs privés, (ii) une concentration de la consommation de la dolomie (65 %) dans 6 des anciennes provinces du pays : Kayanza, Bururi, Bujumbura rural, Mwaro, Ngozi et Gitega. Malgré une nette avance dans l'utilisation de la dolomie pour la correction de l'acidité des sols, ce secteur reste confronté à une série de contraintes d'ordre technique (agronomique) et organisationnel (logistique).

Mots clés : Acidité des sols, dolomie, PNSEB, IFDC, subvention, producteurs privés

Abstract

Soil acidity management via lime application, as a component of agriculture intensification comprising optimal use of mineral fertilisers within the concept of Integrated Soil Fertility Management (ISFM) is agronomically and economically viable. The Government of Burundi and its technical and financial partners (PTF) are able to considerably improve agriculture production through guaranteeing accessibility to liming materials (locally available) at low costs. Soil fertility maps produced in 2013 and 2021 by ISABU, IFDC and the Ministry of Environment, Agriculture and Livestock (MINEAGRIE) convincingly prove that soil acidity is a real and common challenge across the country (75 % of country). Consequences of such an alarming situation are numerous and varied. They include, and not only, deficiencies of essential crop nutrients, crop yields decline in quantity and quality (nutritive value), and soil physical, (micro)biological and chemical degradation. Soil acidity correction relies on promotional use of liming combined with organic matter, together with a well thought and planned soil erosion control program. In the framework of the Burundi National Subsidiary Program of Fertilisers, dolomitic lime is currently subsidized at rate between 69 and 87 %. This rate was originally supposed to decrease over the years. The expected tendency never occurred. Instead, the increasing tendency was observed after 2020-23 campaigns. Official data in lime distribution in the country show : (i) a steady increase in the consumption of dolomitic lime from 500 MT/year in 2015 to a little more 38.000 MT/year today, with the active implication of 12 private professional producers and

distributors, (ii) a geographical delineated consumption of lime (65 %) in 6 of the 17 former provinces, namely Kayanza, Bururi, Bujumbura rural, Mwaro, Ngozi and Gitega. Although one must recognize a remarkable increase in lime agricultural use in Burundi, within the PNSEB program firmly supported by IFDC/PAGRIS with the financial assistance of the Netherlands, this vital agricultural sector remains confronted to a series of technical (agronomic) and organisationnal (logistics) constraints.

Mots clés : Soil Acidity correction, dolomitic mime, PNSEB, IFDC/PAGRIS, subsidies, private lime producers and sitributors

1. INTRODUCTION

La chaux dolomitique provient de la dolomie, une roche sédimentaire composée de carbonate de calcium et de magnésium ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Elle est formée à partir de la transformation du calcaire riche en magnésium, souvent par des processus géologiques (Brady 1990).

Il porte le nom du minéralogiste français Déodat Gratet de Dolomieu, qui a décrit pour la première fois ses propriétés à la fin du XVIII^e siècle. La dolomite se trouve souvent dans la roche sédimentaire et peut se présenter dans une variété de couleurs, allant du blanc au gris, en passant par le rose, le vert ou même le brun.

La dolomie est formée par un processus de dolomitisation, qui est la transformation géologique du calcaire riche en magnésium. Ce processus se produit lorsque des fluides riches en Mg pénètrent dans les couches de calcaire (composé principalement de carbonate de calcium, CaCO_3). Le Ca dans le calcaire est alors partiellement remplacé par du Mg, formant la dolomie ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Cette réaction se déroule dans des conditions géologiques spécifiques, généralement dans des environnements marins peu profonds ou dans des systèmes de circulation d'eau souterraine.

La dolomie, une roche sédimentaire riche en carbonate de calcium et de magnésium, est extraite de carrières. Pour les utiliser en agriculture, ces roches doivent être concassées à l'aide des concasseurs. Ces concasseurs possèdent des tamis à l'intérieur. Cette étape est cruciale pour augmenter la surface spécifique de la dolomie et améliorer son efficacité comme amendement agricole. La poudre est tamisée pour obtenir une granulométrie spécifique adaptée aux besoins agricoles.

La chaux agricole, à base de dolomie, est obtenue par un procédé, qui consiste en l'extraction, le nettoyage et le broyage d'un gisement de calcaire, pour en faire un produit fini. Il s'agit d'un carbonate double de calcium et de magnésium, de formule chimique $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

La chaux dolomitique est utilisée pour amender les sols acides. Elle augmente le pH du sol en neutralisant les ions H^+ , tout en fournissant du Ca et du Mg essentiel pour les plantes. Elle aide également à améliorer la structure du sol et la disponibilité des nutriments. Pour des terres agricoles nécessitant un chaulage, on distingue le chaulage de redressement et le chaulage d'entretien:

- Le chaulage de redressement pour corriger un sol trop acide. Il vise à remonter le pH à un niveau souhaitable afin d'obtenir rapidement des conditions optimales.
- Le chaulage d'entretien pour compenser les sources d'acidification. Il consiste à apporter régulièrement un amendement basique destiné à maintenir le pH et à restituer au sol les quantités de calcium et de magnésium utilisées au cours du temps.

Les cartes de fertilité des sols au Burundi produites avec l'appui de l'IFDC en 2013 et celles de décembre 2021 en collaboration avec l'ISABU, la Direction de la Fertilisation des Sols montrent que l'acidité des sols est un problème réel et commun pour la majorité des sols du Burundi. Les conséquences sont entre autres la non-disponibilité et non assimilabilité des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin, les pertes de rendement et la dégradation des sols. La correction de cette acidité qui affecte $\frac{3}{4}$ des sols du Burundi consiste en la promotion de l'utilisation de la fumure organique et de la dolomie ainsi que la mise en œuvre de la politique antiérosive. Dans le cadre du Programme National de Subvention des Engrais au Burundi (PNSEB), la dolomie est subventionnée actuellement au taux qui a varié de 87 à 69 %, et qui était supposé être réduit progressivement avec le temps. Cette tendance n'a pas eu lieu, car après une réduction du taux de subvention à 69 % (2020-23), une tendance remontante s'observe au cours des années suivantes (Tableau 2).

2. QUI UTILISENT LA DOLOMIE AU BURUNDI?

La consommation de la dolomie au niveau de l'agriculteur est pratiquement nulle selon les échanges que nous avons eus avec les différentes prenantes : services techniques agricoles, projets, ONG et les agriculteurs (focus groupes). Avant le programme National de Subvention des Engrais au Burundi (PNSEB), le niveau d'utilisation de la dolomie n'atteint que moins de 2000 tonnes par an. Ce n'est qu'en 2011 que la distribution a atteint 4 070 tonnes comme l'indique le tableau 1 suivant:

Tableau 1. Distributeurs de dolomie avant 2011 (Source : DFS/MINEAGRIE).

Organisations	Quantité de dolomie (T)
PPCDR	500
MINAGRIE	2000
FAO	400
Savonnor	80
ISABU	100
Total	4070

Bien plus, rares sont les projets de développement à composante agricole qui incluent la dolomie dans leurs paquets agricoles. Des quantités marginales sont distribuées par la FAO (200-400 T/an) ou par occasion par les projets financés par l'Union européenne (PPCDR avec 500 T) dans le cadre des projets de multiplications de semences. Aujourd'hui, avec la promotion de l'utilisation de la dolomie initiée dans la foulée de la mise en place du PNSEB, les statistiques du MINEAGRIE montrent une évolution de l'utilisation de la dolomie de 500 T/an en 2015 à plus de 38.000 T/an aujourd'hui, ce qui correspond à 19.000 ha amendés sur une base de 2 T/ha. Comparée aux superficies agricoles dont les pH ont besoin d'être corrigés (2.270.000 ha), cette quantité représente moins de 5 % des besoins.

Cependant la lecture des statistiques d'utilisation de la dolomie dans les différentes provinces du pays (Tableau 2 et Figure 1) et au niveau national (Figure 2), montre un bond dans l'adoption de la pratique de chaulage de 2015 à aujourd'hui.

Tableau 2. Evolution de la consommation nationale et provincial de la dolomite au Burundi: 2015-2024 (Source: DFS, MINEAGRIE).

Province	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Bubanza	4	53,35	94,5	83,15	92	151,95	339,85
Bujumbura	31,45	193,6	278,45	735,35	474,85	474,85	1456,7
Bururi	35,7	421,75	935,85	995,35	852,55	852,55	2016,7
Cankuzo	2,25	6,25	785	21,95	53,35	793	196,15
Cibitoke	19,95	38,25	94,85	101,5	145,05	180,1	230,5
Gitega	31,55	483,35	589,25	377,55	136,75	515	947,05
Karuzi	47,9	565,65	376,8	171,45	152,95	317,35	2967,85
Kayanza	198,4	1480,35	1746,1	3913	1823,05	2551,05	3159,85
Kirundo	6,25	48	84,75	114,15	94,3	161,9	205,8
Makamba	5,15	40,7	203,95	259,75	111,3	233,2	398,05
Muramvya	33,9	354,35	234,05	209,5	93	332	486,75
Muyinga	51,1	206,45	362,1	500,25	240,4	650,4	562,2
Mwaro	29,5	292,35	310,25	441,05	254,35	599,55	1399,2
Ngozi	12,8	295,35	451,5	709,7	410,5	842,6	1200,19
Rumonge	-	-	51,1	180,85	159,5	144,95	219,05
Rutana	20,45	51,1	536,55	177	161,3	278,15	361,95
Ruyigi	24,75	59,3	42	75,2	74,05	167,15	245,7
TOTAL	555,1	4590,15	6399,9	9066,75	5329,25	8532,05	16394,25

Tableau 2 (suite). Evolution de la consommation nationale et provincial de la dolomite au Burundi: 2015-2024 (Source: DFS, MINEAGRIE).

Province	2022	2023	2024
Bubanza	786,95	1033,3	2530,50
Buja rural	2321,25	3053,8	2595,48
Bururi	3196,20	3664,0	3078,60
Cankuzo	324,05	589,5	766,35
Cibitoke	630,65	728,55	2060,78
Gitega	1624,40	1572,95	4410,15
Karuzi	588,10	882,65	1716,45
Kayanza	4090,90	4911,8	5783,93
Kirundo	487,90	364,55	666,18
Makamba	777,75	1481,75	2154,95
Muramvya	924,60	932,65	1979,73
Muyinga	896,70	1265,55	1961,15
Mwaro	1877,00	2217,4	2091,30
Ngozi	1483,45	2469,75	2645,48
Rumonge	397,30	583,05	581,53
Rutana	626,95	1277,75	1657,45
Ruyigi	385,25	793,4	1403,08
Total	2149,40	27822,4	38084,6

Les provinces les plus consommatrices de dolomie sont dans l'ordre croissant : Kayanza (19,3 %), Karuzi (18,1 %), Bururi (12,3 %), Bujumbura (8,9 %), Mwaro (8,5 %), Ngozi (7,3 %) et Gitega (5,8 %). Elles totalisent 80 % dont près de 50 % sont répartis entre les seules provinces de Kayanza, Karuzi et Bururi. Les principaux consommateurs de dolomie sont les multiplicateurs de semences (COPROSEBU) et les autres structures organisées de producteurs (les associations, groupements, coopératives). La COPROSEBU encadre plus de 400 entrepreneurs agricoles avec les appuis de certains projets (exemple PSSD/IFDC). Les cultures cibles sont essentiellement la pomme de terre et le maïs (hybride) en rotation avec le haricot le haricot (volubile).

Certaines ONG du domaine de développement rural ont favorisé la promotion de l'utilisation de la dolomie par les ménages bénéficiaires de leurs actions. C'est le cas de l'ONG Tubura qui encadre des milliers d'agriculteurs dans les provinces de Gitega, Muramvya, Kayanza et Ngozi (et bientôt Muyinga) et qui accompagne leurs paquets techniques par la dolomie. A notre avis, l'exemple de Tubura pourrait constituer un cas d'étude pour la promotion de la dolomie au Burundi. Au-delà des distributions (sous conditions contractuelles) de la dolomie auprès des agriculteurs, l'agriculteur contribue à la vulgarisation de l'utilisation de la dolomie à travers la mise en place, de manière participative, des parcelles de démonstration. Dans une quête de promotion de la dolomie au Burundi, nous proposons de dupliquer cette approche de vulgarisation au sein des projets et ONG opérant dans le secteur du développement rural.

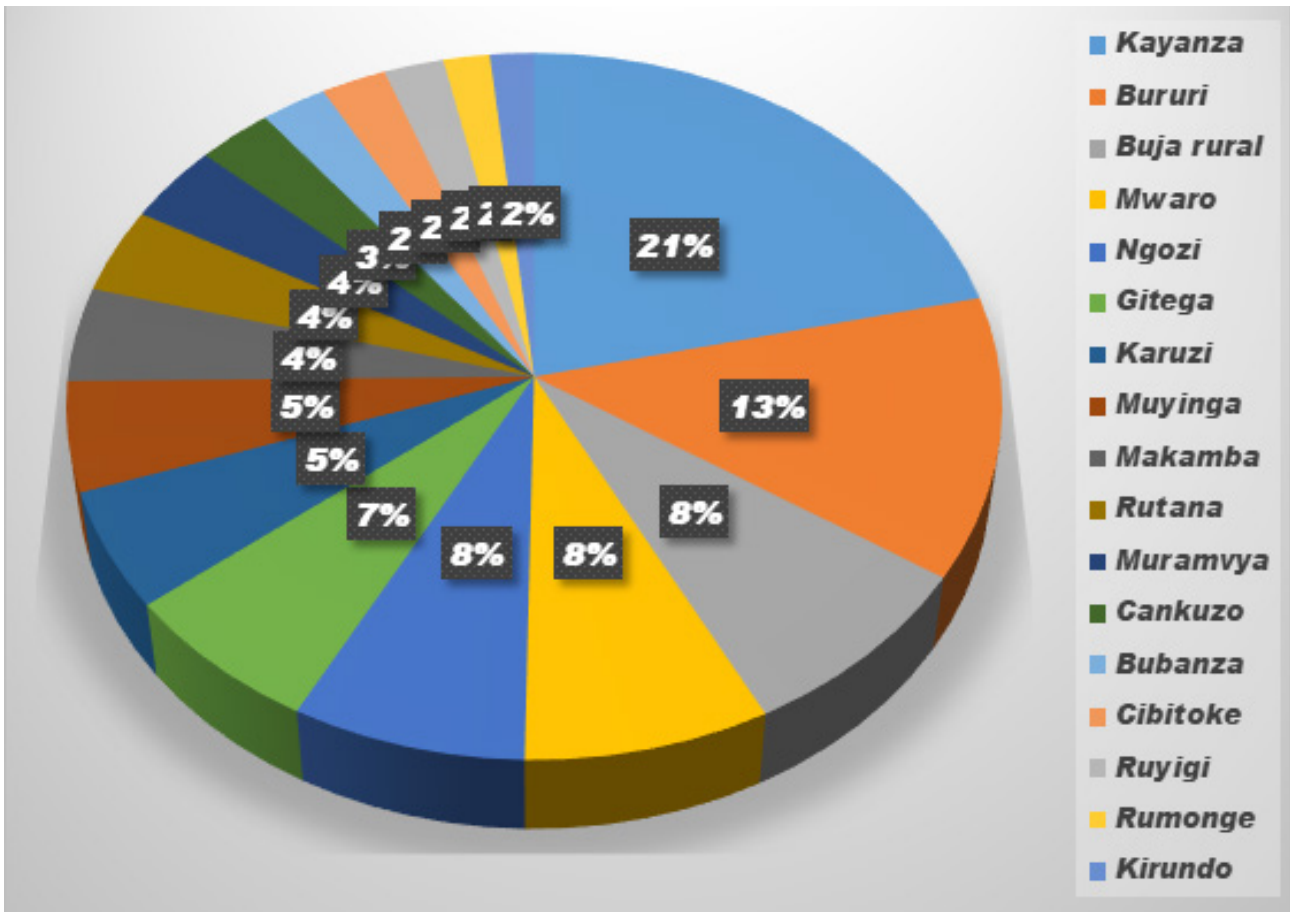


Figure 1. Représentation graphique en pourcentage des consommations provinciales de dolomie: 2015-2024 (Source : DFS/ MINEAGRIE).

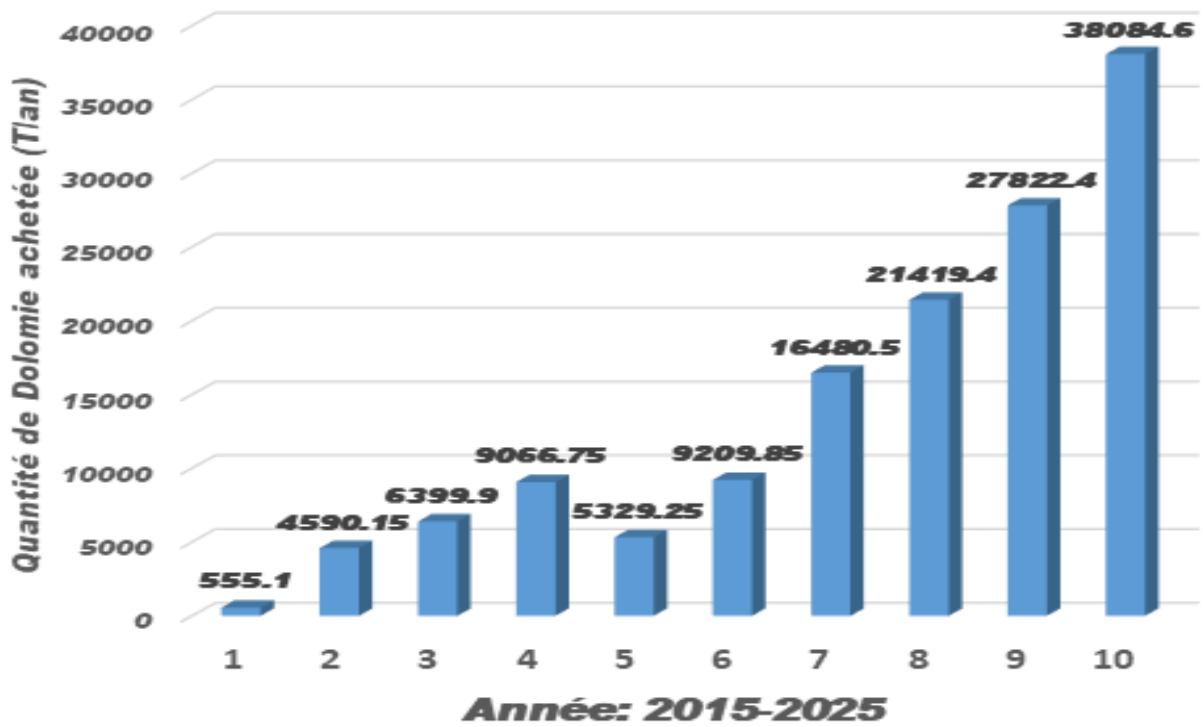


Figure 2. Evolution de la consommation nationale de la dolomie au cours des 10 dernières années (Source : DFS/MINEAGRIE).

3. PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE LA DOLOMIE-PNSEB

La dolomie utilisée au Burundi est produite par des usines locales et la matière première provient principalement des provinces de Cibitoke et Rutana. Actuellement, 12 usines locales installées à Bujumbura ont signé des contrats de fournitures de la dolomie dans le cadre du PNSEB (Programme National de Subvention des Engrais au Burundi) et Projet Pilote Dolomie de l'IFDC. Leurs noms et capacités de production annuelle sont mentionnés ci-dessous (tableau 3).

Tableau 3. Liste des fournisseurs de dolomie au Burundi. (Source : DFS/MINEAGRIE).

Fournisseur	Capacité journalière de production
SOPRODOL	250-350 T/Heure (?)
BUSECO	60 T
ITRACOM/FOMI	80-150 T
STONE SOCIETY	100 T
SINDIMWO FLORIBERT	60 T
BEAACO	45 T
DOLO PRODUCTION	80-90 T
SOPROFIA	60 T
KORINEZA Dorine	30 T
NGENDAKUMANA Jérémie	80 T
EFCCO	75-100 T
AB GEOSCIENCE	80-100 T

La distribution de la dolomie se fait chaque saison agricole suivant le calendrier agricole établi par le MINEAGRIE au niveau de 368 zones de distribution dans le pays. Ces zones de distribution représentent 93% de toutes les zones administratives du pays. Avant chaque distribution, les inspecteurs des fertilisants de la DFS effectuent des prélèvements d'échantillons pour des fins d'analyse chimique au niveau du Laboratoire de l'ISABU.

Les bénéficiaires de la dolomie sont ceux qui ont pu payer l'avance et solde qui est de 5000 BIF par sac de 50 kg réparti en deux sacs de 25 kg chacun pour faciliter le transport.

Le défi majeur rencontré dans le secteur dolomie est le retard dans la distribution de cet amendement. Il se remarque ces jours-ci que la distribution de dolomie qui devrait normalement être appliquée un mois avant le semis ne suit pas le calendrier agricole établi par le MINEAGRIE.

Cela a un impact négatif de son efficacité sur l'augmentation de la production est souvent lié au peu d'investisseurs dans le secteur dolomie ainsi que la pénurie du carburant.

Un autre constat est que les usines de production de la dolomie sont installées loin des sites d'extraction et cela impacte beaucoup sur les besoins en carburant. D'autre part, on enregistre peu de partenaires dans le secteur dolomie: le principal partenaire du MINEAGRIE dans ce secteur est l'Ambassade du Pays-Bas à travers le Projet PAGRIS de l'IFDC. Nous apprécions aussi l'implication du projet Tubura dans ce secteur

Les effets bénéfiques de l'utilisation de la dolomie dans les champs d'agriculteurs burundais pour booster la production agricole sont visibles et c'est pour cette raison que le Gouvernement subventionne cet amendement à plus de 73% (Tableau 5). Les quantités de dolomie distribuées au cours des 5 dernières années ont passé de 9000 Tonnes à 38000 Tonnes par an : donc, du simple au quadruple.

Des stratégies pour faire face aux retards constatés dans la distribution de dolomie par rapport au calendrier agricole sont prises surtout la sensibilisation des gens qui ont des moyes à s'investir dans ce secteur ainsi que des plaidoiries visant la mise en place d'un stock stratégique carburant.

Avec la mise en place de la Plate Forme Fertilité des sols par le MINEAGRIE, le Groupe Thématique n°2 qui traite les questions liées à la promotion de la dolomie a déjà élaboré un plan d'action qui montre clairement les besoins en dolomie d'ici 4 ans et les partenaires au développement sont appelés à donner leurs contributions pour la mise en application de ce plan d'action.

Les estimations de moyennes et les statistiques de distribution appliquées aux échantillons en provenance des gisements de Kibonobono-Mutara, Murama, Butare (tous les 3 du Moso) et de Gasenyi témoignent d'une très bonne homogénéité (CV=2-7 %) quant à leurs % CaO, % MgO, % Pertes au feu, % (CaMg)(CO₃)₂, Valeur neutralisante (VN) et Equivalent CaCO₃ (Tableau 4).

Tableau 4. Caractéristiques chimiques de quelques gisements dolomitiques du Burundi (Source : Clodi et al., 2022).

Gisement	% CaO	% MgO	VN	ECC	% Pertes au Feu	% (CaMg)(CO ₃) ₂
Kibonobono (n=7)	28,21±0,96 (CV=3,41)	19,44±0,90 (CV=3,18)	55,43±1,44 (CV=5,09)	99,11±2,57 (CV=9,1)	46,60±0,46 (CV=1,62)	94,43±1,47 (CV=5,2)
Murama (n=12)	28,52±0,60 (CV=2,11)	19,93±0,11 (CV=5,58)	56,43±1,49 (CV=2,64)	100,89±2,66 (CV=2,64)	46,41±0,79 (CV=1,71)	94,984±1,43 (CV=1,50)
Gasenyi (n=14)	29,45±0,61 (CV=2,06)	21,03±0,67 (CV=3,19)	58,89±1,28 (CV=2,18)	105,29±2,29 (CV=2,18)	46,13±0,70 (CV=1,52)	96,61±1,55 (CV=1,61)
Butare (n=15)	29,67±2,12 (CV=7,15)	19,79±1,68 (CV=8,5)	57,38±2,93 (CV=5,1)	102,59±5,23 (CV=5,1)	46,31±0,51 (CV=1,11)	95,76±2,38 (CV=2,49)
Total (n=48)	29,11±1,43 (CV=4,93)	20,14±1,33 (CV=6,62)	57,30±2,33 (CV=4,06)	102,44±4,16 (CV=4,06)	46,32±0,66 (CV=1,42)	95,59±1,98 (CV=2,07)

Tableau 5. Proportion de la subvention des prix de la dolomie au Burundi : 2016-2026 (Source : DFS/MINEAGRIE).

Année	Prix du marché	Prix non subventionné	Prix subventionné	Taux de subvention (%)
2016	19 000	2 500	16 500	86,84
2017	14 628	3 000	11 628	79,49
2018	14 628	3 000	11 628	79,49
2019	13 325	4 000	9 325	69,98
2020	16 000	5 000	11 000	68,75
2021	16 000	5 000	11 000	68,75
2022	16 000	5 000	11 000	68,75
2023	16 000	5 000	11 000	68,75
2024	19 000	5 000	14 000	73,68
2025	22 863	5 000	17 863	78,13
2026	21 599	5 000	16 599	76,85

Etant entendu que la dolomie produite au Burundi est chimiquement homogène, sa valeur neutralisante est en grande partie contrôlée par sa granulométrie, d'où toute l'importance de cette caractéristique dans le choix et la sélection des amendements dolomitiques. La caractérisation granulométrique est rendue difficile par la non-conformité des normes utilisées par l'ISABU aux normes granulométriques internationales quant aux dimensions des mailles des tamis utilisés. Dans ce contexte, nous recommandons au Laboratoire de s'aligner aux normes granulométriques internationales, d'autant plus que l'importance des gisements dolomitiques disponibles permet d'envisager les exportations.

Il est établi que la dolomie est moins soluble et donc moins réactive que la calcite. Partant de ce principe, afin d'augmenter l'efficacité des produits dolomitiques, la dolomie devra être plus fine que les amendements calcaires. Les minima rapportés dans le tableau 6 ont été proposés pour application au Burundi (Clodi et al., 2022).

Tableau 6. Valeurs normatives minima proposées pour la dolomie au Burundi (Source : Clodi et al., 2022).

Paramètre	Valeur minimale
pH	9,2
% CaO	28
% MgO	19
Valeur neutralisante (VN) %	54,6
Pouvoir de Neutralisation Effective (PNE)	0,8
Equivalent CaCO ₃	105
Perte au Feu (%)	46
% (CaMg)(CO ₃) ₂ = Indice de Pureté (IP)	95
Indice de Finesse (IF)	0,80

4. CONTRAINTES LIEES A L'UTILISATION DE LA DOLOMIE AU BURUNDI

Les principales contraintes à l'utilisation de la dolomie telles que partagées par les agriculteurs (en associations) sont listées ci-après. Elles sont nombreuses et variées. Elles sont littéralement reproduites à partir du rapport de consultance de RODEVA (Clodi et al., 2022). Elles restent invariablement de grande actualité.

1. Méconnaissance totale par les agriculteurs de l'acidité des sols et de sa gestion et a fortiori de la dolomie comme moyen de sa correction. Certains agriculteurs associent à la dolomie la chaux utilisée en construction, les deux produits portant le même nom en Kirundi : « ishwagara ».
2. Superficies agricoles inconnues des agriculteurs pour proportionnellement ajuster les commandes. Le rôle du moniteur agricole est ici essentiel dans son encadrement.
3. Livraison tardive de la dolomie et en même temps que les engrais à quelques jours du semis. Certains agriculteurs ont tendance à appliquer la dolomie et les engrais en même temps au moment du semis. Ce qui est contraire aux recommandations des services techniques qui conseillent l'application de la dolomie au moins deux semaines avant le semis, l'idéal étant une application au moins 4 semaines avant.
4. Le timing de livraison de la dolomie est une limite sérieuse à son adoption et l'extériorisation de ses effets dans la correction de l'acidité des sols. Du moment que nous reconnaissons scientifiquement que l'efficacité de la dolomie nécessite son application au moins 2-4 semaines avant le semis, la livraison de celle-ci en même temps que les engrais, nécessite réflexion, révision et mise en cause. A cet effet, nous recommandons d'adapter la logistique de la dolomie aux exigences agronomiques, en accord avec les recommandations du guide d'utilisation de la dolomie au Burundi.
5. En cas de livraison simultanée de la dolomie et des engrais, l'agriculteur est face à une plus grande charge de travail : appliquer la dolomie, les engrais et le fumier et semer en même temps. Dans ces conditions, l'agriculteur délaisse la dolomie, un produit qu'il ne connaît moins, au profit des engrais. Surtout qu'il ne peut disposer de suffisamment de ressources financières pendant cette période de semis.
6. De l'avis des agriculteurs avec lesquels nous avons pu échanger, les commandes par poste ne favorisent pas les agriculteurs pauvres ne disposant pas de liquidité suffisante. Les plus vulnérables d'entre eux reçoivent gratuitement les semences et autres intrants. La question qui survient est : pourquoi la dolomie ne serait-elle pas mise à disposition gratuitement aux agriculteurs les plus vulnérables avec un accompagnement technique ? Une question légitime.
7. C'est assez paradoxal que les agriculteurs utilisés comme main d'œuvre dans les champs de production de semences appliquent tout le paquet technique agricole (y compris la dolomie) dans ces champs. Cependant, le transfert et l'adoption de la technologie ne sont pas visibles chez eux. Cette situation a été discutée avec un des multiplicateurs membre du COPROSEBU qui avance que la plupart des agriculteurs considèrent que l'application de la dolomie ne concerne que les terrains en ouverture (pomme de terre). Ce qui dénote encore une fois de la méconnaissance totale du phénomène de l'acidité des sols et de son impact sur la production agricole.
8. Les agriculteurs considèrent qu'au prix de 100 Fbu/kg, la dolomie leur est inaccessible. Ils suggèrent que le prix devrait être ramené à au moins 40 Fbu/kg, surtout que celui-ci est rapidement monté de 20 à 100 Fbu/kg en moins de 6 ans. Une question risquée : pourquoi pas réfléchir sur une subvention totale du produit ? Une réponse drastique à une cause nationale.
9. Des hangars de stockage des engrais et de la dolomie à leurs ménages, les agriculteurs concèdent des frais de transport considérables (vélo, moto), qui peuvent aller jusqu'à 2500 Fbu/sac de 50 kg, suivant les distances. Ce coût supplémentaire de transport de la dolomie représente 50 % de sa valeur de subvention. C'est l'une des principales raisons de non enlèvement de la dolomie qui reste stocker dans les hangars en attendant la saison suivante. L'autre raison majeure régulièrement rapportée par nos interlocuteurs et le poids du sac de dolomie (50 kg), difficilement transportable sur tête d'homme.
10. Les doses d'application de la dolomie actuellement recommandées/utilisées sont basées sur d'anciens essais de l'ISABU dans des stations qui ne sont pas représentatives de la diversité des terroirs agricoles du Burundi. Elles devraient être basées sur un ou des paramètre(s) objectif(s) et facilement mesurable(s). La solution à cette problématique est la production d'un guide d'utilisation de la dolomie (en cours).

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le Gouvernement et ses partenaires techniques et financiers (PTF) peuvent améliorer considérablement la situation de la production agricole en assurant que de la dolomie de haute qualité soit disponible à bas prix pendant la période de transition de l'intensification agricole. « Rendre la dolomie suffisamment bon marché » ne devrait pas être considéré comme une subside mais comme un investissement, rendant les agriculteurs capables d'élever la productivité agricole à un autre niveau. Cela concerne un investissement qui est plus rentable et qui peut atteindre beaucoup plus d'agriculteurs. L'utilisation à grande échelle de la dolomie qui sera déclenchée diminuera aussi ses coûts, une application logique de la loi de l'offre et de la demande. La lutte contre l'acidité du sol par le chaulage est rentable comme une composante de l'intensification agricole qui comprend aussi l'utilisation d'engrais inorganiques et la GIFS.

Remerciements

L'auteur est gracieusement reconnaissant vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir facilité la dissémination et le partage des résultats contenus dans cet article durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. Agricultural lime and liming. Part 3. Aglime product Selection and comparison calculator user guide. Soil acidification series. WSU Peer Reviewed. FS213E. Washington University Extension. 10 p. 2016.
2. Brady, N.C. 1990. The nature and properties of soils. Tenth Edition. Macmillan Publishing Company, New York. 621 p.
3. Clodi, M., C. Hicintuka, S. Kaboneka, J. Le Turioner. 2022. Etude de faisabilité pour le renforcement de la filière « Amendements calcaires/Dolomie » au Burundi. Rapport Final de Mission pour le compte d'IFDC (Projet PAGRIS). RODEVA. 15 février 2022. 112 p. Financement de l'Ambassade des Pays Bas au Burundi.
4. Cochrane, T.T., J.G. Salinas, and P.A. Sanchez. 1980. « An equation for liming acid mineral soils to compensate for crop tolerance ». Trop. Agric. (Trinidad) 57: 133-140.
5. Crawford Jr, T.W., U. Singh and H. Breman. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa Great Lakes Region. An IFDC Catalist Project Report. 138 p. Kigali, Rwanda.
6. De Keyser, S. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de correction (p. 58-80). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
7. Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7th edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
8. DFS/MINEAGRIE. 2015-2024. Rapports annuels.
9. Goodwin J.H. A guide to selecting agricultural limestone products. Illinois Agricultural Note 73. November 1979.
10. Hassett, J.J. and W.L. Banwart. 1992. Soils and their environment. Prentice Hall. New Jersey. 424 p.
11. Havlin, J.L., S.L. Tisdale, W.L. Nelson and J.D. Beaton. 2013. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 8th ed. Prentice Hall.
12. IFDC Catalist. Fiche Technique 7. La gestion de l'acidité du sol.
13. IFDC/Catalist.2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa's Great Lakes Region. Kigali, Rwanda. 138 p.
14. Jones, J.B. Jr. 2012. Plant nutrition and soil fertility manual. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, Fl. 282 p.

15. Landa, C. Vingt ans d'essais de fumure sur cultures vivrières au Burundi (1963-1983). Synthèse des résultats et recommandations. Publication ISABU N° 35.
16. Musonerimana, S., A. Niyonkuru, P. Ndayihanzamaso, E. Semenova, M.C. Niyuhire, M. Sendegeya, S. Kaboneka, S. Ndiokubwayo, O. Nduwimana, M. Beun & A. Nibasumba. 2025. Maps of major soils parameters : A reference for monitoring soil fertility in Burundi. *Sustainable Environment* 11 : 1. 2521932. Doi : 10.1080/27658511.2025.251932.
17. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, C. Hicintuka et M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110 p.
18. ISABU/IFDC. Cartes des analyses des sols du Burundi. MINEAGRIE/IFDC/ISABU. Janvier 2022.
19. Pacquay, R. Expériences de la recherche/développement sur l'amendement calcaire (p. 81-92). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
20. Sebahene, M. 1991. Les ressources en calcaire du Burundi (p. 113-118). Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. p. 310.
21. Shehata N. 1991. Recherches menées dans le but de l'amélioration des sols acides et/ou alliques d'altitude (p. 93-107). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
22. Sindimwo, P. Exemples d'analyses chimiques sur les dolomies de quelques sites. Gitega, 24-25 Novembre 2015.
23. Van Den Berghe. 1991. Le problème des engrais acidifiants (p. 108-112). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
24. Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, and M. R. Malcolm. 1990. "Application of Expert Systems to the Study of Acid Soils in Rwanda," *Agric. Ecosystems Environ.* 30: 203-218.

Acquis de la recherche sur la chaux/dolomie au Burundi : Expériences de l'ISABU et de la FACAGRO/FABI-Université du Burundi

Kaboneka Salvator¹, Séverin Nijimbere¹, Marie Chantal Niyuhire², Kameya Ferdinand² et Kagisye Alain²

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). B.P. 790. Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: salvator.kaboneka@gmail.com

Résumé

L'échantillon d'essais sur la correction de l'acidité par chaulage avec ou sans fumure organique, fertilisant minéral (DAP) ou microéléments (Zn et B) constitue l'essentiel des investigations conduites par l'ISABU, la FACAGRO d'abord et la FABI en relai, au cours des décennies 1990 à 2020. Ces essais ont couvert une palette de cultures vivrières, à savoir : la pomme de terre, le manioc, le sorgho, le maïs, le blé, le haricot et le soja. Ils ont dans l'ensemble démontré l'intérêt primordial du chaulage dans les performances agronomiques des cultures, essentiellement dans trois régions naturelles du Burundi, parmi les plus touchées par l'acidité des sols, le plus souvent doublée de toxicité Al : le Bututsi, le Kirimiro et le Mugamba (Nord et Sud). Reconnaisant l'interaction positive entre les amendements minéraux (chaux, dolomie) et organiques (fumiers animaux, composts), un certain nombre d'études de correction de l'acidité ont testé la combinaison chaux/dolomie et fumures organiques animales (fumier de vache, fientes de poule). Cette approche investigative a été reconnue fondamentale par le projet PAGRIS de l'IFDC comme une voie de recherche agronomiquement et économiquement rationnelle. Les thématiques abordées ont couvert les aspects ci-après: (i) Inventaire et caractérisation des amendements calco-magnésiens ; (ii) Combinaison amendements organiques, dolomitiques et engrais (fertilisation intégrée) ; (iii) Evaluation des provenances, granulométrie et vitesse de réaction de la chaux et de la dolomie ; (iv) Engrais minéraux et modifications physico-chimiques du sol ; (v) Acidité et toxicité Al des sols et techniques de correction; (vi) Analyse agronomique et économique de l'application de la dolomie et de la correction de l'acidité; (vii) Pouvoir de neutralisation comparé de l'acidité/toxicité Al des amendements organiques et minéraux; (viii) Arrière effet du chaulage; (ix) Sensibilité des cultures à l'acidité et de la toxicité des sols.

Mots clés : Recherche passée, correction de l'acidité, chaux/dolomie, fumure organique, Bututsi, Kirimiro, Mugamba.

Abstract

The sample of trials on soil acidity correction through lime application with or without organic matter simultaneous application, mineral fertilizers (DAP) or essential micronutrients (Zn et B) constitutes major investigations conducted by ISABU, FACAGRO first and FABI later during the decennial years 1990 to 2020. The investigations covered a series of crops, including irish potatoes, sweet potatoes, cassava, sorghum, maize (*Zea mays* L.), wheat, common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and soyabean. They overall demonstrated the prime effect of lime soil application on agronomic performances of tested crops, mainly in three major Burundi agro-ecological zones, considered the most affected regions by soil acidity and Al toxicity, namely, Bututsi, Kirimiro and Mugamba (Nord and South). In recognition of the positive interaction between mineral (lime) and organic (animal manure, composts) amendments, a certain number of trials have evaluated the optimal combination of liming materials and animal manures (cow and chicken manures). This well conceived investigative approach has been fundamentally recognized and supported by the PAGRIS/IFDC project, as an agronomically and economically rational and viable research approach. The list of thematic investigations reported in this note include : (i) Inventory and characterization

of calcareous and dolomitic deposits; (ii) Optimal combination of organic, calcareous/dolomitic amendments and mineral fertilizers (integrated fertilisers); (iii) Evaluation of provenances, size and rate of reaction of liming material; (iv) Mineral fertilizers on physico-chemical soil modifications; (v) Soil acidity and Al toxicity and their corrective techniques; (vi) Agronomic and Economic analysis of lime application and soil acidity correction; (vii) Comparative neutralizing power of soil acidity/Al toxicity by organic and mineral amendments; (viii) Residual effect of liming; (ix) Crop differential sensibility to soil acidity and Al toxicity.

Mots clés : Past research, soil acidity correction, liming, organic manure, Bututsi, Kirimiro, Mugamba.

1. HISTORIQUE DE L'UTILISATION DE LA DOLOMIE AU BURUNDI

L'histoire de l'utilisation de la dolomie date des années 1960, à partir des stations de recherche en haute altitude de l'ISABU (Landa, 1984). Les premiers essais de correction de l'acidité ont débuté dès 1965 à la station expérimentale de Gisozi dans le Mugamba Sud dans la province de Mwaro. Ils testaient l'efficacité de la chaux vive et du calcaire broyé du Moso. La chaux vive a été vite abandonnée à cause de sa fine granulométrie qui générait une forte et brusque augmentation de pH avec un effet choc non désiré sur les semences et les cultures (Landa, 1984). Parallèlement, l'effet direct et arrière effet (sur 4 saisons, 2 ans) du calcaire dolomitique broyé du Moso (0, 2, 4 T/ha) a fait l'objet d'évaluation sur les rendements des cultures en rotation (pomme de terre, maïs, blé, petit pois). Cette période d'expérimentations soutenues sur l'usage agricole de la dolomie a correspondu à la naissance d'une usine d'extraction et de broyage du calcaire dolomitique au Burundi.

L'effet positif de la dolomie sur la dynamique du pH du sol et des autres paramètres chimiques a été observé à Munanira, une autre station expérimentale de l'ISABU située dans la commune Muruta (Mugamba Nord), en province de Kayanza. Dans ces expérimentations menées à la même période que celles de Gisozi, il a été démontré que, sur une période de 2 ans, l'application de 2 T/ha de dolomie augmentait le pH du sol de 5 à 6, le Ca échangeable de 2,6 à 6,3 méq/100 g de sol, la capacité d'échange cationique (CEC) de 6,5 à 11 méq/100 g de sol, au moment où le % Al échangeable était significativement réduit de 28 à 3 %.

Les mêmes expérimentations ont aussi démontré l'effet bénéfique sur les rendements des cultures (Landa, 1984). Par rapport aux témoins, l'application des amendements minéraux a augmenté les rendements de blé (+ 400 %), de maïs (+ 600 %), de pomme de terre (+ 200 %) et de petit pois (+ 68 %).

Les modes d'application de la dolomie ont été également testés. C'est ainsi que les applications localisées ont été suivies d'effet brutal suivi des chutes de rendements dues aux carences induites en K, Fe ou Mn. De ce fait, la pratique d'application de la dolomie par épandage suivi d'incorporation en profondeur (15-20 cm) a été recommandée en raison d'une meilleure répartition de la dolomie dans toute la couche exploitée par les racines et ses effets bénéfiques sur les systèmes culturaux en rotation ou en associations. L'incorporation homogène et en profondeur de la dolomie optimise les interactions/échanges $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ et $\text{Al}^{3+}/\text{H}^{+}$ et favorise l'hydrolyse et la neutralisation des ions Al. Les doses proposées à l'issue de ces expérimentations ISABU étaient 1,5-2 T/ha pour la pomme de terre en tête de rotation et 800 kg/ha sur maïs-haricot.

2. PRINCIPALES THEMATIQUES ABORDEES

L'inventaire no exhaustif des publications enregistrées de 1984 à 2025 montre une série de thématiques de recherche variées (voir références bibliographiques). Ces publications sont essentielles l'émanation de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et de l'Université du Burundi (Faculté des Sciences Agronomiques, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie).

Les thématiques abordées par les deux principales institutions de recherche agronomique sont les suivantes :

1. Inventaire et caractérisation des amendements calco-magnésiens
2. Combinaison amendements organiques, dolomitiques et engrais (fertilisation intégrée)
3. Evaluation des provenances, granulométrie et vitesse de réaction
4. Engrais minéraux et modifications physico-chimiques du sol
5. Acidité et toxicité Al des sols et techniques de correction

6. Analyse agronomique et économique de l'application de la dolomie et de la correction de l'acidité
7. Pouvoir de neutralisation comparé de l'acidité/toxicité Al des amendements organiques et minéraux
8. Arrière effet du chaulage
9. Sensibilité des cultures à l'acidité et de la toxicité des sols

3. RESULTATS SAILLANTS

Dans les pages qui suivent nous passerons en revue certains des essais sur le chaulage et la correction de l'acidité menés par l'ISABU dans ses stations de recherche de Gisozi dans la région naturelle du Mugamba (Tableaux et 2) et de Munanira dans la partie Nord de cette même région naturelle, réputée très acide.

Le tableau 1 évalue la combinaison des doses croissantes de P (0,60, 120 kg/ha de P₂O₅) aux doses croissantes de chaux (0, 3, 6 et 9 T/ha de chaux) sur le rendement de la culture de maïs (*Zea mays* L.). Une analyse tendancielle des données de rendements de maïs indique un effet du P à la dose 60 kg de P₂O₅ et une augmentation de rendements qui culmine à 3 T/ha de chaux. Au-delà, les effets de la chaux sont moins sensibles. De ce fait, la combinaison optimale se situerait à 60 kg/ha de P₂O₅ et 3 T/ha de chaux.

Tableau 1. Essai de chaulage de maïs (T/ha) sur un kaolisol humifère allique (m=75 %) de Gisozi (Mugamba) (Shehata et Schalbreek, 1984).

Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)	Dose de chaux (T/ha)			
	0	3	6	9
0	1,6	3,0	3,2	3,5
60	2,5	3,2	3,6	3,4
120	2,6	2,9	3,8	3,6

Le tableau 2 montre les résultats du même essai mené cette fois sur la culture de pomme de terre sur le même type sol, un kaolisol humifère à forte toxicité Al. Sans avoir procédé à une analyse économique, il apparaît que l'effet de la chaux est plus nette que celle de l'addition des doses croissantes de P. A cet effet, la dose de 3 T/ha de chaux serait la plus rentable, par ce que l'ajout du P n'améliore pas notablement les rendements de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.).

Tableau 2. Essai de chaulage de la pomme de terre (T/ha) sur un kaolisol humifère allique (m=75 %) de Gisozi (Mugamba) (Shehata et Schalbreek, 1984).

Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)	Dose de chaux (T/ha)			
	0	3	6	9
0	5,1	10,0	10,2	12,8
60	7,2	10,3	12,9	12,9
120	7,6	11,1	12,5	14,3

Le tableau 3 montre un des rares essais menés sur la combinaison du chaulage et de l'addition des microéléments, ici pour le cas présent le Zn et le B, qui sont considérés les microéléments les plus déficitaires dans les sols acides du Burundi. La culture testée est la culture de petit pois. L'analyse des données de rendement de la culture de pois relève un effet sensible de l'application de la chaux particulièrement à la dose de 2 T/ha sans ajout de Zn et B. Les doses croissantes de Zn et B ne sont pas accompagnées d'augmentation sensible de rendements. Une analyse économique doublée d'étude de régression pourrait confirmer ce point de vue.

Tableau 3. Essai de chaulage du petit pois (T/ha) sur un kaolisol moyennement allique (m=42 %) de Munanira (Mugamba) (ISABU, 1984).

Dose de chaux (T/ha)	0 kg Zn et B/ha	2 kg de B + 20 kg de Zn/ha	4 kg de B + 40 kg Zn/ha
0	1,6	1,3	1,0
2	2,6	2,2	1,9
4	2,6	2,2	2,0
6	2,5	3,2	2,6
8	2,2	3,1	3,4
10	2,4	2,8	3,3

La Faculté des Sciences Agronomiques (FACAGRO) de l'Université du Burundi a contribué dans les années 1990 aux études sur la correction de l'acidité et la rentabilisation des rendements de cultures. Le tableau 4 rapporte les résultats de l'arrière effet du chaulage sur les rendements d'une culture de blé en rotation avec la pomme de terre sur un hygroxéro-ferralsol humique de Kajondi à toxicité Al, dans la région naturelle du Bututsi.

Malheureusement, les analyses statistiques ne sont pas disponibles pour départager les différents traitements. En saison 91B, s'il est vrai que les traitements fertilisés montrent une supériorité de la combinaison fertilisant minéral, fumier et calcaire par rapport au témoin intégral, il n'y a pas de différence entre les traitements fertilisés et amendés. L'année suivante (92B), les rendements de blé doublent ou triplent. Cependant, seule l'analyse économique pourrait rationnellement départager les traitements.

Tableau 4. Arrière effet du chaulage sur le blé (T/ha) en rotation avec la pomme de terre sur un hygroxéro-ferralsol humique (m=49 %) de Kajondi (Bututsi). (Rufyikiri et Hennebert, 1993).

Traitement sur la pomme de terre	Saison 91B	Saison 92B
T1= Témoin intégral	0	0
T2=NPK 60-90-60 + 3 T de Fumier/ha	0,75	1,55
T3=NPK 60-90-60 + 875 kg de calcaire	0,63	1,87
T4=NPK 60-90-60 + 1750 kg de calcaire	0,67	2,16
T5=NPK 60-90-60 + 2600 kg de calcaire	0,69	2,33

La rotation des cultures a fait aussi l'objet d'évaluation de l'effet du chaulage à travers les travaux de la FACAGRO sur un hydro-ferralsol humique à toxicité Al dans une autre région naturelle à sols acides à toxicité aluminique (Kirimiro). Ces résultats sont consignés dans le tableau 5 ci-après.

Tableau 5. Effet du chaulage des rotations manioc-manioc et patate douce-maïs-haricot (T/ha) sur un hygro-ferralsol humique allique (m=76 %) du Kirimiro (Rufyikiri et Hennebert, 1993).

Traitement	Manioc 91A	Pomme de terre 91A	Maïs 92A	Haricot 92B
T1= Témoin intégral	14,5	2,2	0,05	0,1
T2=60-90-60 + 600 kg/ha de chaux	20,3	7,9	1,2	0,6
T3=60-90-60 + 1200 kg/ha de chaux	20,6	5,6	1,1	0,8
T2=60-90-60 + 3600 kg/ha de chaux	17,3	1,9	1,2	1,3

Sans un support d'analyse économique, faute de disponibilité de données (ici comme pour les autres essais rapportés ici à partir des archives), le traitement optimal, aussi bien pour la culture de manioc (91A), celles de pomme de terre (91A), de maïs (92A) et de haricot (92B) serait le traitement T2 qui combine la formule de fertilisation minérale recommandée pour la pomme de terre (N-P₂O₅-K₂O 60-90-60) et 600 kg/ha de chaux. L'augmentation de l'application de la chaux n'améliore pas notablement les rendements des cultures testées. Bien évidemment, une analyse économique serait la plus rationnelle pour hiérarchiser les traitements évalués. Comme pour la plupart des essais de l'époque, aucune analyse de ce type n'a été effectuée sur les essais de chaulage et de fertilisation en général. Pour la majorité des essais, l'analyse n'a pas dépassé l'évaluation agronomique de rendements, sans nulle considération des investissements consentis.

Sous un autre angle, l'Institut des Sciences Agronomiques (ISABU) a testé l'effet des doses croissantes de P (0, 60, 120 et 180 kg/ha) avec ou sans application de chaux sur la rotation sorgho-pomme de terre-blé sur un kaolisol humifère de Mahwa, dans la région naturelle du Bututsi (Tableau 6).

Tableau 6. Combinaison chaulage/Phosphore de la rotation sorgho-pomme de terre-blé (T/ha) sur un kaolisol humifère de Mahwa (Bututsi) (Shehata, 1992).

Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)	Sorgho 91A		Pdt 92A		Blé 92B	
	Chaulé	Non Chaulé	Chaulé	Non Chaulé	Chaulé	Non chaulé
0	0,78	0,53	3,46	3,33	0,78	0,51
60	1,35	1,05	7,01	6,91	1,20	0,85
120	1,53	1,32	7,71	7,57	1,16	0,98
180	2,08	1,69	8,27	8,92	1,40	1,31

Les résultats consignés dans le tableau 6 ne démontrent pas nettement l'effet de l'application de la chaux, particulièrement pour les cultures de pomme de terre et de blé. Ces deux cultures sont effectivement considérées moins sensibles à l'acidité des sols par rapport à l'autre culture testée, le sorgho. Encore une fois, sans une étude de rentabilité, l'on aurait tendance, logiquement à considérer comme optimale la combinaison de 60 kg/ha de P₂O₅ avec le chaulage.

Un certain nombre d'études sur le chaulage ont été menées au sein de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) au cours des années 2010 et 2020. L'essai dont les résultats sont consignés dans le tableau 7 évalue l'effet de la combinaison de fientes de poule, chaux et l'engrais minéral le plus utilisé au Burundi, le DAP.

Tableau 7. Effet de la combinaison amendement calcaire et fiente de poule

Traitement	Biomasse cumulée (g/pot)	Al échangeable (méq/100 de sol)
5 T de fiente de poule + 1 T chaux + DAP	16,3a	0
2,5 T de fiente de poule + 1 T chaux + DAP	14,9b	0
5 T de fiente de poule + 0,5 T chaux + DAP	14,5b	0
2,5 T de fiente de poule + 0,5 T chaux + DAP	13,7b	0
0 T de fiente de poule + 1 T chaux + DAP	12,7bc	0,3b
5 T de fiente de poule + 0 T chaux + DAP	12,6c	0
0 T de fiente de poule + 0,5 T chaux + DAP	11,7cd	0,4b
2,5 T de fiente de poule + 0 T chaux + DAP	11,2d	0
DAP	1,9e	0,6a
Ppds	1,3	0,2

Source : A. Niyongabo (FACAGRO, 2010)

Simplement dit, les résultats rapportés dans le tableau 7 démontrent la supériorité de 5 T de fientes de poule par ha combinée à 1 T de chaux, avec une application systématique de DAP sur le rendement de la culture d'amaranthe et la réduction de l'Al échangeable, facteur majeur de l'acidité des sols dans les sols à pH inférieur.

Cette voie de recherche sur la combinaison fumure organique et amendement minéral est intéressante à plus d'un titre : valorisation de la ressource disponible sur l'exploitation agricole et optimisation de l'interaction positive, mieux, entre les deux types d'amendements.

Une étude similaire à celle rapportée ci-dessus menée à la FACAGRO dans le cadre des mémoires de fin d'étude est consignée dans le tableau 8 ci-après. L'étude compare les différentes doses de fiente de poule et chaux/calcaire de différentes provenances au Burundi en rapport avec le pH, l'Al échangeable et le P assimilable.

Tableau 8. Comparaison de l'effet chaulant des fientes de poule, de la chaux et du Calcaire.

Traitement	pHeau	Al échangeable (méq/100 g de sol)	P assimilable (mg/kg de sol)
2 T de calcaire du Moso	5,7a	1,00bcd	16,00c
20 T de fiente de poule	5,6a	0,72bcd	33,00a
2 T de chaux du Moso	5,6a	0,34d	16,00c
10 T de fiente de poule	5,5ab	0,94bcd	23,00b
1 T de chaux du Moso	5,5ab	0,58cd	16,00c
1 T de calcaire du Moso	5,4bc	1,17bc	16,00c
1 T de calcaire de Busiga	5,3cd	1,44ab	16,00c
2 T de calcaire de Busiga	5,3cd	1,29bc	16,00c
2 T de calcaire de Bubanza	5,3cd	1,22bc	16,00c
Témoin (Gisozi) + 100 kg de DAP	5,2de	2,10a	20,33b
1 T de calcaire de Bubanza	5,2de	1,37ab	15,33c
Ppds	0,1	0,73	4,00

Source : D. Ndayishimiye (FACAGRO, 2007)

Coût agronomique de l'inaction: Réponse du blé et du maïs aux amendements minéraux (ISABU/Gisozi, 1962)

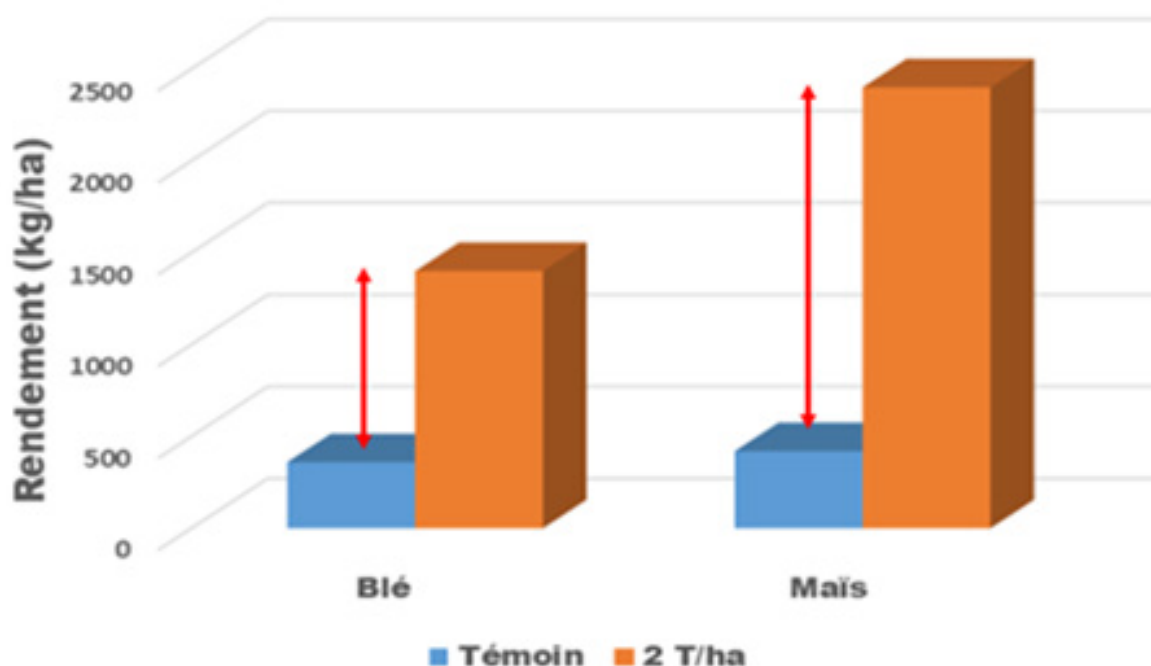


Figure 1. Effet des amendements minéraux sur le rendement du blé et du maïs

Un essai conduit il y a plus de 60ans par l'ISABU à Gisozi a démontré un effet agronomique spectaculaire de la chaux sur le rendement du blé et des maïs (Figure2). De la même manière, une récente investigation conduite dans les parcelles expérimentales de la Faculté d'Agronomie (FABI) à Zege montre qu'une application de 750 kg/ha de dolomie quadruple le rendement du soja par rapport au témoin dans dolomie (figure 2). Cette dose de 750 kg/ha de dolomie constitue l'optimum pour cette culture (loi des rendements ou excédents de rendements moins que proportionnels ou loi de Mitscherich). Pareille dose a été recommandée par l'ISABU pour les légumineuses au cours des essais conduits dans les années 1980.

Coût agronomique de l'inaction: Réponse du soja aux doses croissantes de dolomie (kg/ha) (FABI, 2021)

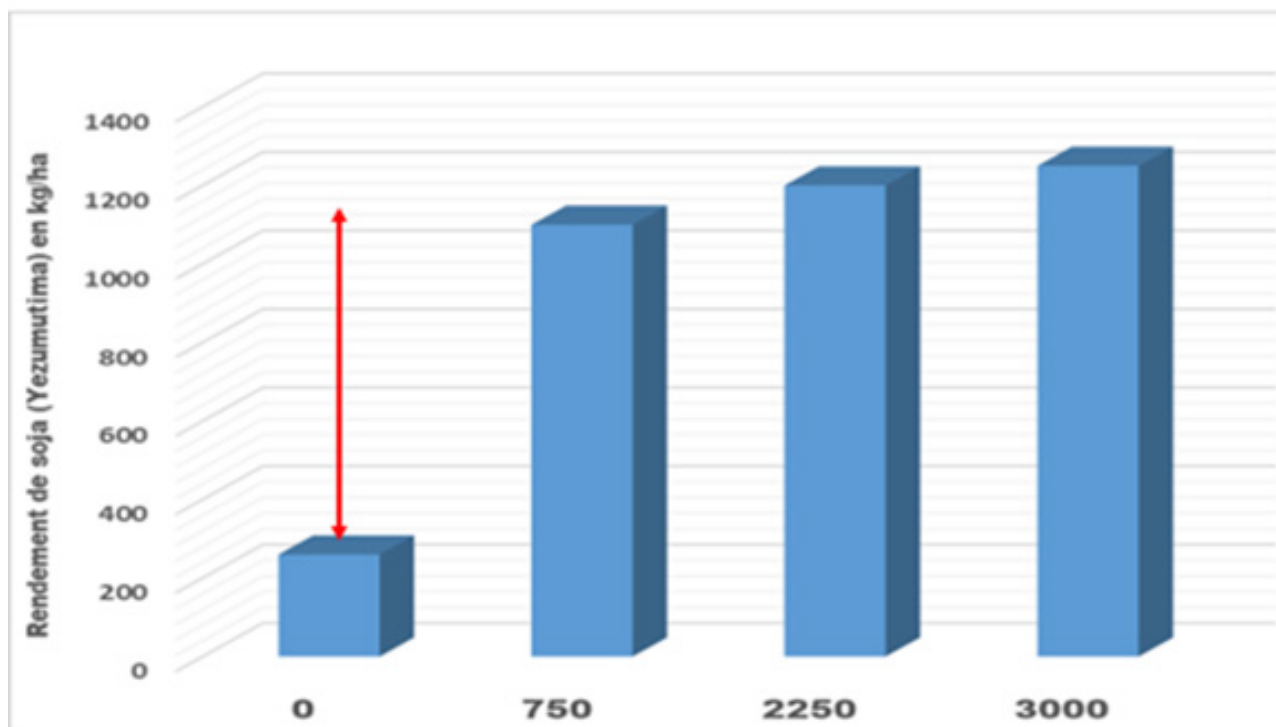


Figure 2. Effet des amendements minéraux sur le rendement du blé et du maïs

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous devons relever que, au-delà de la correction de l'acidité des sols, le Ca et le Mg jouent d'importants rôles dans la physiologie des plantes. Le Ca maintient l'intégrité cellulaire et la perméabilité membranaire, renforce la germination et la croissance du pollen, active les enzymes impliquées dans la mitose, la division et l'élongation cellulaire. Il est aussi impliqué dans la synthèse des protéines et le transfert des hydrates de C et la détoxification des métaux lourds dans la plante. Le Mg est une composante de la chlorophylle, un co-facteur d'enzymes activatrices du processus de phosphorylation, en tant que pont entre les structures pyrophosphates d'ATP ou ADP et l'enzyme et un stabilisateur des particules de ribosomes dans la synthèse des protéines.

L'échantillon d'essais sur la correction de l'acidité par chaulage avec ou sans fumure organique, fertilisant minéral (DAP) ou microéléments (Zn et B) constitue l'essentiel des investigations conduites par l'ISABU, la FACAGRO d'abord et la FABI en relai, au cours des décennies 1990 à 2020. Ces essais ont couvert une palette de cultures vivrières, la pomme de terre, le manioc, le sorgho, le maïs, le blé, le haricot et le soja. Elles ont dans l'ensemble démontré l'intérêt primordial du chaulage dans les performances agronomiques des cultures, essentiellement dans trois régions naturelles du Burundi, parmi les plus touchées par l'acidité des sols, le plus souvent doublée de toxicité Al : le Bututsi, le Kirimiro et le Mugamba (Nord et Sud).

Parmi les macroéléments, seul le P a fait l'objet d'essais combinatoires avec la chaux, souvent avec des doses très élevées (jusqu'à 6-9 T/ha) et certainement inaccessibles au petit agriculteur et certainement économiquement non rentables. Un seul essai sur les microéléments (un précédent à l'époque) a testé le Zn et le B aussi à des doses

élevées, avec des risques de phytotoxicité, qui se manifeste par des chutes de rendements au-delà de certaines doses d'application.

Reconnaissant l'interaction positive entre les amendements minéraux (chaux, dolomie) et organiques (fumure organique), un certain nombre d'études de correction de l'acidité ont testé la combinaison chaux/dolomie et fumures organiques animales (fumier de vache, fientes de poule).

Cette approche investigative a été reconnue fondamentale par le projet PAGRIS de l'IFDC comme une voie de recherche agronomiquement et économiquement rationnelle. A cet effet, le projet a financé pareilles études conduites depuis quelques années par la FABI à la ferme didactique de Zege, à Gitega. Les résultats des premiers essais du genre sont présentés dans le présent document de synthèse. Une série d'investigations testant la combinaison optimale de fumures organiques variées avec la dolomie sont en cours, en même temps que des tests sur la valeur ajoutée de microéléments (Cu, Zn, B) sur les performances agronomiques du haricot.

Remerciements

Les auteurs sont gracieusement reconnaissants à l'égard du projet PAGRIS/IFDC pour avoir facilité la dissémination et le partage des résultats contenus dans cet article durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Bacanamwo, M. et E. Rufyikiri. 1987. Etude des amendements calco-magnésiens dans la fertilisation des sols acides. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 149 p.
2. Bizimana, S. 2003. Effets comparatifs des amendements organiques et calcaires sur la réduction de l'aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 149 p.
3. Bukeyeneza, Y. 2025. Dynamique de l'acidité du sol et détermination de la dose optimale de la chaux dolomitique à recommander pour la culture de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.). Mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. Option Génie de l'Environnement. Faculté des Sciences. Université du Burundi. 62 p.
4. Burasekuye, M, 1987. Influence de la provenance de la granulométrie et du type de sol sur la vitesse de réaction des calcaires du Burundi. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
5. Buzoya, D. 2005. Effets des engrais ammoniacaux sur la dynamique du pH dans trois sols représentatifs du Burundi. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
6. Crawford Jr, T.W., U. Singh and H. Breman. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa Great Lakes Region. An IFDC Catalist Project Report. 138 p. Kigali, Rwanda.
7. De Keyser, S. 1991. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de leur correction. Séminaire National sur la Fertilisation des Sols du Burundi. Bujumbura, 10-12 Décembre 1991. P. 46-80.
8. Hatungimana, I. 2025. Efficacité agronomique et efficience économique du chaulage en milieu réel. Mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. Option Génie de l'Environnement. Faculté des Sciences. Université du Burundi. 72 p.
9. Kaboneka, S., A. Niyongabo & S. Nijimbere, 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. Revue de l'Université du Burundi, Série-Sciences Exactes et Naturelles. Volume 28: 9-15.
10. Kaboneka, S., D. Ndayishimiye, A. Nibasumba and S. Biwimana. 2024. Comparative Liming Power of Chicken Manure and Selected Dolomitic Sources on an Acidic High Altitude Burundi Surface Soil, International Journal of advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE), Volume 10 (6): 38-52.
11. Masabo C. 1988. Effet des doses de calcaire sur la correction de la toxicité aluminique de 3 sols du Burundi. Mémoire UB. Faculté des Sciences Agronomiques (FACAGRO).

12. Minani, D., Hennebert, P. et Novak, M.H. 1992. Amélioration et rentabilité des vivrière des terres acides d'altitude (cas du Bututsi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
13. Nahimana, L. 1992. Gisements d'amendements pour les sols acides au Burundi. Atelier International IBSRAM-ISABU-FACAGRO. Mai 1992.
14. Ndayishimiye, D. 2007. Effets comparatifs de trois amendements calco-magnésiens sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du Mugamba (Gisozi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
15. Nijimbere, B. 2025. Evaluation de l'effet combiné du chaulage et de la fumure organique sur la nodulation et le rendement du haricot commun sur sols acides des Plateaux Centraux du Burundi. Ecole Doctorale de l'Université du Burundi. Cohorte 4.
16. Nijimbere, S., S, Kaboneka, S. Ndiokubwayo, W. Irakoze et J. Ndikumana. 2020. Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi). Revue de l'Université du Burundi, Série-Sciences Exactes et Naturelles. Volume 29: 34-44.
17. Nimubona, L. 2005. Effets de l'application des différents fumiers et du calcaire sur la dynamique de l'Aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 161 p.
18. Niyongabo, A. 2010. Effet de la combinaison DAP, chaux dolomitique et fiente de poule sur la réduction de la toxicité aluminique des sols d'altitude du Burundi. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
19. Niyonkuru, A. 2025. Evaluation de l'effet des classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité aluminique et de la disponibilité du P assimilable dans le sol. Mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. Option Génie de l'Environnement. Faculté des Sciences. Université du Burundi. 63 p.
20. Niyonsaba, M.V. 2022. Effet de la dolomie sur la nodulation et le rendement de soja, variété Yezumutima. Mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. Option Génie de l'Environnement. Faculté des Sciences. Université du Burundi.
21. Niyungeko A. et S. Ntirandekura. 2008. Effet interactif du fumier de poule et de la chaux sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du Mugamba (Gisozi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. FACAGRO. Université du Burundi.
22. Ntiburumusi, F. 1989. Arrière effet du chaulage sur la productivité d'un kaolisol humifère dans la région naturelle du Mugamba. ISABU. Publication N° 135. 29 p.
23. Opdecamp, L. et G. Sottiaux. 1984. Saturation aluminique accrue et autres modifications physico-chimiques induites par la fumure minérale d'un hydroxéro-ferralsol acide à Murongwe. Publication ISABU. N° 5. 14 p.
24. Pacquay, R. Expériences de la recherche/développement sur l'amendement calcaire (p. 81-92). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
25. Rishirumuhirwa, T, 1992. Résultats des essais fumure organique et chaulage au site repère de Mashitsi (1991A-1991B). Atelier International IBSRAM-ISABU-FACAGRO. Mai 1992.
26. Sebahene, M. 1991. Les ressources en calcaire du Burundi (p. 113-118). Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. p. 310.
27. Shehata N. 1991. Recherches menées dans le but de l'amélioration des sols acides et/ou alliques d'altitude (p. 93-107). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
28. Shehata, N. & Schalbroeck, J.J. 1984. Effet du chaulage et de la fertilisation sur le maïs dans le Mugamba. Publication ISABU N. 43.
29. Shehata, N. 1986. Effect of lime and Phosphorus on the growth of two cereal crops during two successive seasons of cultivation. Science and Development Research. Vol. 14. Numéro 159.

30. Sindayihebura, F. 1990. Récupération des sols acides du Burundi. Effet de la dose de calcaire sur la croissance et l'autotrophie azotée du haricot (*Phaseolus vulgaris* L. var Diacol Calima. Mémoire UB. Faculté des Sciences Agronomiques. Département de Fertilisation et Phytotechnie.
31. Sindimwo, P. Exemples d'analyses chimiques sur les dolomies de quelques sites. Gitega, 24-25 Novembre 2015.
32. Van Den Berghe, Sota, P. & Mujawayezu, A. 1991. Etude de la fertilisation intégrée en milieu paysan dans la région naturelle du Mugamba. Synthèse sur 3 ans (1988-1991). Projet FAVA/FACAGRO.
33. Van Den Berghe. 1991. Le problème des engrais acidifiants (p. 108-112). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
34. Wakana, M. 1984. Contribution à la définition de la toxicité aluminique des sols humifères d'altitude du Burundi. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 108 p.
35. Wouters, J. 1987. Recommandation pour l'utilisation des chaux et calcaires. Université du Burundi. FACAGRO. Juin 1987. 9 p.
36. Wouters, J., M. Wakana et L. Opdecamp. 1986. Sensibilité du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) à la concentration en aluminium des sols de la région des Grands-Lacs. *Tropicultura*. Vol 4 (1).
37. Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, and M. R. Malcolm. 1990. "Application of Expert Systems to the Study of Acid Soils in Rwanda," *Agric. Ecosystems Environ.* 30: 203–218.

Contribution de l'International Fertilizer Development Center (IFDC) à la connaissance de l'état des lieux de l'acidité des sols du Burundi et à sa correction par application de la dolomie.

Oscar Nduwimana^{1*}, Micael Beun¹, Soter Ndiokubwayo², Anaclet Nibasumba², Anicet Niyonkuru³, Béatrice Nijimbere⁴, Charles Nahimana⁵, Claudette Nduwimana⁶, Richard Habonimana⁷

¹International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

³Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie. Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. BP 2700 Bujumbura, Burundi. BP 2700 Bujumbura, Burundi.

⁴Twitezimbere Asbl. B.P. 2415. Bujumbura, Burundi.

⁵UCODE-AMR. B.P. 134. Ngozi, Burundi.

⁶Help Channel Burundi. B.P. 2365. Bujumbura, Burundi.

⁷JACARANDA sprl. Boulevard Mwezi Gisabo. No 18.

*Auteur de correspondance, E-mail: onduwimana@ifdc.org

Résumé

Le présent travail se focalise sur l'acidité des sols du Burundi et les contributions de IFDC Burundi pour sa correction, à travers le Projet pilote dolomie. En collaboration avec l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), des cartes d'acidité des sols ont été produites. Il ressort de cette cartographie que 73 % des sols à potentialité agricole, d'une superficie de 1 651 625,7 ha ont des $\text{pH} \leq 5.5$, nécessitent ainsi un chaulage de redressement. Les zones fortement acides sont réparties essentiellement sur la Crête Congo Nil, les plateaux centraux et les Mirwa. Les régions moins acides sont la plaine de l'Imbo et les dépressions du Nord. Cette acidité a comme conséquence la non-assimilabilité des éléments nutritifs majeurs, secondaires et oligoéléments comme N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Mo, B, etc dont les plantes ont besoin pour assurer une bonne production. D'autres éléments s'accumulent dans les sols et deviennent toxiques. Il s'agit de H, Al, Fe, Mn. Les résultats d'analyse des échantillons de dolomie prélevés chez les entreprises productrices de dolomie montrent que cette dernière est de bonne qualité chimique par considération des paramètres comme le pH, les teneurs en CaO et MgO, le pouvoir neutralisant, l'indice de pureté, les pertes aux feux. Cependant, en utilisant les tamis de 2 mm et 1 mm, il ressort que la dolomie produite, selon les cas, est très grossière ou très fine, ce qui influe sur l'efficacité de la dolomie et la durée de son action dans le sol. Dans les parcelles non chaulées, l'application du fumier, des fertilisants et les travaux de protection des sols contre l'érosion parviennent à stabiliser le pH sans toutefois parvenir à le neutraliser. De faibles élévations ou diminutions de pH peuvent être observés. Dans les parcelles chaulées, il y a une augmentation sensible de pH les 6 premiers mois, suivie de faibles augmentations de pH jusqu'à atteindre une valeur maximale à des périodes dont la durée dépendrait de plusieurs facteurs dont la granulométrie de la dolomie, le pH initial et les types de sols. Le pH se stabilise puis commence à chuter vers le 20^{ème} mois. Cela nécessite l'application d'une dose annuelle d'entretien de 500 à 600 kg de dolomie par hectare afin de maintenir le pH dans la zone optimale. En 2025A, la dolomie appliquée au cours de la saison culturale 2023A a permis d'augmenter de 740 kg/ha et 760 kg/ha les rendements du maïs et du haricot volubule. En conclusion, la dolomie reste une voie prioritaire de correction des sols acides du Burundi, d'où la nécessité de sa sensibilisation, sa production en quantité suffisante et sa disponibilité auprès des agriculteurs.

Mots clés: Acidité des sols, fertilité des sols, pH, pH mètres, dolomie, éléments assimilables, CaO, MgO, qualité chimique et physique de la dolomie

Abstract

This study focuses on soil acidity in Burundi and IFDC Burundi's contributions to correcting it through the Dolomite Pilot Project. In collaboration with the Burundi Institute of Agricultural Sciences (ISABU), soil acidity maps were produced. This mapping shows that 73% of soils with agricultural potential, covering an area of 1,651,625.7 ha, have a pH \leq 5.5 and therefore require liming to restore them. The highly acidic areas are mainly located on the Congo-Nile Ridge, the central plateaus, and the Mirwa. The less acidic regions are the Imbo plain and the northern depressions. This acidity results in the non-assimilability of major, secondary, and trace nutrients such as N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Mo, B, etc., which plants need to ensure good production. Other elements accumulate in the soil and become toxic. These include H, Al, Fe, and Mn. The results of analyses of dolomite samples taken from dolomite producers show that the dolomite is of good chemical quality in terms of parameters such as pH, CO and MgO content, neutralizing power, purity index, and loss on ignition. However, using 2 mm and 1 mm sieves, it appears that the dolomite produced is, depending on the case, very coarse or very fine. It affects the effectiveness of the dolomite and the duration of its action. In unlimed plots, the application of manure, fertilizers, and soil erosion protection measures stabilize the pH without neutralizing it. Slight increases or decreases in pH may be observed. In the limed plots, there is a pH increase during the first six months, followed by small increases in pH until a maximum value is reached at intervals whose duration depends on several factors such as the particle size of the dolomite, the initial pH, and soil types. The pH stabilizes and then begins to fall around the 20th month. This requires the application of an annual maintenance dose of 500 to 600 kg of dolomite per hectare to maintain the pH within the optimal range. In 2025A, the dolomite applied during the 2023A growing season increased corn and climbing bean yields by 740 kg/ha and 760 kg/ha, respectively. In conclusion, dolomite remains a priority for correcting acidic soils in Burundi, hence the need to raise awareness of it, produce it in sufficient quantities, and make it available to farmers.

Keywords: Soil acidity, soil fertility, pH, pH meters, dolomite, assimilable elements, CaO, MgO, chemical and physical quality of dolomite

1. INTRODUCTION

Au Burundi, selon le Rapport des résultats préliminaires du Recensement Général de la Population, de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage du Burundi (RGPHAE, Déc 2024), l'agriculture occupe 2 335 995 ménages, ce qui représente 85,7 % de 2 724 457 ménages ordinaires du pays. Elle contribue à hauteur de 39,6 % du PIB (PND 2018-2027).

Malgré le rôle crucial de l'agriculture, il y a diminution de la fertilité de sols et du rendement des cultures, ainsi qu'une amplification du phénomène d'acidification des sols qui serait lié à plusieurs causes tant naturelles qu'anthropiques. Les sols burundais sont des sols tropicaux dégradés dont les kaolisols pauvres et prédisposés à l'acidification. L'érosion emporte une grande quantité de Ca et le Mg éléments tampons du sol. Elle entraîne aussi des pertes en terre atteignant 100T/ha/an dans les Mirwa. Les autres facteurs de l'acidification sont la surexploitation des terres consécutive à une démographie galopante avec un taux d'accroissement annuel moyen de 2.7% entre 2008 et 2024 (RGPHAE, 2024), l'insuffisance de la biomasse et de la matière organique, la non-restitution des éléments nutritifs exportés, l'utilisation des engrais minéraux acidifiants, etc.

Des recherches menées à petite échelle vers les années 1990 (Ntiburumusi, 1988 et Sebahene, 1991) signalaient déjà d'une part le problème d'acidité des sols au Burundi et d'autre part l'existence des gisements calcaires dans certaines régions du pays. Par la suite, IFDC à travers le Projet d'Appui au Nouveau Programme de Subvention des Engrais au Burundi (PAN PNSEB) et le Projet d'Appui à la Gestion Responsable et Intégrée des Sols (PAGRIS), en collaboration avec ISABU, a contribué à une meilleure connaissance de l'état des lieux actualisé de l'acidité des sols Burundais grâce à la cartographie produite à large échelle en 2013 et en 2021. Cette cartographie, complétée par l'étude RODEVA sur la filière dolomie au Burundi a mis un accent sur l'aggravation et la généralisation de la problème d'acidité des sols avec un impact négatif sur la fertilité biologique et physicochimique des sols d'où des faibles rendements malgré les efforts investies dans les fertilisants.

IFDC, en réponse à cette problématique, a élaboré un projet pilote dolomie qui a comme objectifs de i) Promouvoir l'utilisation de la dolomie au Burundi afin de restaurer durablement la fertilité des sols et de contribuer ainsi dans le renforcement de la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages burundais ii) Démontrer la pertinence de l'utilisation de la dolomie à travers une approche intégrée de restauration et gestion durable de la fertilité des sols, laquelle implique notamment l'application d'une dose de redressement de dolomie afin de corriger l'acidité des sols dans les zones prioritaires, à $\text{pH} \leq 5,5$.

2. METHODOLOGIE

2.1. Cartes de 2013

Le document final de la cartographie de 2013 montre que les cartes ont été élaborées à partir de 1039 échantillons composites obtenus chacun à partir de 20 prélèvements pris en zigzag sur une parcelle, issus des sites géoréférencés, localisés dans tout le pays et choisis en fonction de la variabilité des sols, des régions naturelles et zones agroécologiques du pays. Ces échantillons ont été prélevés à une profondeur de 0 à 20 cm. L'échantillonnage a été réalisé par quatre équipes de 2 personnes du staff de la Direction de Fertilisation des Sols (DFS) et de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) préalablement formées sur les techniques d'échantillonnage et d'utilisation des GPS par le Laboratoire Kenyan CROPNUTS qui était chargé de faire les analyses de sols et de produire les cartes.

Les méthodes d'analyse de sol internationalement reconnues ont été utilisées. Le pH du sol a été déterminé selon la méthode potentiométrique avec un rapport sol-eau de 1:2. Pour les éléments nutritifs (P, Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, Cu, B, Zn et S), il y a eu recours à la spectrométrie d'émission atomique avec la méthode Mehlich3. L'azote total dans le sol a été déterminé en utilisant la méthode Kjeldahl.

L'analyse du carbone organique du sol a été faite par spectrométrie moléculaire avec la méthode de Walkley-Black. La méthode volumétrique avec KCl (1N) a été utilisée pour déterminer l'aluminium extractible. La production des cartes a été faite en utilisant le logiciel GIS.

2.2. Cartes de 2021

Tel que décrit dans le rapport final de la cartographie 2021, l'échantillonnage systématique a été utilisé pour le choix des points d'échantillonnage. Ainsi, la zone d'étude a été subdivisée grâce à un maillage régulier carré au sein duquel, les points d'échantillonnage sont déterminés par les centres de ces formes géométriques. Les coordonnées géographiques des points d'échantillonnage ont été prédéterminées à l'aide du calculateur de la géométrie dans ArcGIS. Les appareils GPS ont été paramétrés. Chaque agent devait retrouver les coordonnées des points d'échantillonnage prédéterminés à l'aide d'ArcGIS. La profondeur d'échantillonnage était de 30 cm à partir de la surface. L'échantillon composite était constitué de 5 échantillons prélevés dans la zone homogène par rapport au point d'échantillonnage. En plus de l'échantillon de sol, une fiche de collecte des données a été remplie pour décrire la zone d'échantillonnage.

Les échantillons ont été analysés au laboratoire d'analyse des sols et des produits agroalimentaires (LASPA) de l'ISABU. Le traitement informatique des données a été réalisé avec ArcGIS. Les données obtenues sur les points d'échantillonnage ont été transformées en données continues avec la méthode IDW (Inverse Distance Weighted = Pondération par distance inverse). Le pH_{eau} a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre dans une suspension de rapport sol-eau de 1:5 (ISO 10390). L'azote total du sol a été déterminé par la méthode de Kjeldahl modifiée et dosage volumétrique; ISO 11261. L'extraction du phosphore assimilable est réalisée avec NaHCO₃ et le dosage par UV spectrophotométrie (ISO 11263). Pour le K échangeable, la méthode utilisée est celle de Metson. L'extraction est faite par la saturation avec de l'acétate d'ammonium à pH7 et le dosage est réalisé avec la spectrométrie à absorption atomique (SAA/ flamme); NF X 31-108.

2.3. L'approche méthodologique du projet pilote dolomie

Le ciblage des provinces, des communes et des collines d'intervention a impliqué IFDC et 9 organisations d'encadrement des agriculteurs ayant été choisies dans la mise en œuvre du Projet pilote dolomie. Ces organisations sont TWITEZIMBERE, ADISCO, UCODE, JACARANDA, OAP, INADES FORMATION Burundi, ONE ACRE FUND TUBURA, HELP CHANEL ET RESEAU Burundi 2000 PLUS. A base des données de la cartographie, les collines et exploitations prioritaires d'intervention étaient celles de très fortement à fortement acides, avec des pH ≤5.5. La zone d'action s'est étalée sur 44 communes et 15 provinces du pays (ancienne subdivision administrative du pays).

Les agriculteurs retenus sont ceux qui acceptaient d'appliquer la dolomie fournie gratuitement par le projet mais aussi d'utiliser les autres intrants (semences, fertilisants, pesticides) achetés à leurs propres frais. Ils devraient aussi s'engager à protéger leurs champs contre l'érosion. Tout cela était envisagé afin que la dolomie s'insère dans le paquet technologique de gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS). Des séances préalables de sensibilisation et de formation sur la problématique d'acidité des sols et l'utilisation de la dolomie ont été organisées en faveur de la population vivant dans les collines d'intervention.

Des champs de démonstration ont été installés. Le dispositif était constitué d'une parcelle chaulée et celle non chaulée, chacune de 1 are afin de pouvoir comparer l'évolution du pH et des autres paramètres de fertilité des sols. Des mesures de pH ont été effectuées mensuellement au sein de ces parcelles. Les mesures étaient faites en utilisant les pH-mètres de type « pH20Pocket pH tester » de précision ±0.1. Les mesures étaient faites directement dans les échantillons composites de sol mélangés avec l'eau distillée dans les proportions 1-1.

Les quantités de dolomie à appliquer, en dose unique sur 2 ans, variaient d'un agriculteur à un autre selon la superficie du champ et le niveau de pH. Elles étaient calculées en utilisant la formule de Yamoah: Besoins en chaux (T/ha) = 16-2,87 pH_{eau}. Après cette période de 2 ans, la quantité de dolomie à appliquer revenait à une dose d'entretien annuelle de 500 à 600 kg de dolomie afin d'éviter de retomber dans l'acidité.

Au cours de la saison 2023A. La généralisation de la formule Yamoah a permis de recommander des doses moyennes de 3.8 T/ha; 2.2 T/ha et 1 T/ha respectivement dans les zones de pH 4 à 4,5; 4,6 à 5,0; 5,1 à 5,5. A partir de pH=5,6, il fallait utiliser la dose d'entretien. Dès 2024A, ces doses ont été réajustées à 2.2 t/ha dans les zones de pH ≤ 5 et 1 T/ha dans les marges de pH 5,1 à 5,5. Cela a été fait pour se rapprocher de la fiche technique officielle sur la dolomie et tenir compte des réalités économiques des agriculteurs.

La dolomie utilisée dans le cadre du projet pilote dolomie a été produite d'abord par 4 entreprises qui sont AB GEOSCIENCE, STONE SOCIETY, Ets JEREMIE et ITRACOM. Deux autres entreprises ont été ajoutées dont EFCCO et DOLO PRODUCTION COMPANY.

La livraison de la dolomie aux agriculteurs, via les hangars collinaires de stockage, était autorisée moyennant un contrôle qualité effectué sur les échantillons de dolomie prélevés aléatoirement au niveau des usines par le staff du laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agroalimentaires (LASPA). Les analyses portaient sur les principaux paramètres dont le pH, le % CaO, le % MgO, le pouvoir neutralisant, l'indice de finesse, les pertes aux feux et l'humidité. A base des résultats trouvés, IFDC autorisait ou pas la livraison des lots échantillonnés.

L'application de la dolomie a été faite au moins 2 semaines avant le semis pour la saison B, cette période pouvait même atteindre 1 mois pour la saison A.

La sensibilisation et la formation des agriculteurs, la réception, la distribution et le suivi de la bonne application de la dolomie a impliqué les 9 neufs organisations d'encadrement déjà mentionnées, lesquelles ont également mesuré et collecté les données sur l'évolution du pH et des autres paramètres de fertilité des sols. Des ateliers de restitution des résultats ont été organisés à la fin des campagnes dolomie dans l'objectif d'échanger sur les défis et les voies de solutions; et de capitaliser les cas de succès.

3. RESULTATS

3.1 Résultats en rapport avec la cartographie

Les analyses de sols ont permis de produire des cartes d'acidité des sols en 2013. Ces cartes ont été actualisées en 2021. Toutes ces cartes ont été produites grâce à un partenariat ISABU-IFDC. Face à la multiplicité des cartes, il ne sera donné que quelques cas illustratifs de l'état de fertilité des sols du Burundi. Les figures 1 et 2 sont des cartes d'acidité produites en 2013 et 2021.

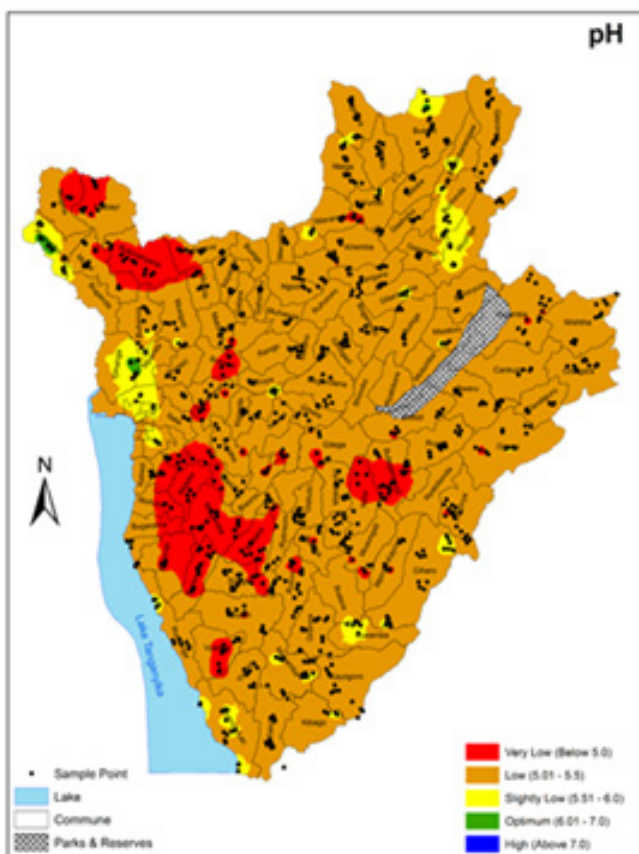


Figure 1. Carte d'acidité de 2013

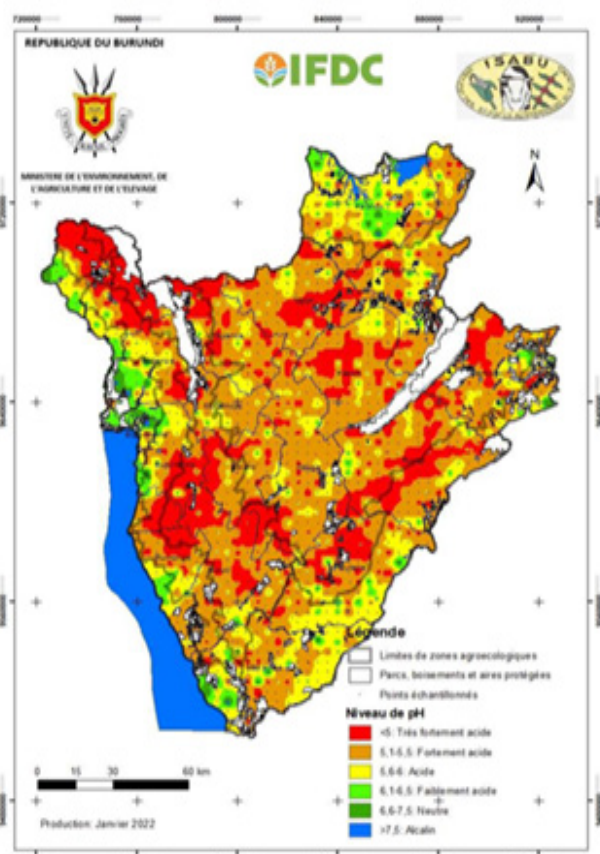


Figure 2. Carte d'acidité de 2021

La cartographie de 2013 montre que à cette année 66 % des sols cultivés avaient un $\text{pH} \leq 5,5$ et nécessitaient un chaulage de redressement. Les sols très fortement acides, avec des $\text{pH} < 5$ représentaient 27 % des sols cultivés et étaient surtout localisés sur la crête Congo Nil.

La cartographie de 2021 bien que produite en utilisant une méthodologie différente montre que les niveaux d'acidité ont évolué durant les 8 ans succédant 2013. Les sols à potentialité agricole à $\text{pH} \leq 5,5$ représentent 73 %. Ceux qui sont très fortement acides avec des $\text{pH} < 5$ représentent 22.3% soit 505 082.6 ha. Ceux qui sont fortement acides, avec pH de 5.0 à 5.5 représentent 50.7% soit une superficie de 1146 543.1 ha. Il ressort de ces chiffres que les sols nécessitant le chaulage occupent une superficie de 1 651 625.7 ha sur un total de 2 267 722.4 ha de sols à potentialité agricole.

Toutes les provinces et régions naturelles du pays sont affectées mais des degrés différents, les cas graves étant observés sur la crête Congo Nil, les plateaux centraux et les Mirwa. Les zones moins acides sont une partie de la plaine de l'Imbo et des dépressions du Nord.

A cause de l'acidité des sols les éléments nutritifs dont les plantes ont besoin ne sont pas disponibles pour la plante car ils sont sous forme non assimilable. Les cartes N°3 à 8 illustrent les cas de carences pour certains macroéléments, éléments secondaires et oligoéléments.

Les figures 3 et 4 sont des cartes produites en 2021 sur les teneurs en phosphore assimilable et potassium échangeable.

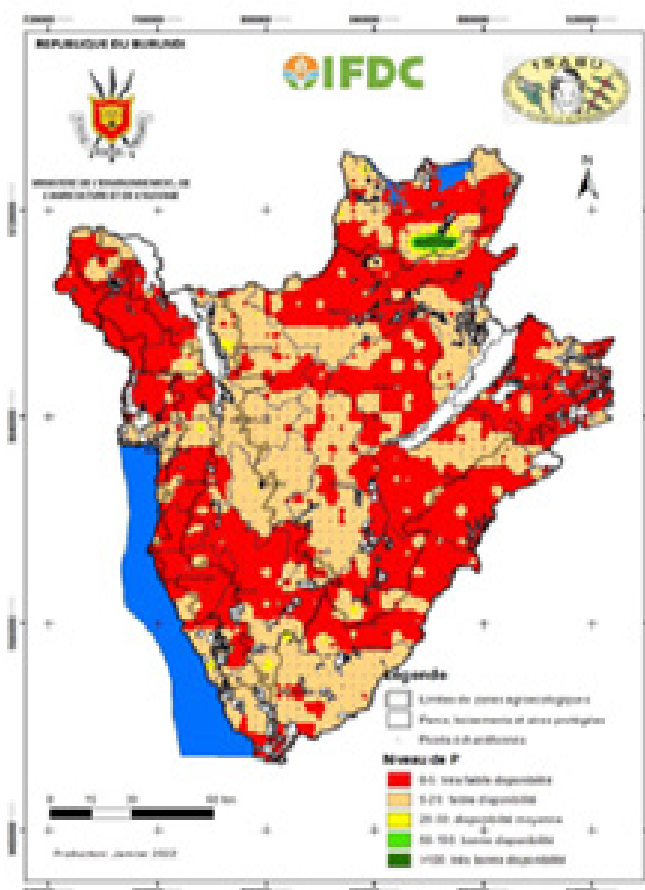


Figure 3. Cartes des teneurs en $\text{P}_{\text{assimilable}}$

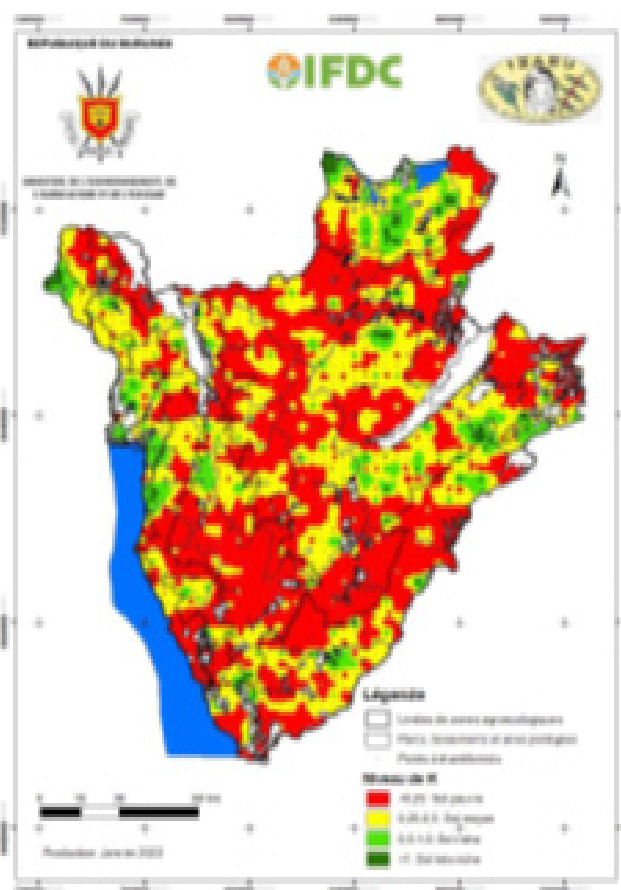


Figure 4. Cartes des teneurs en $\text{K}_{\text{échangeable}}$

Presque la majorité des sols du Burundi connaissent des carences en phosphore assimilable. Ces carences représentent 98,1 % soit une superficie de 2 239 688.9 ha sur un total de 2 267 570.9 ha de sols à potentialité agricole. Les carences en K échangeable quant à elles sont de 52.2% soit 1182604.6ha. Elles sont moins sévères à la plaine de l'Imbo et aux dépressions du Nord Est. A noter également qu'il existe des cas isolés de teneurs optimales en K échangeable.

Les figures 5 et 6 sont des cartes qui montrent des carences en éléments secondaires Ca et Mg.

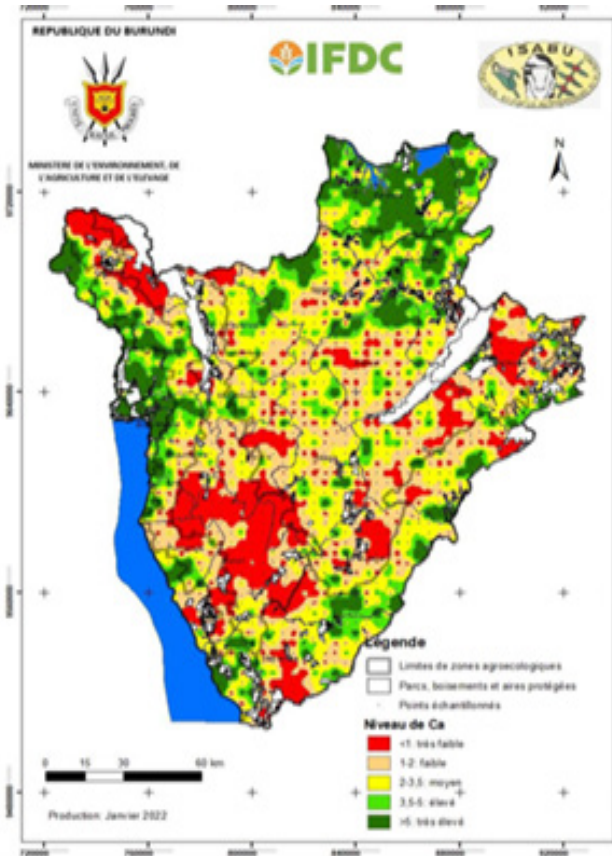


Figure 5. Carte des teneurs en Ca échangeable

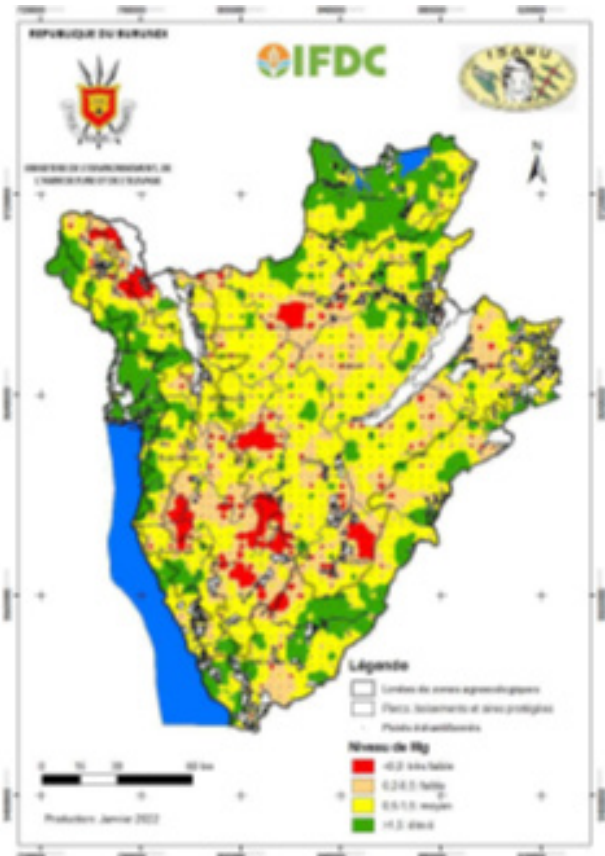


Figure 6. Carte des teneurs en Mg échangeable

Les carences en Ca et Mg échangeables oscillent entre 40 et 45%. Elles sont très prononcées dans les zones acides. L'analyse des rapports Ca/Mg permet de constater des excès ou carences de l'un ou l'autre des 2 éléments par rapport à un autre, ce qui devait être considéré dans le choix du type de chaux agricole à appliquer. Il en est de même pour le rapport Mg/K.

Les figures 7 et 8 sont des cartes de 2013 qui montrent les carences en oligoéléments comme le bore et le zinc.

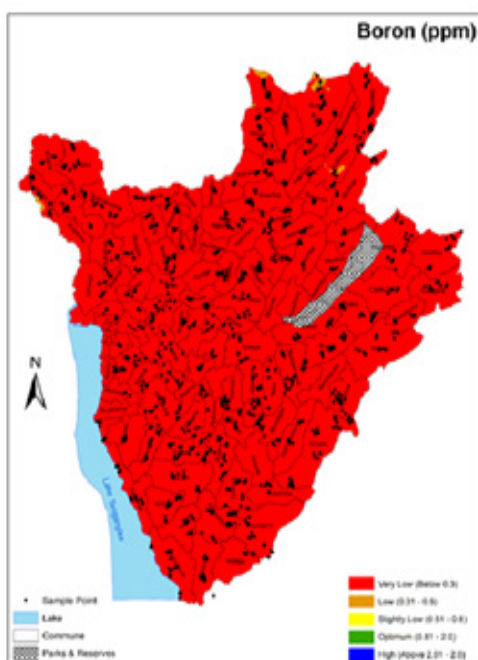


Figure 7. Carte des teneurs en Bore

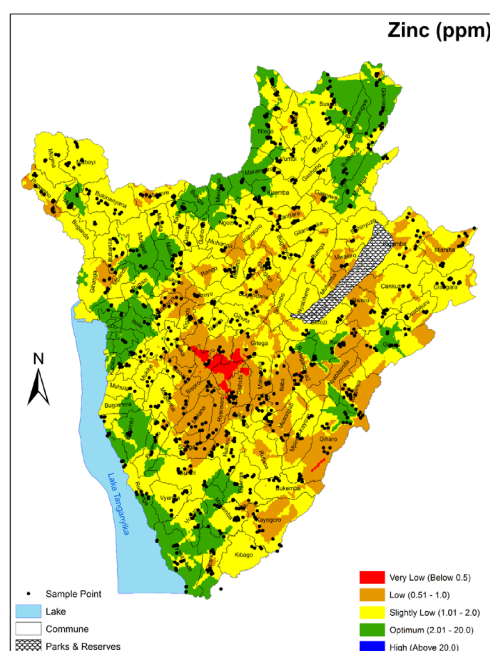


Figure 8. Carte des teneurs en Zinc

Le bore est à 100% déficient dans les sols du Burundi. Des carences en zinc atteignent en moyenne 62% des sols. Elles sont très élevées au centre et à l'est du pays et moins observées à la plaine de l'Imbo et au Nord Est.

3.2. Résultats en rapport avec le projet pilote dolomie

En vue de contribuer à la correction de l'acidité des sols très acides par application des doses de redressement du pH, le projet a mené plusieurs activités impliquant des partenaires tant publiques que privés. Le tableau 1 en est une synthèse.

Tableau 1. Synthèse des résultats du projet pilote dolomie

Indicateurs	2023A	2024A	2024 B	2025B	Observations
Provinces d'intervention*	9	14	15	15	Bujumbura, Bubanza, Cibitoke, Rumonge, Makamba, Ruyigi, Cankuzo, Gitega, Karusi, Muyinga, Ngozi, Kayanza, Muramvya, Mwaro, Bururi.
Communes*	30	38	40	40	Muyinga, Kiremba, Gashikanwa, Tangara, Ruhororo, Rango, Matongo, Muruta, Kabarore, Bukeye, Nyabiraba, Mug. Manga, Mukike, Mugamba, Matana, Rutovu, Songa, Makamba, Rumonge, Gisuru, Kinyinya, Nyabitsinda, Cendajuru, Mishiha, Kayokwe, Ndava, Bisoro, Gisozi, Rusaka, Giheta, Nyabikere, Buhiga, Bugenyuzi, Gihogazi, Bubanza, Mabayi, Mugina, Bukinanyana, Gitega, Mutaho, Buraza, Makebuko, Rugazi
Collines *	89	108	123	94	En général il y a eu 2 campagnes par colline
Bénéficiaires	23 464	27 874	27 264	12 040	90 642 ménages au total
Champs de démonstration	288	Idem	Idem	Idem	Les champs sont restés les mêmes pour suivre l'évolution de pH au cours des saisons
Champs pilotes				188	2 champs pilotes/colline*94 collines
Hectares couvertes	4 499	5768	6 846	3010	20 123 ha au total
Quantité de dolomie (tonnes)	9 946	9 905	12 081	5425	37 357 tonnes au total
Partenaires d'encadrement	9	9	8	9	Twitezimbere, Ucode, Adisco, One acre Fund (Tubura), Inades, Réseau Burundi 2000+, Help Chanel Burundi, Jacaranda, OAP
Entreprises privées de production de la dolomite	4	5	5	6	AB Geoscience, Stone Society, Ese Jérémie, EFCCO, Itracom Fertilizer, Dolo Production Company
Partenaires publics	3	3	3	3	DFS, FABI et ISABU

* Les provinces, communes et collines se réfèrent à l'ancienne subdivision administrative

3.2.1. Contrôle de la qualité physico chimique de la dolomie produite et distribuée aux agriculteurs

Les figures ci-après montrent les résultats d'analyse des échantillons de dolomie pour la saison culturale 2024A. Il s'agit de 10 prélèvements d'un échantillon composite par entreprise à une semaine d'intervalle. Au 10^{ème} prélèvement, la prise d'échantillons n'a été faite pour les producteurs 3 et 4.

3.2.1.1. Résultats d'analyse du pH

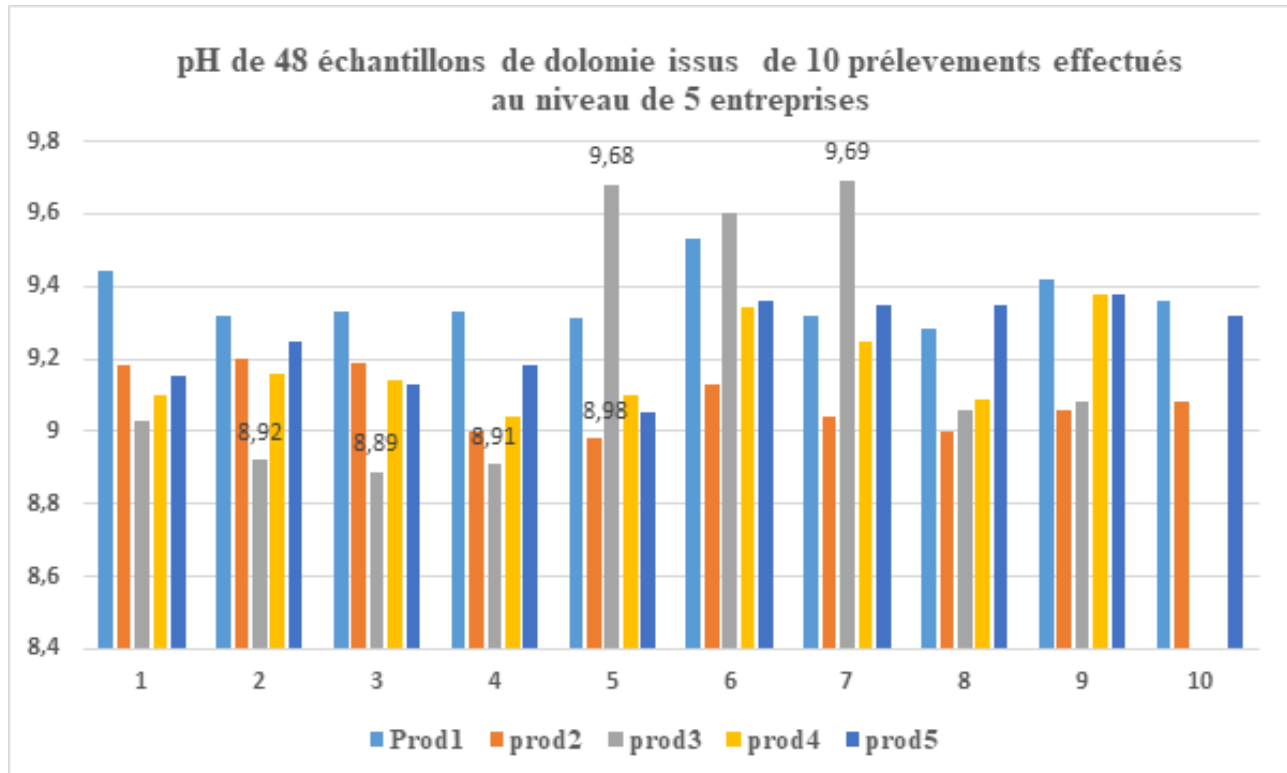


Figure 9. Résultats d'analyse du pH de 48 échantillons de dolomie

Les analyses des échantillons de dolomie montrent que le pH majeure partie de la dolomie produite par les 5 entreprises se situe dans les normes fixés entre 9 et 12. Néanmoins il a été observé des valeurs en dessous de 9 surtout le producteur 3 (3 cas sur 9) et le producteur 2 (1 cas sur 10) mais elles sont très proches du minimum acceptable. Le producteur 3 a une dolomie de très bonne qualité pour le pH.

3.2.1.2. Résultats d'analyse du % de CaO

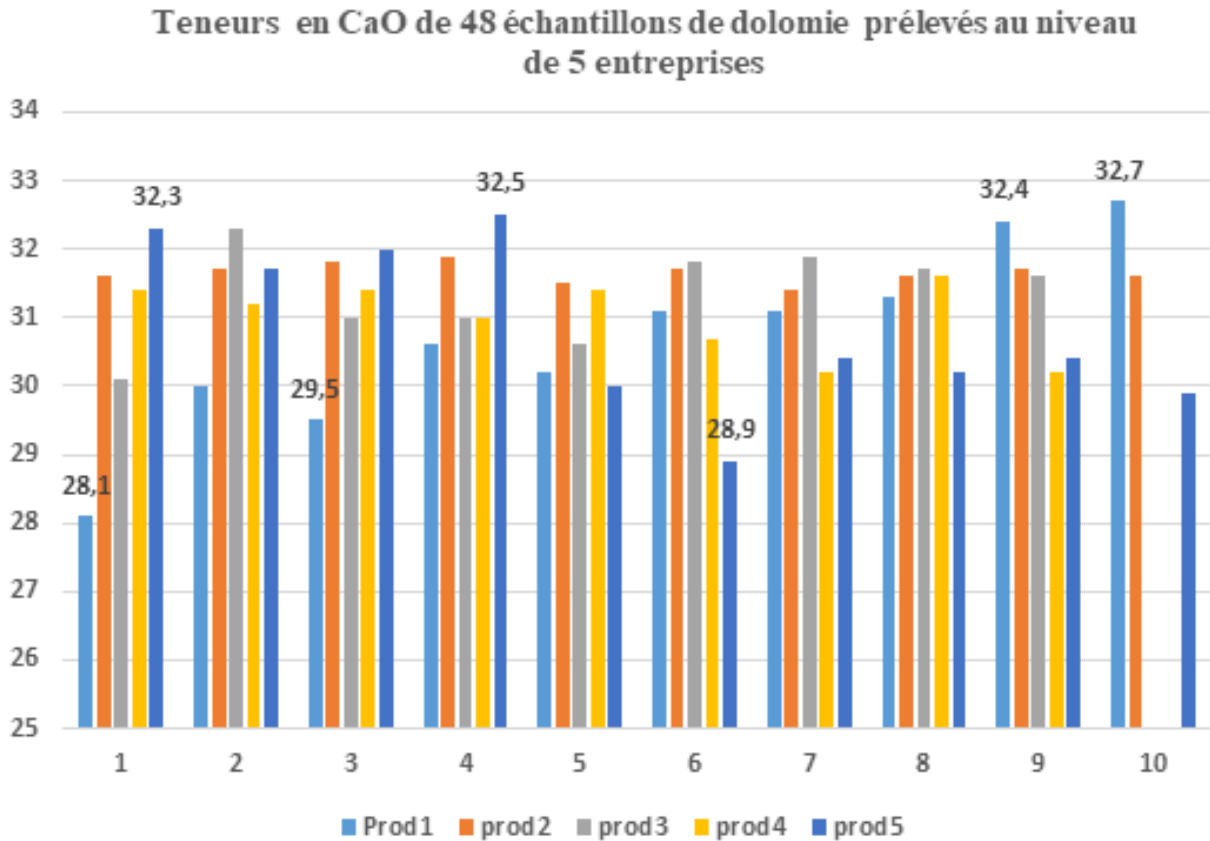


Figure 10. Résultats d'analyse des teneurs de la dolomie en CaO

Les normes étant de 28 à 32% pour le CaO, la dolomie produite par les 5 entrepreneurs est de bonne qualité car 100% des échantillons analysés se situent dans cet intervalle. La valeur maximale mesurée est de 32.7% et celle minimale est 28.1%.

3.2.1.3. Résultats d'analyse du % de MgO

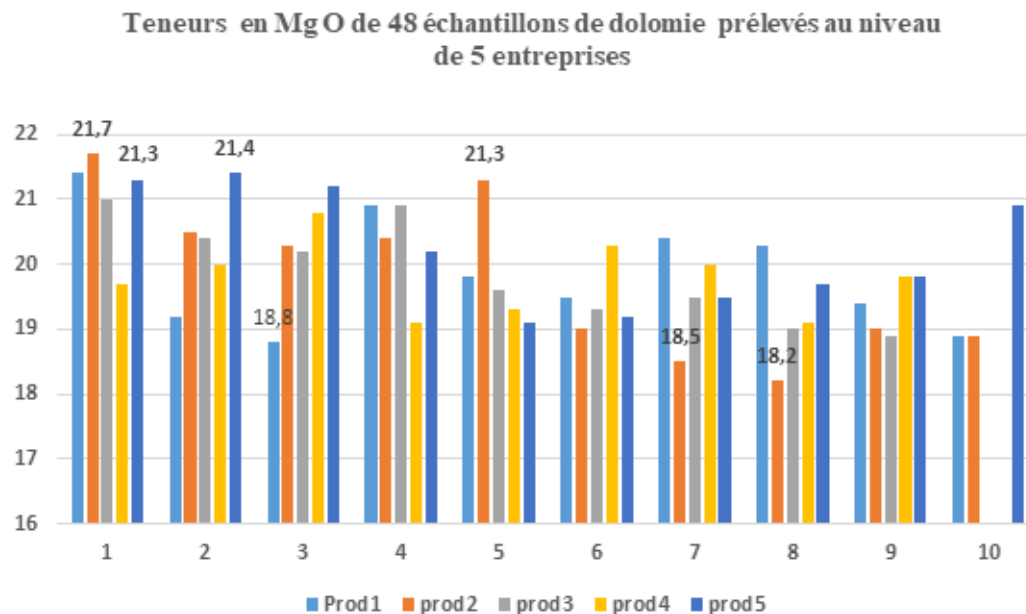


Figure 11. Résultats d'analyse des teneurs de la dolomie en MgO

Sur 48 échantillons analysés; 3 échantillons n'ont pas pu atteindre la valeur optimale fixée entre 19 et 22. La valeur maximale obtenue est 21,7 % MgO.

3.2.1.4. Résultats d'analyse de l'indice de pureté

Indice de pureté (IP) de 48 échantillons de dolomie prélevés au niveau de 5 entreprises

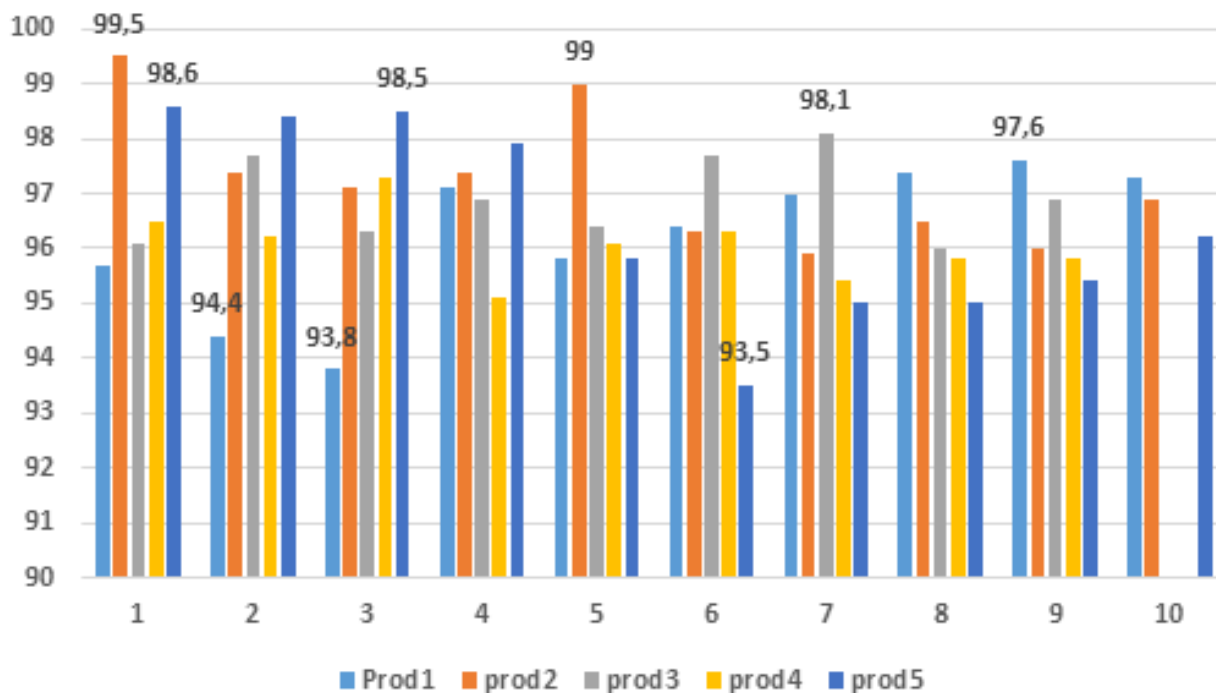


Figure 12. Résultats d'analyse de l'indice de pureté de la dolomie

En se référant aux normes de l'indice de pureté (IP) fixés à 95% au minimum, 3 échantillons sur 48 dont 2 issus du producteur 1 n'ont pas pu atteindre les valeurs optimales.

3.2.1.5. Résultats d'analyse des pertes aux feux

Pertes aux feux de 48 échantillons de dolomie prélevés au niveau de 5 entreprises

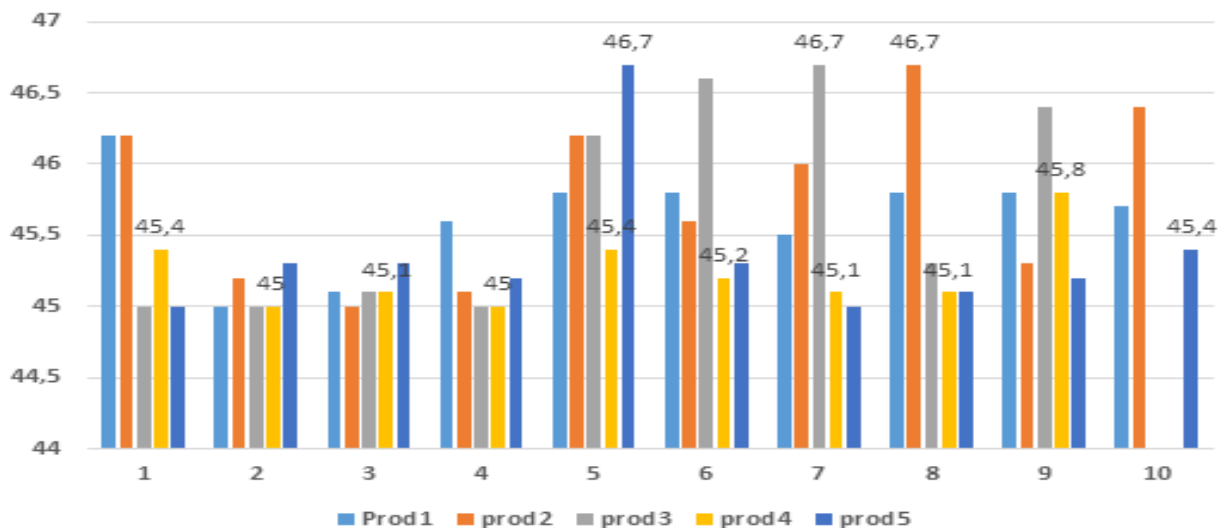


Figure 13. Résultats d'analyse des pertes aux feux de la dolomie

Tous les échantillons analysés atteignent les valeurs optimales de 45 à 47 %.

3.2.1.6. Résultats d'analyse de la granulométrie

Les analyses ont porté sur les diamètres des particules de la dolomie qui passent ou sont retenus sur les tamis de 2 mm et de 1 mm.

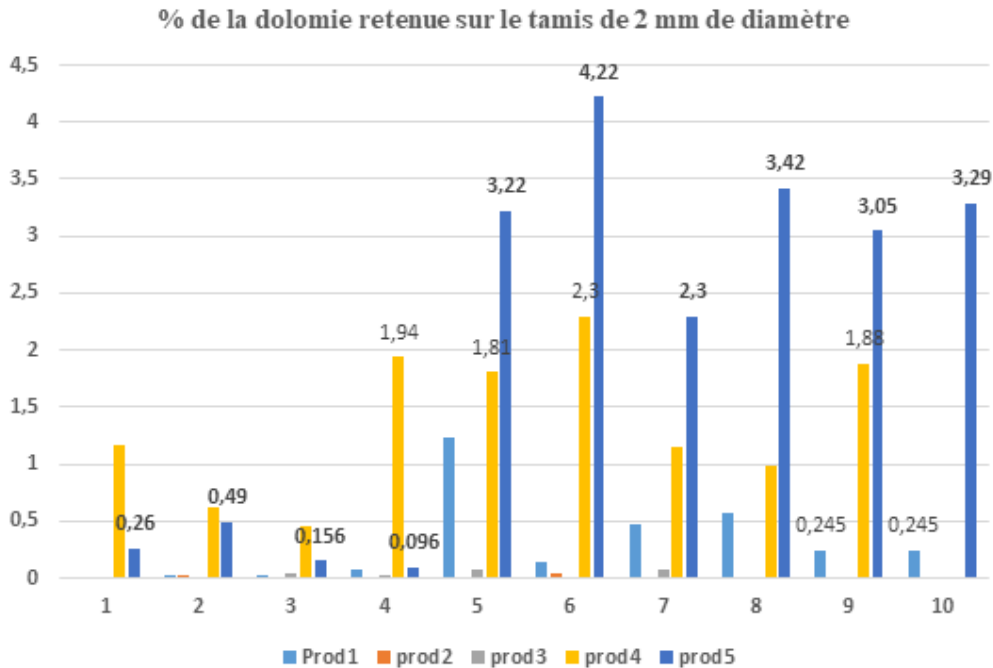


Figure 14. Résultats d'analyse de la granulométrie de la dolomie (particules grossières)

Il est recommandé que 100 % de dolomie passe à travers les tamis de 2 mm, ce qui signifie que 0% devra être retenu par ces tamis car aucune particule ne devrait dépasser 2 mm. Chez 2 producteurs, il a été trouvé des valeurs atteignant 4,22 % de dolomie retenue. Cela montre que ces producteurs ont produit une dolomie très grossière. Les 2 autres producteurs sont dans les normes.

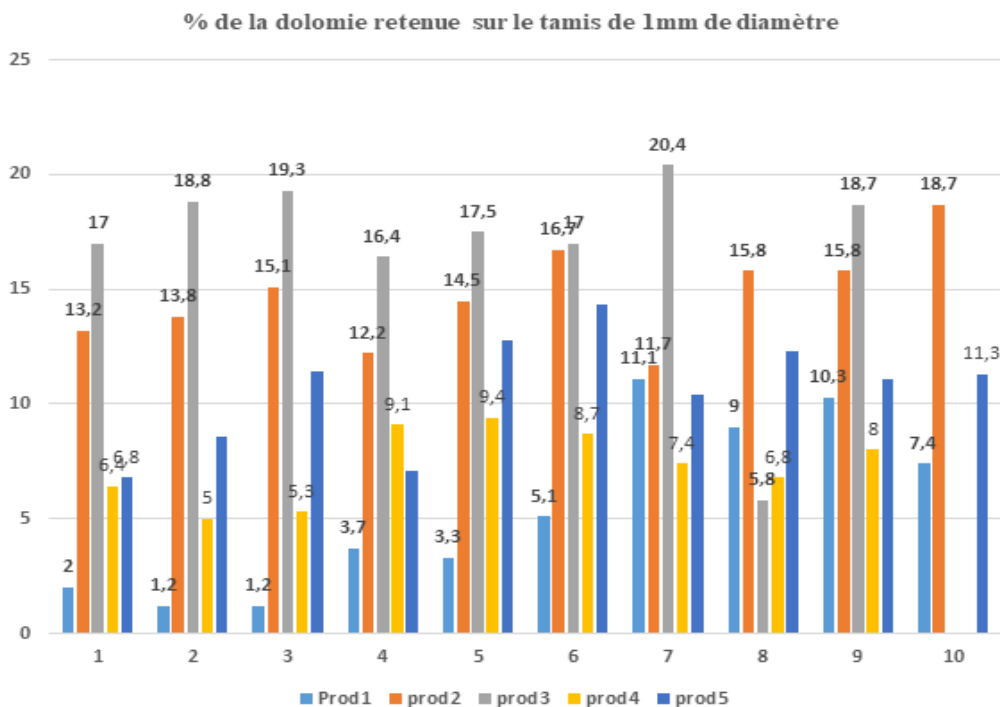


Figure 15. Résultats d'analyse de la granulométrie de la dolomie (particules fines)

L'indice de finesse étant de 80 %, cela traduit que 20 % de dolomie devrait être retenue sur les tamis de 1mm. Cependant, les analyses montrent que 3 entreprises (producteurs 2, 3 et 5) atteignent au moins 15 à 20 % de dolomie retenue sur le tamis, soit une indice de finesse de 80 à 85 %. Pour les 2 autres entreprises (producteur 1 et 4), la dolomie retenue est inférieure à 10 %, soit une dolomie très fine avec un indice de finesse supérieure à 90 %.

3.2.2. Evolution du pH dans les parcelles chaulées et non chaulées

3.2.2.1. Evolution du pH dans les zones de pH initial $\leq 4,5$

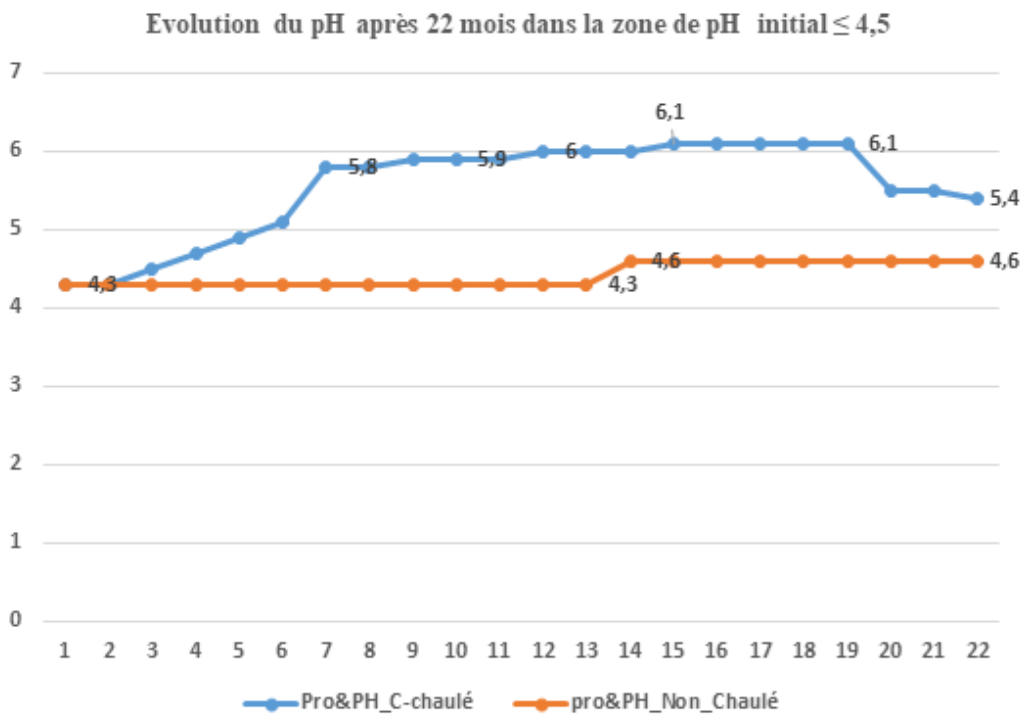


Figure 16. Courbe d'évolution du pH dans les zones de pH $\leq 4,5$

Dans la parcelle non chaulée, le pH initial de 4,3 reste constant jusqu'au 13^{ème} mois. Il remonte jusqu'à 4,6 au 14^{ème} mois puis se stabilise à cette valeur jusqu'au 22^{ème} mois. Dans la parcelle chaulée, la montée de pH est sensible dans les 6 premiers mois car il passe de 4,3 à 5,8 le 7^{ème} mois. Il remonte par la suite progressivement jusqu'à un pic maximal de 6,1 au 15^{ème} mois à partir duquel le pH descend jusqu'à 5,4 le 22^{ème} mois.

3.2.2.2. Evolution de pH dans les zones de pH initial de 4,6 à 5 (Figure 17)

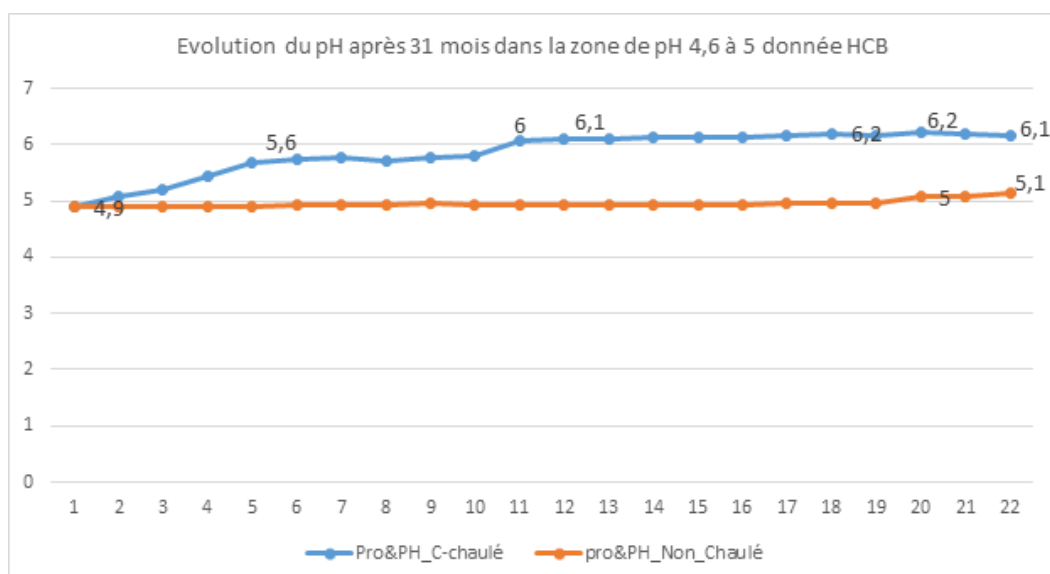


Figure 17. Courbe d'évolution du pH dans les zones de pH 4,6 à 5

Nous constatons une légère augmentation de pH qui passe, après 22 mois, de 4,9 à 5,1 dans la parcelle non chaulée. Dans la parcelle chaulée le pH augmente jusqu'à atteindre une valeur de 6 observée à partir du 11^{ème} mois. Il augmente légèrement jusqu'à 6,2 du 18 au 20^{ème} mois, avant de redescendre à 6.1 au 22^{ème} mois, soit une diminution de 0,1 unités de pH.

3.2.2.3. Evolution de pH dans les zones de pH initial de 5,1 à 5,5 (Figure18)

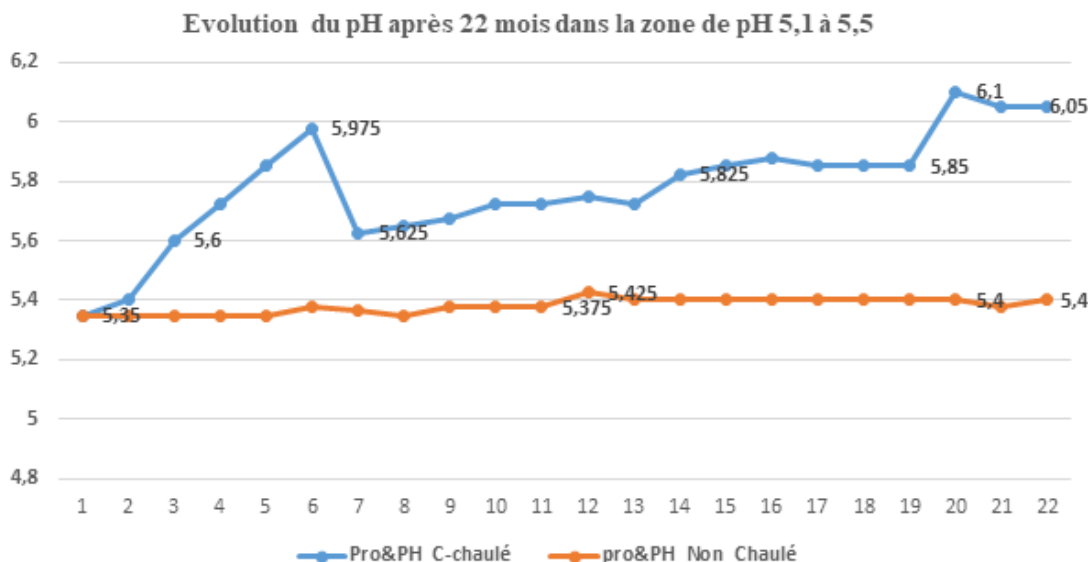


Figure 18. Courbe d'évolution du pH dans les zones de pH 5,1 à 5,5

Le pH de 5,35 reste presque constant dans la parcelle non chaulée et atteint une valeur maximale de 5,4 atteinte autour du 12^{ème} mois. Dans la parcelle chaulée, le pH commence à augmenter à partir du deuxième mois jusqu'à atteindre 6 autour du 6^{ème} mois. Il a été observé une diminution du pH entre le 6^{ème} et 7^{ème} mois jusqu'à 5,6, la raison n'est pas bien connue mais serait due à un problème de mesurage ou de calibrage des pH mètres utilisés sur terrain. Le pH remonte par la suite jusqu'à atteindre 6,1 vers le 20^{ème} mois. Cela étant, le pH commence à diminuer légèrement. Il est de 6,05 au 22^{ème} mois.

3.2.2.4. Evolution des pH dans les zones de pH initial $\geq 5,5$ (Figure19)

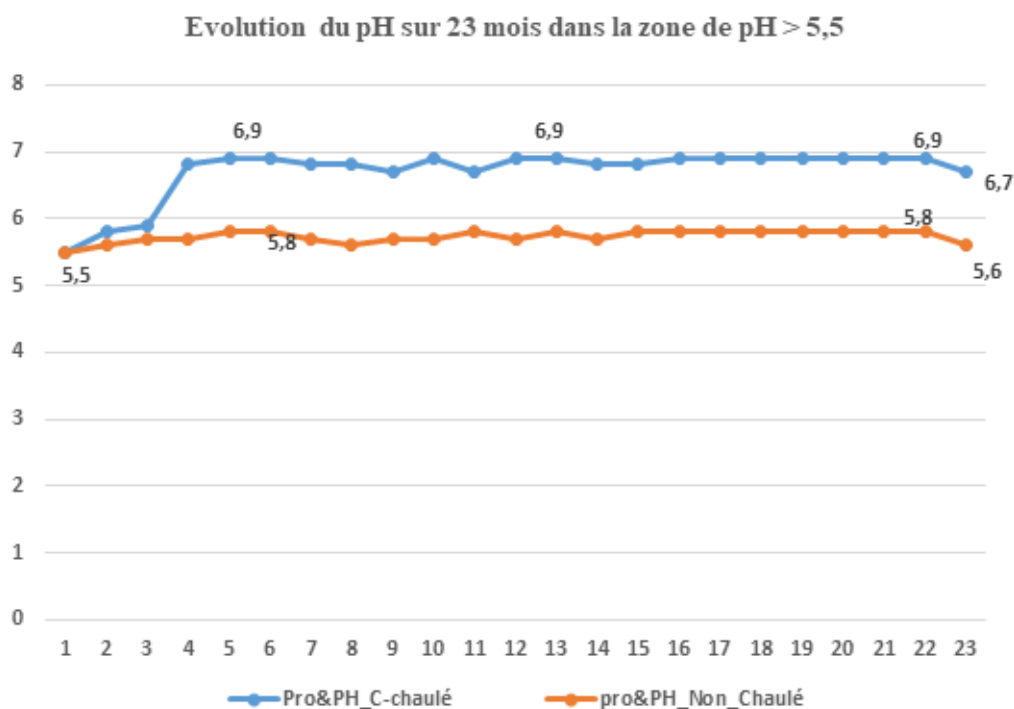


Figure 19. Courbe d'évolution du pH dans les zones de pH $> 5,5$

Dans les parcelles à pH > 5,5 non chaulées, les données sur une période de 23 mois montrent une augmentation de pH dans les 6 premiers mois passant de 5,5 à 5,8. Par la suite le pH se stabilise jusqu'au 22^{ème} mois, à partir duquel il y a une chute de 0,2 unités de pH.

Dans les parcelles chaulées, il est observé une augmentation de pH dès le troisième mois jusqu'à atteindre 6,9 le 6^{ème} mois suivant l'application de la dolomie. Comme pour la parcelle non chaulée, cette valeur se stabilise jusqu'au 22^{ème} mois à partir duquel il commence à chuter.

3.2.3. Les rendements du maïs et du haricot volibule dans les parcelles chaulées et non chaulées, saison culturale 2025A.

Les tableaux 2 et 3 donnent les rendements sur des parcelles chaulées et non chaulées. L'application de la dolomie avait été faite au cours de la saison 2023A.

Tableau 2. Rendements (T/ha) du maïs sur les parcelles chaulées et non chaulées

Parcelle non chaulée	3,71a
Parcelle chaulée	4,45b
Différence des moyennes	0,74
Ecart type des différences	0,53
Valeur t à 4 degré de liberté	3,14
Marge d'erreur (intervalle de confiance de 95%)	0,05
p trouvée	0,035

Les traitements suivis d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de 5 % de probabilité.

Les rendements obtenus au niveau de 5 sites en milieu réel, dans les parcelles chaulées et non chaulées sont significativement différents, avec $p = 0,035$ qui est inférieur à 0,05. La dolomie a permis d'obtenir 740 kg de plus, ce qui représente un gain appréciable pour l'agriculteur.

Tableau 3. Rendement (T/ha) du haricot sur les parcelles chaulées et non chaulées

Parcelle non chaulée	2,03a
Parcelle chaulée	2,79b
Différence des moyennes	0,76
Marge d'erreur (intervalle de confiance de 95%)	0,05
Valeur p	0,00018

Les traitements suivis d'une lettre différente sont significativement différents au seuil de 5 % de probabilité.

Pour la culture de haricot les rendements sont aussi significativement différents, avec une plus-value de 760 kg de haricot dans la parcelle chaulée.

4. DISCUSSION

• Cartographie

Les cartes de 2013 et de 2021 montrent que l'acidité touche la plupart des sols à potentialité agricole. Actuellement 73 % de ces sols nécessitent un chaulage de redressement afin de remonter le pH dans la zone optimale de 6,5 à 7,5 correspondant à l'assimilabilité maximale de la plupart des éléments nutritifs dont les plantes ont besoin pour assurer une bonne production. En cas d'acidité les carences en éléments assimilables concernent tant les éléments majeurs N, P, K, les éléments secondaires comme Ca, Mg, S, que les oligo éléments Zn, Cu, B, etc. D'autres éléments comme Al, Fe et Mn sont toxiques.

L'acidification est très sévère sur la crête Congo Nil, les Plateaux Centraux et les Mirwa. Cependant, elle est moins prononcée dans certaines parties de l'Imbo et des dépressions du Nord l'Est notamment à Kirundo.

• Qualité de la dolomie produite

La dolomie produite par les entrepreneurs privés et utilisée par les agriculteurs est une dolomie de bonne qualité chimique du moins si on se réfère aux paramètres comme le pH, les teneurs en CaO et MgO, le pouvoir neutralisant, les pertes aux feux. La plupart des usines exploitent les sites dolomitiques localisés à Buganda, exceptée ITRACOM dont le site d'extraction des roches est à Rutana. Cela fait que la qualité chimique de la dolomie est presque la même.

Des différences sont observées pour les paramètres physiques comme la granulométrie et l'indice de finesse. Certaines usines produisent de la dolomie très fine que d'autres. Une dolomie très fine à un effet rapide mais de faible durée d'action dans le sol. Celle qui est grossière a des effets lents mais qui s'étalent sur une longue période. L'idéale serait donc de mélanger les 2 types de dolomie tout en restant dans les marges de 70 à 80 % d'indice de finesse.

• Evolution de pH

Dans les parcelles non chaulées, en dépit de quelques cas de diminution ou d'augmentation de pH, le constat est que le pH est resté constant pour la plupart des cas mais en restant dans la zone d'acidité. Cela se justifie par le fait que dans ces parcelles l'utilisation du fumier et des autres bonnes pratiques dont la protection des sols contre l'érosion, ont permis de limiter l'acidification sans pour autant parvenir à la neutraliser car les pH sont restés bas. Dans les parcelles chaulées, il est observé partout une augmentation sensible de pH dans les 6 mois suivant l'application de la dolomie. La valeur maximale de pH est obtenue à des périodes variables pouvant atteindre 12 mois selon le pH initial, le type de sol et la granulométrie de la dolomie.

Après une longue période de stabilisation, le pH commence à diminuer légèrement à partir du 20^{ème} mois. Au 22^{ème} mois, il est approximativement de 6, avec tendance de continuer à diminuer au fur et à mesure des mois suivants. Une application de la dose d'entretien de 500 à 600 kg de dolomie serait à recommander pour éviter de retomber vers l'acidité.

• Rendement des cultures

Les rendements obtenus à la saison culturale 2025A dans les parcelles chaulées en 2023A sont meilleurs que ceux obtenus dans les parcelles non chaulées. Malgré la non-disponibilité des engrais au moment opportun et les difficultés d'accéder aux semences de bonne qualité, des augmentations de rendement de 20 et 37% ont été obtenus respectivement pour la maïs et le haricot. Cela traduit les bienfaits de l'arrière-effet de la dolomie.

L'amendement calco-magnésien a permis d'améliorer la disponibilité et l'assimilabilité des principaux éléments nutritifs dont les plantes ont besoin. Elle a aussi amélioré les propriétés physico chimiques des sols et la vie microbienne dans le sol. Tous ces facteurs combinés entraînent des augmentations des rendements des cultures et des revenus des ménages.

5. CONCLUSION

La problématique de la l'acidification des sols n'est pas isolée mais concerne tout le territoire national. Cela compromet la productivité des terres malgré les efforts investis dans les fertilisants et les semences. La dolomie produite au Burundi est de bonne qualité, corrige l'acidité des sols et permet d'avoir de bons rendements. Des mesures sont à prendre en considération dans le respect des normes de qualité et en vue de sa bonne utilisation surtout pas comme un intrant isolé mais plutôt comme faisant partie du paquet technologique de gestion intégré de la fertilité des sols recommandant la combinaison optimale de la dolomie, de la matière organique, des fertilisants, la bonne semence et l'ensemble de bonnes pratiques culturales.

Les cartes produites sont des outils à prendre en considération lors des recommandations sur la mise en place des stratégies de correction de l'acidité des sols

6. RECOMMANDATIONS

En vue d'améliorer la filière dolomie des recommandations sont formulées. Il s'agit de : i) Sensibiliser les agriculteurs sur la problématique d'acidité des sols et sur l'utilisation de la dolomie comme solution. Cela va augmenter le niveau d'utilisation de la dolomie, stimuler la demande et motiver les entrepreneurs à investir dans cette filière. Dans le même sens, il faudra encourager les agriculteurs à faire analyser les sols de leur exploitations pour connaître le niveau d'acidité et de fertilité : ii) Augmenter la production de la dolomie par amélioration des conditions de travail des usines de production de la dolomie telles que l'accès au carburant : iii) Rendre la dolomie disponible et accessible pour les agriculteurs. Cela suppose l'amélioration de la capacité d'achat des agriculteurs, la subvention de la dolomie et sa disponibilisation en tenant compte qu'elle est appliquée avant le semis. Il faudrait donc décaler sa livraison de celle des engrais qui, quant à eux, sont appliqués au moment du semis. iv) veiller au contrôle de la qualité de la dolomie pour garantir que la dolomie achetée et livrée aux agriculteurs soit de bonne qualité physicochimique v) Impliquer les partenaires techniques et financiers dans la mobilisation des fonds vi) Poursuivre la recherche pour une efficacité agronomique et économique de la dolomie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. Boyer, J., 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales et humides et subhumides. 173 pages.
2. Brady, N.C. 1990. The nature and properties of soils. Tenth Edition. Macmillan publishing company. New York. 621P.
3. Carter M.R. and Gregorich E.G. (Eds). 2006. Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd Edition. Canadian Society of Soil Science. CRC Press. Taylor & Francis Group
4. Cochrane., J.P. Salinas, and P.A. Sanchez. 1980. "An equation for liming acid mineral soils to compensate for crop tolerance". Trop. Agric. (Trinidad) 57: 133-140.
5. Crawford Jr, T.W., U. Singh and Henk Breman. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa Great Lakes Region. An IFDC Catalist Project Report. 138p. Kigali, Rwanda.
6. De Keyser, S. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de correction (p.58-80). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi, Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310p.
7. Doucet, R., 2006. Le climat et les sols agricoles. Ed. Berger. Eastman, Québec. XV.443 pages
8. Duhaufour, Ph., 1983. Pédogenèse et Classification, 2^{ème} Edition. MASSON, 1983. 491 pages
9. Gourdin, J. et E. Tessens, 1979, Étude du pouvoir tampon des sols du Burundi. ISABU, Burundi, 1979.
10. Hassett, J.J. and W.L. Banwart. 1992. Soil and Environment. Prentice Hall. New Jersey. 424p.
11. ISABU/IFDC. 2021. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi, 191 pages
12. IFDC-CATALIST. 2010. Gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) ; Fiche technique sur l'acidité des sols. Kigali, Rwanda
13. McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and organic matter. Nutrient management module, 8(2), 1-12.
14. Ndayishimiye, D. 2007. Effets comparatifs de trois amendements calco-magnésiens sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du Mugamba (Gisozi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
15. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, Hicintuka et M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110p.
16. Nicoullaud, B., King, Dorigny, A., Variabilité des sols et techniques de cartographie détaillée. INRA-Orléans, Science du sol-SESCPF
17. Ntiburumusi, F., 1988. Arrière-Effet du chaulage sur la productivité d'un kaolisols humifère dans la région naturelle du Mugamba, Publication ISABU
18. Pellet M. et Laville-Timsit L. 1993. Echantillonnage de sols pour caractérisation d'une pollution : Guide méthodologique. Rapport BRGM sur crédits du Ministère de l'Environnement.
19. Rapport des résultats préliminaires du Recensement Général de la Population, de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage du Burundi : RGP/HAÉ, Déc2024
20. Sebahene, M. 1991. Les ressources en calcaire du Burundi (p.113-118). Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 décembre 1991. p.310.
21. Sottiaux, G. et al, Carte des sols du Burundi, Echelle 1/250 000. ISABU. Département aménagement du milieu, 142 pages
22. Tessens E et Gourdin J. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche de labo N° 19. Bujumbura, 27p.
23. Yamoah., J.R. Burleigh, and M.R. Malcom. 1990. " Application of Expert Systems to the study of Acid soils in Rwanda." Agric. Ecosystems Environ. 30: 203-218.

Détermination de la dose de dolomie et du type de fumure organique efficaces pour la correction de la forte acidité des sols du Burundi

Ntiyantetereje Joël², Nizigiyimana Désiré², Séverin Nijimbere^{1*}, Salvator Kaboneka¹, Birayi Gordien¹, Ira-koze Melchior¹, Oscar Nduwimana³ et Micael Beun³

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie. Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. BP 2700 Bujumbura, Burundi. BP 2700 Bujumbura, Burundi.

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: séverin.nijimbere@ub.edu.bi

Résumé

Cette étude avait pour but d'identifier le couple dose de dolomie - type de matière organique qui améliorerait mieux les propriétés d'un ferralsol fortement acide (pH de 4,8, taux de saturation en bases et en aluminium de 23,8% et 56,5%, respectivement du Kirimiro au Burundi après quatre saisons culturales successives s'étendant sur 2 années civiles. Trois modalités de dose de dolomie (0, 2 et 4 T/ha) et quatre modalités de types de fumure organique (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*) ont été utilisés, faisant en tout 15 traitements répétés trois fois. La chaux a été appliquée dans les traitements en une seule fois au début de la première saison culturale, tandis que les fumures organiques étaient appliquées à chacune des opérations de semis de chaque culture. Après les quatre saisons culturales, les résultats d'analyses des sols des parcelles expérimentales montrent que les doses de 2 et 4 T/ha de dolomie combinées à chacune des fumures organiques utilisées augmente le pH jusqu'aux valeurs supérieures ou égales à 5,5. En même temps, ces doses diminuent le taux de saturation en Aluminium aux valeurs de moins de 17% et augmentent le taux de saturation en bases à plus de 66%. Par ailleurs, les traitements aux fumiers de vache et de chèvre sans dolomie affichent les mêmes effets que les traitements de 2 T/ha combinés aux fumures organiques. Cependant, les teneurs en éléments nutritifs azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium sont restées faibles à très faibles malgré les remontées de pH et les engrais chimiques appliquées pour chaque culture. En conclusion, la dose de 2 T/ha, déterminée avec l'usage de la formule de Yamoah et al. (1990), corrige efficacement la forte acidité des ferralsols du Kirimiro, tandis que les fumiers de vache et de chèvre exercent un effet chaulant considérable.

Mots clés : Acidité du sol, chaulage, fumure organique, doses, paramètres physico-chimiques du sol.



Abstract

The study aimed at identifying the couple dolomitic application rate – type of organic manure which could significantly improve physico-chemical properties of a highly acidic ferralsol (pH=4,8; % basic cations=23,8; % Al saturation=56,58) of Kirimiro Burundi after 4 successive cropping seasons extending to 2 years. Three lime application rates (0, 2 and 4 T/ha) and 4 types of organic manures (cow manure, goat manure, *Tithonia diversifolia* and *Lantana camara* composts) were utilized, making a total of 15 treatments (including the control) replicated three times. Lime was applied once at the beginning of the study, while organic fertilizers were applied at each cropping season. At the completion of the four cultural seasons, obtained results show that the application of 2 and 4 T/ha of lime in combination with each organic fertilizer significantly increased soil pH to values superior or equal to 5,5. At the same time, the same application rates decreased % Al saturation to less than 17 %, and increased base saturation to over 66 %. Moreover, treatments with cow and goat manure without lime application behave similarly as treatments with 2 T/ha of dolomitic lime combined with organic fertilizers. Nevertheless, concentrations of soil nutrients (N, P, K, Ca, Mg) remained low or very low, despite the increase in pH and organo-mineral fertilizers applied to tested crops. In conclusion, 2 T/ha of dolomitic application rate, as calculated/determined by Yamoah et al. (1990) formula efficiently correct the high acidity of ferrasols of Kirimiro-Burundi; whereas cow and goat manures contribute themselves a noticeable liming effect.

Keywords : Soil acidity, liming, organic matter, dose, soil physico-chemical parameters



1. INTRODUCTION

L'acidification du sol est un processus de dégradation du sol qui induit une série de contraintes à la croissance des plantes et qui affecte les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Elle a entre autres conséquences (i) l'indisponibilité des éléments nutritifs (le pH optimal pour la plupart des cultures est de 5,5 à 7), (ii) la toxicité des métaux et leur solubilité, par exemple toxicité de l'Al à un pH <5,5 (également solubilité et toxicité du Mn), (iii) 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.

Selon une étude récente menée par IFDC et ISABU (Musonerimana et al., 2025), environ 73% de la superficie des terres arables du Burundi sont fortement acide à très fortement acide (pH<5,5). Cette étude a également montré que les proportions de terres arables burundaises accusant des teneurs faibles à très faibles en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium sont de l'ordre de 35% pour l'azote total, 99% pour le phosphore assimilable, 52% pour le potassium échangeable, 46% pour le calcium échangeable et 30% pour le Mg échangeable. Par ailleurs, une autre étude menée en 2013 par ces mêmes institutions (Nduwimana et al., 2013) avait mentionné des teneurs faibles à très faibles qui touchent 71% de la superficie cultivables pour le soufre, 62% pour le zinc et presque 100% pour le bore.

De plus, ces sols sont caractérisés sur la grande superficie par des teneurs toxiques en aluminium et un faible pouvoir de rétention des nutriments (faible Capacité d'Echange Cationique). Les solutions envisageables pour une gestion durable de ces sols sont basées sur les usages simultanés de la chaux dolomitique, de la fumure organique et des engrais minéraux ou organo-minéraux.

Pour la correction de l'acidité des sols au Burundi, l'application d'une dose de 2 t/ha de la chaux dolomitique est recommandée par les services de vulgarisation pour la gestion des sols acides quel que soit le degré d'acidité. De même, on ne connaît pas exactement à partir de quand il faut réappliquer la dolomie. De plus, on ne connaît pas dans quelle mesure la matière organique appliquée en combinaison avec la chaux peut amplifier l'effet sur les propriétés du sol en général et sur le pH en particulier. On ne connaît pas non plus les effets interactifs de la dolomie et des fumures organiques sur le rendement des cultures.

Pour tenter de répondre à ces questions, un essai expérimental a été conduit par des chercheurs de la FABI sur un sol acide du campus Zege (pH initial de 4,82) de janvier 2023 à avril 2025. L'étude était financée par le projet PAGRIS de l'IFDC. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les effets interactifs de la dolomie et des amendements organiques sur les propriétés du sol extrêmement acide du Burundi et sur le rendement des cultures. Spécifiquement, l'étude a visé l'identification d'un type de fumure organique qui permet d'améliorer les propriétés du sol et/ou le rendement des cultures de haricot de maïs, la détermination de la dose optimale de chaux dolomitique à recommander à court et à long terme pour la correction de l'extrême acidité observée dans les sols d'altitude du Burundi, et enfin la détermination de la meilleure combinaison de matière organique et de la dose de la dolomie qui permet d'améliorer les propriétés du sol et/ou le rendement des cultures (haricot et maïs en rotation).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Caractéristiques de la zone d'étude

Le site expérimental de cette étude est un champ de la ferme didactique de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi (UB), localisée sur la sous-colline Zege, colline Rukoba en commune Gitega de la province Gitega dans la région agroécologique de Kirimiro. La région de Kirimiro connaît un climat tropical humide. C'est un climat doux avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 1040 et 1400mm et une température moyenne annuelle de 19,6°C. Les coordonnées géographiques de ce site sont 3°24'82" S et 29°55'20,42" E en DMS (degrés, minutes, secondes). Ce site a été choisi son sol est connue pour sa forte acidité et son appartenance au groupe des ferralsols, le groupe le plus représenté dans la région de Kirimiro et au Burundi. La valeur du pH du site expérimental de 4,8, analysée avant la conduite de l'essai, montre que c'est un sol fortement acide selon Motsara et Roy (2008) ; c'est-à-dire un sol dont le pH est compris entre 4,6 et 5,5. Nombreux chercheurs ont montré que les sols ayant un pH pareil accuse une toxicité aluminique et excès de Co, Cu, Fe, Mn, Zn et déficience en Ca, K, N, Mg, Mo, P, S et B (Buol et al., 1980, Landon, 1991).

2.2. Démarche méthodologique et expérimentale

L'étude a commencé en janvier 2023 et a été terminée en mars 2025. Elle a été conduite par une mise en culture du haricot et du maïs en rotation pendant les saisons culturales 2023B, 2024A, 2025B et 2025A. Un échantillon composite de surface du sol (0-20 cm) de tout le site a été prélevé et analysé au début de l'essai en janvier 2023, tandis que les échantillons composites de surface des sols des parcelles expérimentales ont été prélevés et analysés à la fin de l'essai en mars 2025. Les résultats de ces dernières analyses ont permis d'identifier la dose de dolomie et le type de fumure organique les plus efficaces pour corriger l'acidité du sol du site.

2.2.1. Dispositif expérimental

Le plan expérimental était le dispositif en blocs aléatoires complets comprenant 3 blocs et trois répétitions pour chaque traitement (Figure 1). Chaque traitement correspondait à une parcelle expérimentale 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 3 m. La délimitation de ces parcelles expérimentales a été réalisée en dates du 03 au 05 janvier 2023.

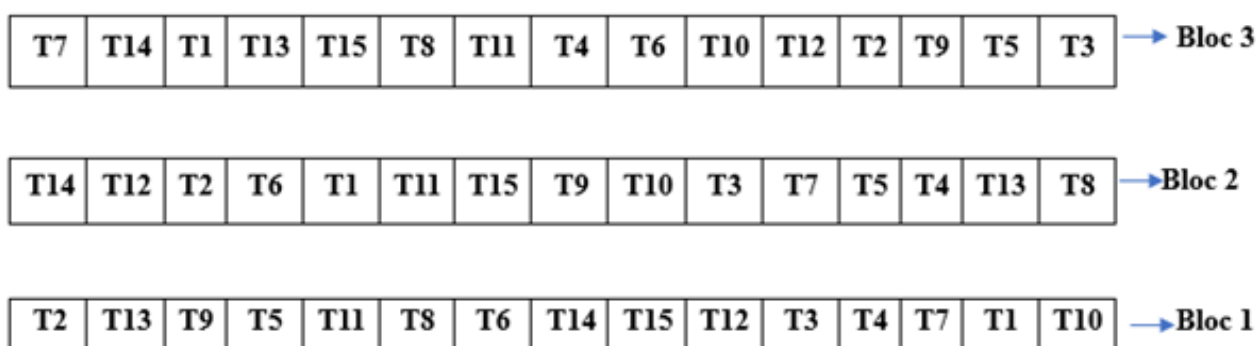


Figure 1. Dispositif expérimental utilisé

Le traitement consistait en une combinaison factorielle de cinq modalités de types de matières organiques (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*) et de trois modalités de dose de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) faisant en tout 15 traitements suivants :

1. T1 (TE-D0) : Témoin (0 T/ha de fumure organique + 0 T/ha de chaux),
2. T2 (FV-D0) : 10 T/ha de fumier de vache + 0 T/ha de chaux,
3. T3 (FC-D0) : 10 T/ha de fumier de chèvre + 0 T/ha de chaux,
4. T4 (TD-D0) : 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 0 T/ha de chaux
5. T5 (LC-D0) : 10 T/ha de compost de *Lantana camara* + 0 T/ha de chaux
6. T6 (TE-D2) : Témoin (0 T/ha de fumure organique + 2 T/ha de chaux),
7. T7 (FV-D2) : 10 T/ha de fumier de vache + 2 T/ha de chaux,
8. T8 (FC-D2) : 10 T/ha de fumier de chèvre + 2 T/ha de chaux,
9. T9 (TD-D2) : 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 2 T/ha de chaux
10. T10 (LC-D2) : 10 T/ha de compost de *Lantana camara* + 2 T/ha de chaux
11. T11 (TE-D4) : Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de chaux),
12. T12 (FV-D4) : 10 T/ha de fumier de vache + 4 T/ha de chaux,
13. T13 (FC-D4) : 10 T/ha de fumier de chèvre + 4 T/ha de chaux,
14. T14 (TD-D4) : 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia* + 4 T/ha de chaux
15. T15 (LC-D4) : 10 T/ha de compost de *Lantana camara* + 4 T/ha de chaux

La dolomie a été appliquée à une seule date, à trois semaines avant le semis de la première culture, celle du haricot. 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 réalisée par l'épandage sur toute la surface de la parcelle en commençant par ses bordures et ensuite en appliquant la chaux de manière homogène à l'intérieur.

La dose de dolomie de 2 T/ha fait référence à celle fixée par l'usage de la formule Yamoah et al. (1990) reprise ci-après :

$$BC = 16,0 - 2,87pH$$

Où BC est la quantité de chaux requise en tonne de $CaCO_3$ par ha.

Pour accélérer les effets de la chaux, nous avons dû ajouter des traitements avec la dose double de celle obtenue avec la susdite formule, c'est-à-dire 4 T/ha de dolomie, tout espérant que cette dose neutraliserait complètement l'extrême acidité du sol.

La dose de 10 T/ha de fumure organique fraîche (fumier de vache ou de chèvres et composts de *Tithonia diversifolia* ou de *Lantana camara*) qui a été retenue dans cette étude fait référence à la dose recommandée par les services de vulgarisation.

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. Ces différentes fumures ont été appliquées dans les poquets, juste avant le semis.

2.2.2. Conduite de la récolte du haricot

Le haricot a été cultivé pendant les saisons culturales 2023B et 2024B. Le semis a été réalisé en suivant 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. Pour tous les traitements, une même dose d'engrais organo-minéraux (FOMI) a été appliquée dans les poquets à chaque saison culturale : celle de 200 kg de FOMI-Imbura (correspondant au 18 N, 44 P_2O_5 , 8 K_2O , 26 CaO et 4 MgO). L'entretien consistait en deux passages de sarclage manuel à l'aide des houx.

2.2.3. Conduite de la culture du maïs

La culture du maïs a été conduite au cours des deux saisons cultures 2024A et 20225A. Les semences de maïs utilisées étaient la variété composite MZ605-24 achetées à l'ISABU. Cette variété, originaire de CIMMYT Zimbabwe, a été diffusée au Burundi par l'ISABU en 2015.

Les opérations de semis commençaient par le creusement des poquets de 5 cm. Elles se poursuivaient par l'application du fumier ou du compost à la dose de 10 t/ha dans les traitements concernés, puis par l'application d'engrais organo-minéraux dans tous les poquets en raison de 270 kg/ha de FOMI – Imbura, puis par le dépôt de trois graines par poquets, et enfin le remplissage du poquet avec du sol. Les opérations d'entretien du maïs réalisées étaient le sarclo-bunage et le sarclo-buttage effectuées respectivement à 30 jours et à 60 jours après le semis. Chacune de ces deux opérations était accompagnée par l'application de l'engrais FOMI-Totahaza à la dose de 50 kg/ha.

2.2.4. Echantillonnage de sols et prétraitement des échantillons de sol

Juste avant l'installation de l'essai en janvier 2023, un échantillon composite constitué de huit échantillons élémentaires de surface (20 cm supérieurs) a été collecté pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques initiales du site.

Après les quatre saisons culturales (de 2023A à 2025A), des échantillons composites de surface ont été collectés dans tous les 45 parcelles expérimentales de l'étude pour évaluer les effets des traitements sur les propriétés physico-chimiques du sol. Les analyses de ces échantillons ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU).

Les analyses de l'échantillon de départ et des échantillons des sols issus des 45 parcelles ont porté sur la granulométrie (pour l'échantillon de départ seulement), le pH (pH H₂O et pH KCl), la conductivité électrique, azote total, le carbone organique, le phosphore assimilable, la CEC, les bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) et l'acidité d'échange (Al³⁺, H⁺).

Les méthodes d'analyse sont celles d'usage dans ce laboratoire. L'analyse granulométrique a été menée, après destruction des matières organique et des oxydes et des carbonates, par l'élimination des argiles par sédimentation et la séparation des limons et des sables par filtration. Le pH et la conductivité électrique ont été analysés dans les suspensions de sol au rapport sol/eau de 1/5. Le carbone organique a été dosée par la oxydation sulfochromique et dosage volumétrique, l'azote total par la méthode Kjeldahl modifiée, le phosphore assimilable par la méthode d'Olsen, les bases (Na, K, Ca, Mg) par extraction par agitation ou par percolation à l'acétate d'ammonium et dosage par SAA/flamme, la CEC par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7, l'acidité d'échange par méthode volumétrique après l'extraction avec KCl

2.2.5. Traitement statistique des données

Les données relatives à la croissance et au rendement du haricot et du maïs ont été saisies avec MS-Excel. Ensuite, la comparaison des moyennes a été réalisée par une analyse de la variance à un seul facteur (ANOVA 1). En cas de résultat significatif ($p < 0,05$), les comparaisons des traitements par paires étaient réalisées en recourant au test de Tukey HSD. Toutes ces analyses étaient faites en utilisant le logiciel R (R Core Team, 2021).

3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques du sol du site d'essai

Le sol du site de Zege est un ferralsol de texture argileuse, ayant les caractéristiques physico-chimiques suivantes (Tableau 1) :

1. Une texture argileuse, comme montrée à la Figure 1 (triangle textural du département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA) constituée en recourant au logiciel TALWIN mis au point par Christopher et Mokhtaruddin (1996),
2. Un sol fortement acide Motsara et Roy (2008) ($4,6 < \text{pH} < 5,5$),
3. une teneur normale en matière organique selon Tessens et Gourdins (1993), c'est-à-dire un pourcentage en carbone organique comprise entre 1 et 3,68%
4. une teneur faible en azote (teneur comprise entre 0,1 et 0,2% selon (Landon, 1991, Tessens et Gourdin, 1993)
5. Une teneur tellement faible en phosphore qu'elle est indétectable par les appareils de laboratoire.
6. Une teneur faible en Ca selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) (comprise entre 0,2 et 4,0 cmolc/kg),
7. Une teneur moyenne en Mg selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) (comprise entre 0,2 et 0,5 cmolc/kg),
8. Une teneur faible à très faible en K selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) ($< 0,2$ cmolc/kg)
9. Une capacité d'échange cationique effective, calculée par la somme des teneurs de tous les cations échangeables, de très faible (de 2,53 cmolc/kg) ; indiquant un faible pouvoir de rétention des nutriments par ce sol.
10. Une capacité d'échange cationique mesurée avec la méthode Metson (à acétate d'ammonium à pH 7)

qui est de loin plus élevée que la capacité d'échange cationique effective (CECE) (CEC de 7,13 cmolc/kg et CECE de 2,53 cmolc/kg). Cette grande différence entre les deux paramètres justifie que le sol du site expérimentale regorge des constituants dominés par les charges variables dont la quantité de charges négatives augmentent avec l'augmentation du pH ;

11. Une grande saturation du complexe d'échange par l'aluminium ; valeur du taux de saturation de 56,50 % calculée par la formule de calcul de m (%) = Al éch *100/CECE
12. Une désaturation très poussée en bases (Ca, Mg, K et Na), matérialisée par un taux de saturation en bases de 23,79%.

En tenant compte de ses caractéristiques ci-haut montrées, on conclut grosso modo que le sol du site d'essai de Zege est un sol fortement acide, très désaturé en bases et très concentré en aluminium et à très faible fertilité chimique. Des solutions pour récupérer ce sol pour l'agriculture sont les actions combinées de chaulage, d'application de la matière organique et de fertilisation chimique.

Le chaulage permettra d'augmenter le pH, de neutraliser l'aluminium échangeable et d'en augmenter la CEC. L'enrichissement en matière organique permettra d'augmenter la CEC de ce sol et d'optimiser les effets des engrais chimiques.

Tableau 1. Paramètres physico-chimiques du sol d'expérimentation

pH-H ₂ O (1/5)	PH-KCl (1/5)	CE (µS/cm)	CO (%)	N (%)	P-Olsen (mg/kg)	CEC (Méthode Metson) et Cations échangeables (cmolc. kg ⁻¹)							Granulométrie		
						CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
4,8	4,13	24,5	1,43	0,131	0	7,13	0,214	0,274	0,079	0,035	1,43	0,499	65,7	8,75	25,55

3.2. Composition chimique des fumures organiques utilisées

La composition chimique des composts utilisés pour l'essai est montrée au Tableau 2. En analysant ces résultats, nous remarquons que seules les teneurs en azote des fumiers de vache et de chèvre sont suffisantes pour la production agricole. Selon Baker (1997), pour qu'un fertilisant organique soit qualifié de bonne qualité pour la fertilisation des cultures, il faut que sa teneur en azote total soit supérieure à 1%.

Le rapport C/N des fumures organiques utilisées dans cet essai, sauf le compost de *Tithonia diversifolia*, est compris entre 10 et 15. D'après Namkoong et al. (1999), ces trois fumures sont matures, tandis que le compost de *Tithonia diversifolia* est instable et à faible dose de composés humifères puisqu'ils présentent des valeurs de C/N inférieures à 10 (Tahraoui, 2016).

De même, les trois fumures (fumiers de vache et de chèvre et compost de *Lantana camara*) contiennent des teneurs en potassium suffisantes à largement suffisantes puisqu'elles se situent dans ou au-delà de l'optimum de 0,4 et 1% M.S, recommandé par la FAO et l'AFNOR (Toundou, 2016).

Tableau 2. Caractéristiques chimiques des fumures organiques utilisées dans l'essai de Zege

Type de fumure	pH	CE (µS/cm)	CO (%)	N (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)
Fumier de vache	8,76	8120	19,1	1,87	1,42	1,14	3,15	0,083
Fumier de chèvre	9,43	10850	29,1	2,53	2,75	1,663	5,14	0,243
Compost de <i>Tithonia diversifolia</i>	7,69	1591	2,09	0,324	0,322	0,1341	0,464	0,013
Compost de <i>Lantana camara</i>	7,34	733	6,63	0,640	0,341	0,1710	0,270	0,014

3.3. Effets de la dolomie et des matières organiques sur les propriétés du sol

3.3.1. Effets sur le pH

Après les quatre saisons culturales, le pH des sols des parcelles expérimentales ont tous augmenté (Figure 2). Ces augmentations sont proportionnelles aux doses de dolomie appliquées pour tous les types de fumures utilisés. Les accroissements les plus élevés de pH sont observés dans les parcelles chaulées avec 4 T/ha de dolomie alors que les plus faibles sont notées dans les parcelles non chaulées. Une constatation étonnante est que même les parcelles témoins (sans dolomie ni fumure organique) ont connu des augmentations de pH par rapport au pH d'origine (4,8), un possible effet chaulant des engrais FOMI appliqués sur les cultures de haricot et de maïs.

Quant aux types de fumures organiques, on remarque que les fumiers de chèvre et de vache combinés à 2 T/ha de dolomie n'ont pas d'effets différents des doses de 4 T/ha de dolomie.

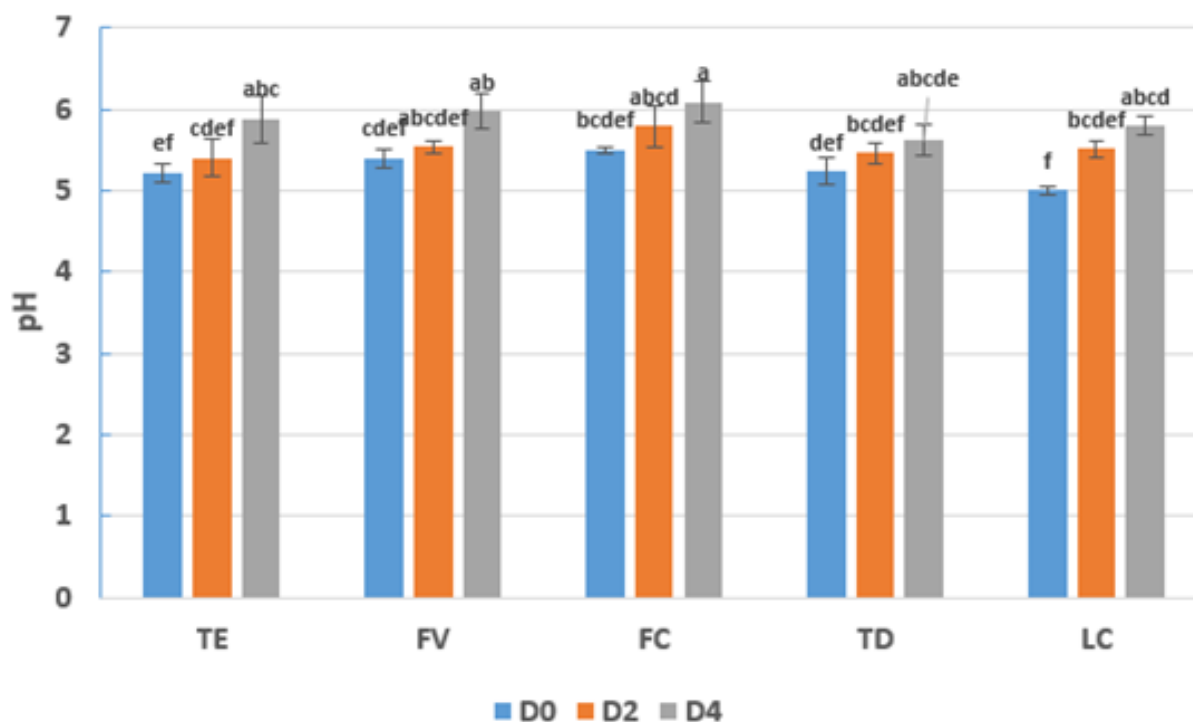


Figure 2. Variation du pH du sol selon la dose de la dolomie et le type de fumure organique

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %. TE est le sol sans fumure organique, FV est le fumier de vache, FC est le fumier de chèvre, TD est le compost de *Tithonia diversifolia*, LC est le compost de *Lantana camara*, D0 est la dose de 0 t/ha de dolomie, D2 est la dose de 2 T/ha de dolomie, D4 est la dose de 4T/ha de dolomie

3.3.2. Effet sur l'acidité d'échange

L'application de la dolomie dans les parcelles expérimentales du site de Zege a réduit significativement la teneur en cations acides H^+ et Al^{3+} (Figure 3) qui était au départ de 1,93 cmol/kg. Les réductions sont proportionnelles aux doses de dolomie appliquées. Ces diminutions sont notées pour tous les types de fumures organiques utilisées. Les traitements à *Lantana camara* sans dolomie (LC-D0) et le témoin intégral sans fumure organique ni dolomie (TE-D0) sont significativement différents des traitements à 4 T/ha de dolomie et des traitements au fumier de chèvre et 2 T/ha de dolomie (FC-D2). On remarque aussi que les traitements avec 2 T/ha de dolomie ne sont pas significativement différents des traitements à 4 T/ha de dolomie pour tous les types de fumures organiques.

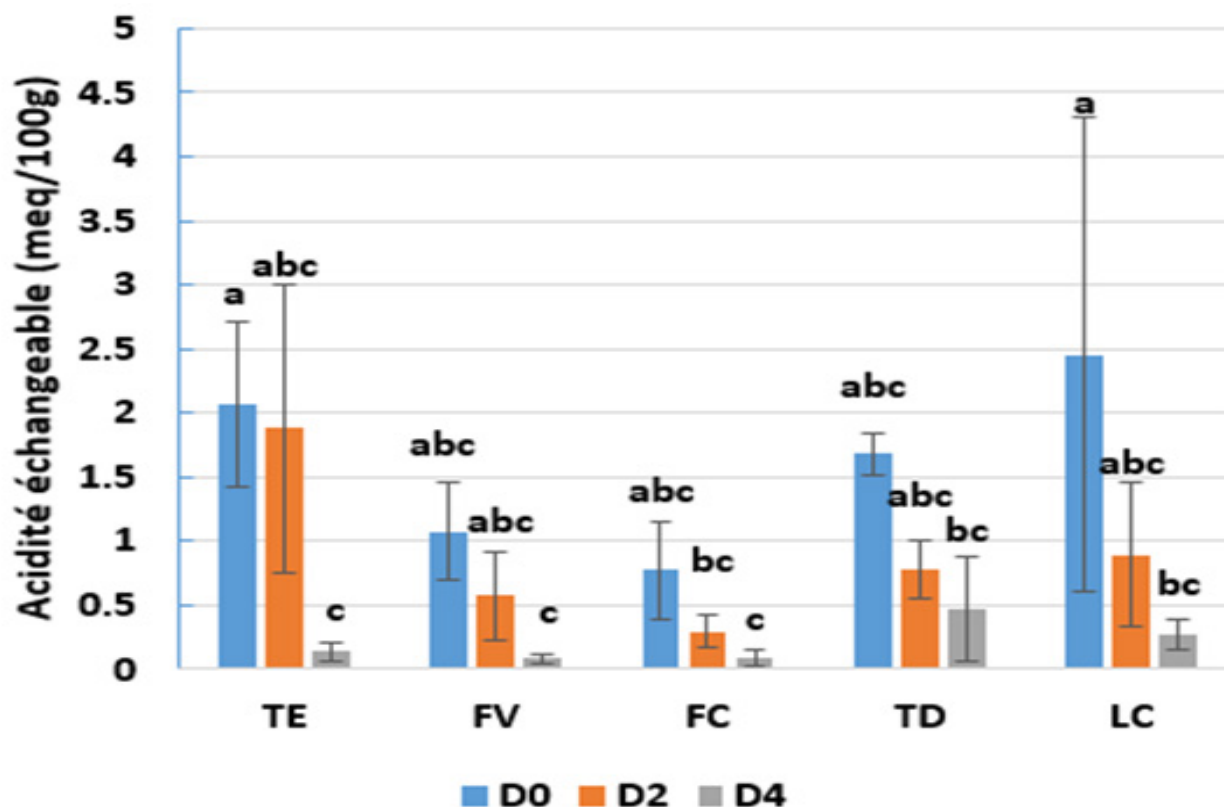


Figure 3. Variation de l'acidité d'échange du sol selon la dose de la dolomie et le type de fumure organique

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %. TE est le sol sans fumure organique, FV est le fumier de vache, FC est le fumier de chèvre, TD est le compost de *Tithonia diversifolia*, LC est le compost de *Lantana camara*, D0 est la dose de 0 T/ha de dolomie, D2 est la dose de 2 T/ha de dolomie, D4 est la dose de 4 T/ha de dolomie.

3.3.3. Effet sur le taux de saturation en aluminium

Les taux de saturation en aluminium obtenus dans les parcelles expérimentales après deux années de cultures sont montrés au Tableau 3. La valeur du sol initial était de 56,5%. Ce taux a significativement diminué suite à l'application de la dolomie jusqu'à atteindre la valeur nulle dans les traitements aux fumures de vache et de chèvre combinées à 4 T/ha de dolomie (FV-D4, FC-D4), dans le traitement à 4 T/ha de dolomie mais sans fumures organiques (TE-D4) et dans le traitement à 2 T/ha de dolomie combinés au fumier de chèvre (FC-D4). Il convient de signaler que les traitements aux fumiers de vache et de chèvre sans aucune fumure organique (FV-D0 et FC-D0) ne sont pas significativement différents des traitements à 4 T/ha de dolomie ; ce qui montre un effet chaulant très marqué de ces deux types de fumure.

Tableau 3. Taux de saturation en aluminium dans les sols des parcelles expérimentales

Traitement	Taux de saturation en aluminium (%)
T1 (TE-D0): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 0 T/ha de chaux)	40,7±24,3ab
T2 (FV-D0): 10 T/ha de fumier de vache + 0 T/ha de chaux,	15,5±13,5bcd
T3 (FC-D0): 10 T/ha de fumier de chèvre + 0 t/ha de chaux,	11,8±15bcd
T4 (TD-D0) : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de chaux	52,3±4,7a
T5 (LC-D0): 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de chaux	35,4±12,7abc
T6 (TE-D2): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 2 T/ha de chaux),	17,5±6,5bcd
T7 (FV-D2): 10 T/ha de fumier de vache + 2 T/ha de chaux,	6,3±11bcd
T8 (FC-D2): 10 T/ha de fumier de chèvre + 2 T/ha de chaux,	0±0d
T9 (TD-D2) : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de chaux	17,4±8,9bcd
T10 (LC-D2): 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de chaux	15,1±16,6bcd

T11 (TE-D4): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de chaux),	0±0d
T12 (FV-D4): 10 T/ha de fumier de vache + 4 T/ha de chaux,	0±0d
T13 (FC-D4) : 10T/ha de fumier de chèvre + 4 T/ha de chaux,	0±0d
T14 (TD-D4): 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de chaux	7,4±12,7bcd
T15 (LC-D4): 10 T/ha de compost de Lantana camara+ 4 T/ha de chaux	1,4±2,4d

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.4. Effet sur l'azote total, le phosphore total et le potassium échangeable

Les pourcentages des trois macroéléments, azote total, phosphore assimilable et potassium échangeable sont montrés au Tableau 4. La teneur en azote total qui était de 0,13% au départ (Tableau 1) n'a pas sensiblement changé dans tous les traitements. Il n'y a aucune différence significative entre les traitements pour l'azote total. La teneur en ce nutriment essentiel est restée faible (teneur en P<20 ppm selon Tessens et Gourdin, 1993) dans tous les traitements malgré les applications des engrais organo-minéraux qui le contiennent en quantité relativement élevée à savoir FOMI-Imura (formule 9% N, 22% P₂O₅, 4% K₂O, 13% CaO et 2% MgO) et FOMI-Bagara (formule 11% N, 44% P₂O₅, 22% K₂O, 4% CaO et 2% MgO).

Comme pour l'azote, les teneurs en phosphore assimilable analysées dans les sols des parcelles expérimentales après deux ans d'exploitation sont restées faibles (teneur en P<20 ppm selon Tessens et Gourdin, 1993) dans tous les traitements, sauf dans le traitement à 4 T/ha de dolomie avec application du fumier de vache, malgré les usages des engrais qui contiennent cet élément. Par ailleurs, l'analyse statistique ne montre pas de différence significative au seuil de 5%.

Tableau 4. Teneur en azote total et en phosphore assimilable dans les sols des parcelles expérimentales après quatre saisons culturales successives

Traitement	N tot (%)	P assimilable (mg/kg)
T1 (TE-D0): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 0 T/ha de chaux)	0,15±0,03a	8,29±1,62
T2 (FV-D0): 10 T/ha de fumier de vache + 0 T/ha de chaux,	1,15±0,01a	13,67±4,22
T3 (FC-D0): 10 T/ha de fumier de chèvre + 0 t/ha de chaux,	0,13±0,01a	9,02±1,37
T4 (TD-D0) : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de chaux	0,014±0,02a	8,89±2,1
T5 (LC-D0): 10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de chaux	0,12±0,02a	10,42±4,06
T6 (TE-D2): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 2 T/ha de chaux),	0,13±0,02a	6,43±1,36
T7 (FV-D2): 10 T/ha de fumier de vache + 2 T/ha de chaux,	0,14±0,01a	9,51±2,26
T8 (FC-D2): 10 T/ha de fumier de chèvre + 2 T/ha de chaux,	0,15±0,02a	8,59±0,98
T9 (TD-D2) : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de chaux	0,14±0,01a	9,65±3,66
T10 (LC-D2): 10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de chaux	0,16±0,01a	8,40±2,39
T11 (TE-D4): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de chaux),	0,15±0,01a	6,64±1,77
T12 (FV-D4): 10 T/ha de fumier de vache + 4 T/ha de chaux,	0,27±0,22a	11,17±1,59
T13 (FC-D4) : 10T/ha de fumier de chèvre + 4 T/ha de chaux,	0,15±0,03a	10,02±3,89
T14 (TD-D4): 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de chaux	0,13±0,02a	7,32±1,14
T15 (LC-D4): 10 T/ha de compost de Lantana camara+ 4 T/ha de chaux	0,13±0,01a	13,41±7,93

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.5. Effet sur les cations basiques échangeables et sur le taux de saturation en bases

Les teneurs en bases échangeables des sols des parcelles expérimentales analysées après deux ans de d'exploitation agricole sont montrées au Tableau 5.

Les teneurs en calcium sont proportionnelles aux doses de dolomie appliquée, les sols des parcelles à 4 t/ha de dolomie étant les plus concentrés en cet élément que les autres. Les parcelles moins riches en cet élément sont celles qui n'ont pas connu d'application de chaux. Bien évidemment, cette situation s'explique par les apports de Ca par la chaux dolomitique dont la composition chimique – rappelons-le- est de 28% de CaO et 19% de MgO.

Les teneurs en magnésium échangeables des sols des parcelles expérimentales varient de 0,12 à 0,88 cmolc/kg ; les deux extrêmes ayant été analysés respectivement dans les parcelles témoin intégral (TE-D0) et fumier de vache sans dolomie (FV-D0). Par ordre de teneur croissante en magnésium, les traitements se rangent comme suit : TD-D0 < LC-D0 < TE-D0 < TD-D2 < TE-D2 < FC-D0 < TD-D4 < TE-D4 < LC-D2 < FC-D2 < FV-D2 < LC-D4 < FV-D4 < FC-D4 < FV-D0.

Les teneurs en potassium échangeable varient de 0,06 à 0,46 cmolc/kg, la plus petite valeur étant celle de la parcelle non chaulée et amendé par le compost de *Lantana camara* tandis que la plus grande valeur est celle de la parcelle chaulée avec 4 t/ha de dolomie et le fumier de chèvre. Globalement, on remarque que les parcelles amendées avec du fumier de chèvre manifeste une teneur en potassium échangeable relativement plus élevée que les autres.

Le sodium, tout comme le potassium, sont des éléments monovalents qui sont faiblement retenus sur le complexe d'échange. Ainsi, les teneurs en sodium sont nulles dans la quasi-totalité des parcelles expérimentales. Cette situation démontre l'état avancé d'altération et de lessivage du site d'essai.

Tableau 5. Teneur en cations basiques échangeables (cmolc/kg) dans les sols des parcelles expérimentales après quatre saisons culturales successives

Traitement	Ca	Mg	K	Na
T1 (TE-D0): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 0 T/ha de chaux)	0,5±0,2e	0,5±0,2e	0,09±0,13cde	0,10±0,17a
T2 (FV-D0): 10 T/ha de fumier de vache + 0 T/ha de chaux,	1,1±0,4bcde	1,1±0,4bcde	0,38±0,15abc	0±0a
T3 (FC-D0): 10 T/ha de fumier de chèvre + 0 t/ha de chaux,	0,8±0,2de	0,8±0,2de	0,36±0,16abcd	0±0a
T4 (TD-D0) : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de chaux	0,4±0,1e	0,4±0,1e	0,16±0,05bcde	0±0a
T5 (LC-D0): 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de chaux	0,4±0,2e	0,4±0,2e	0,06±0,06e	0±0a
T6 (TE-D2): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 2 T/ha de chaux),	1,0±0,4bcde	0,50±0,1abc	0,10±0,06cde	0±0a
T7 (FV-D2): 10 T/ha de fumier de vache + 2 T/ha de chaux,	1,0±0,2cde	0,71±0,1a	0,31±0,11abcde	0±0a
T8 (FC-D2): 10 T/ha de fumier de chèvre + 2 T/ha de chaux,	1,6±0,2abcd	0,65±0,2ab	0,40±0,09ab	0±0a
T9 (TD-D2) : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de chaux	1,1±0,4bcde	0,45±0,1abc	0,14±0,02bcde	0±0a
T10 (LC-D2): 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de chaux	1,1±0,4bcde	0,60±0,2abc	0,08±0,02de	0±0a
T11 (TE-D4): Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de chaux),	1,8±0,1abc	0,54±0,1abc	0,06±0,04cde	0±0a
T12 (FV-D4): 10 T/ha de fumier de vache + 4 T/ha de chaux,	2,0±0,1a	0,77±0a	0,29±0,04abcde	0±0a
T13 (FC-D4) : 10T/ha de fumier de chèvre + 4 T/ha de chaux,	2,3±0,4a	0,85±0,1a	0,46±0,17a	0,09±0,16a
T14 (TD-D4): 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de chaux	1,6±0,3abcd	0,52±0,1abc	0,15±0,02bcde	0±0a
T15 (LC-D4): 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de chaux	1,9±0,5ab	0,71±0,2a	0,11±0,11bcde	0±0a

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5%.

Les taux de saturation en bases calculé pour tous les traitements de l'essai sont montrés à la Figure 4. Ce paramètre varie de 27 à 97% ; taux obtenus respectivement pour les traitements au compost de Lantana camara sans dolomie (LC-D0) et 4 T/ha de dolomie combiné fumier de chèvre (FC-D4). L'effet de la dolomie sur ce paramètre est évident. En effet, il croit avec l'accroissement de la dose de dolomie pour tous les types de fumures organiques (Figure 4).

L'ANOVA réalisée sur cette variable montre l'existence de trois groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le premier groupe regroupe les cinq traitements à 4 T/ha de dolomie et quatre traitements à 2 T/ha de dolomie. Les traitements à 4 T/ha de dolomie sont significativement plus saturés en bases que les traitements sans dolomie mais à l'exception des traitements aux fumiers de vache et de chèvre. Ces deux derniers traitements ne sont pas significativement différents des traitements à 4 T/ha de dolomie. L'effet chaulant des fumiers de vache et de chèvre est ici mis en évidence.

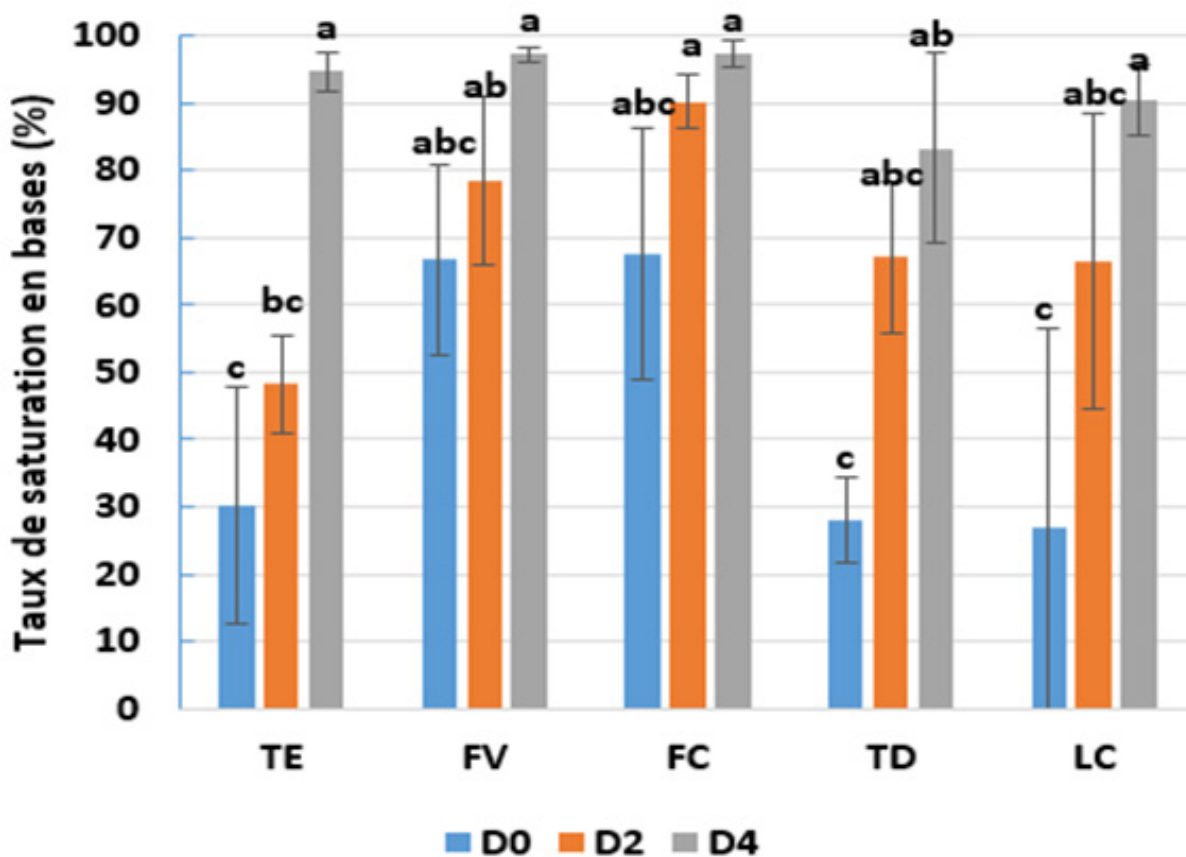


Figure 4. Variation du taux de saturation en bases des sols des parcelles expérimentales après quatre saisons culturales

Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement et la barre verticale représente l'écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5%.

3.3.6. Effet sur la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique des sols des parcelles expérimentales déterminée expérimentalement varie de 6,77 et 9,64 cmolc/kg (Figure 5) ; les deux valeurs extrêmes étant respectivement celle des traitements au compost de Lantana camara sans dolomie (LC-D0) et au compost de Tithonia diversifolia combiné à 4 t/ha de dolomie (TD-D4). Le test de Tukey menée sur cette variable montre que ces deux traitements sont significativement différents au seuil de 5%. Toutefois, tous les autres traitements ne sont pas statistiquement différents de ces deux traitements au seuil de 5%.

La capacité d'échange cationique effective calculée par la sommation des teneurs de tous les cations échangeables varie de 2,34 et 3,78 cmolc/kg. Ces valeurs sont très faibles et indiquent que les sols de ces parcelles expérimentales ont gardé un faible pouvoir de rétention d'éléments nutritifs (de cations) malgré les applications de chaux et de matières organiques. Les valeurs de ce paramètre devraient logiquement égaler celles de la CEC mais le constat est que la CECE est de loin très petites par rapport à la CEC. Cela traduit l'augmentation des charges négatives avec l'augmentation du pH. En effet, le pH de ces échantillons de sol se situe entre 5,0 et 6,09 alors que la solution utilisée pour déterminer la CEC est tamponnée à pH 7 (c'est l'acétate d'ammonium à pH 7). La fraction colloïdale de ce sol est donc dominée par les particules à charges variables. Le pourcentage en matière organique n'étant pas remarquablement élevé, on peut suspecter la dominance de la kaolinite et/ou des oxyhydroxydes de fer et d'aluminium dans la fraction argileuse ; ce qui reconferme la classification du sol dans le groupe des ferralsols. La valeur de la CEC déterminée expérimentalement est donc surestimée. En considérant cette situation, les calculs des taux de saturation en bases et en aluminium de ces sols se basent sur la CECE qui paraît correcte.

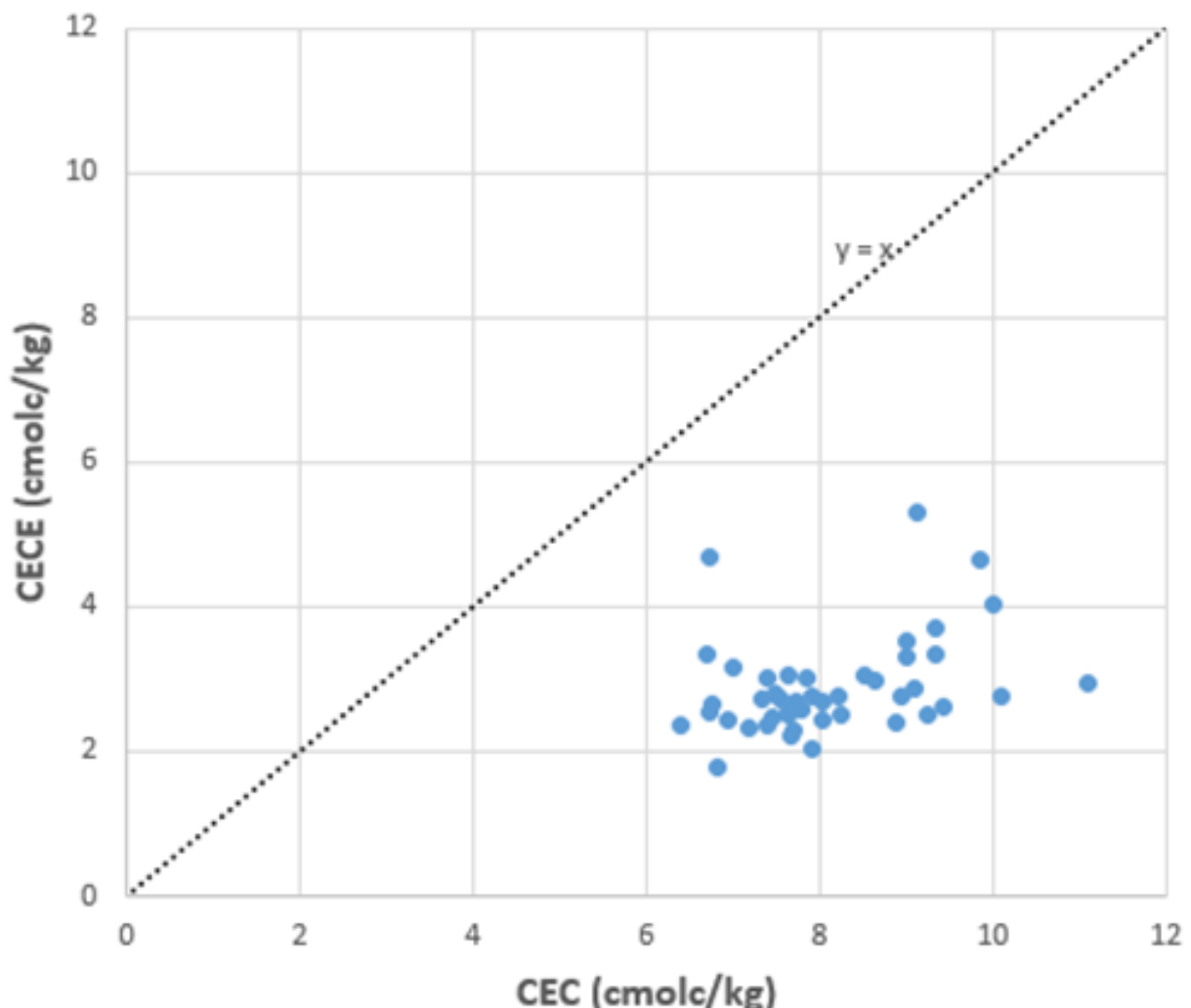


Figure 5. Comparaison entre la capacité d'échange cationique effective (CECE) et la capacité d'échange cationique (CEC)

4. CONCLUSION

Cette étude avait pour but d'identifier le couple dose de dolomie - type de matière organique qui améliorerait le plus les propriétés du ferralsol fortement acide du Kirimiro au Burundi après quatre saisons culturales successives s'étendant sur 2 années civiles. Les traitements testés sont issus d'une combinaison entre 3 doses de dolomie (0; 2; 4 T/ha) et 4 modalités de fumure organique (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*), donnant lieu à 15 traitements couplés répétés trois fois. La chaux a été appliquée dans les traitements en une seule fois au début de la première saison culturale, tandis que les fumures organiques étaient appliquées à chacune des opérations de semis de chaque culture. Après les quatre saisons culturales, les résultats d'analyse du sol montrent qu'il y a une corrélation positive entre la dose de dolomie et les indicateurs de diminution de l'acidité (augmentation du pH et du taux de saturation en bases, diminution du taux de saturation en aluminium). Par ailleurs, combinée aux fumures organiques, la dose de 2 T/ha neutralise l'acidité du sol jusqu'aux niveaux qui ne nécessitent plus d'intervention de chaulage. En outre, les applications des fumiers de chèvre et de vache sans usage de dolomie corrigent l'extrême acidité du sol au même titre que les usages de 2 t/ha de dolomie. Quant aux teneurs en éléments nutritifs N, P, K, Ca, Mg, sont restées faibles à très faibles, celles-ci malgré les remontées de pH et les engrais chimiques appliqués pour chaque culture.

En conclusion, la formule de Yamoah et al. (1990) qui a servi à fixer la dose de 2 T/ha de dolomie, détermine bien la dose efficace de dolomie à appliquer aux ferralsols acides du Kirimiro, tandis que les fumiers de vache et de chèvre exercent un effet chaulant significatif.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Baker A. V. 1997. Composition and Uses of Compost (Chapter 10). *Agricultural Uses of By-Products and Wastes*; 668 (1997) 140-162 DOI: 10.1021/bk-1997-0668.ch010
2. Buol, S. W., Hole, F. D., McCracken, R. J. 1980. *Soil genesis and classification*. Second edition, the Iowa State University Press, Ames
3. Christopher T. B. S., Mokhtaruddin A. M., 1996. A computer program to determine the soil textural class in 1–2–3 for windows and excel, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27:9-10, 2315-2319, DOI: 10.1080/00103629609369705
4. Landon, J.R. 1991. *Booker Tropical Soil Manual. A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics*. J.R. Landon (Ed.) Longman Technical Copublished in the United States with John Wiley and Sons, Inc., New York, 474p.
5. Motsara M.R., Roy R.N. 2008. *Guide to Laboratory establishment for plant nutrient analysis*. FAP Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
6. Musonerimana, S., Anicet, N., Ndayihanzamaso, P., Semenova, E., Niyuhire, M. C., Sendegeya, Beun M. & Nibasumba A. (2025). Maps of major soil parameters: A reference for monitoring soil fertility in Burundi. *Sustainable Environment*, 11(1), 2521932
7. Namkoong W., Hwang E. Y., Cheong J. G., Choi J. Y. 1999. A comparative evaluation of maturity parameters for food waste composting. *Compost Science & Utilization* 7 (1999) 55-62.
8. Nduwimana O., Nzohabonayo Z., Hicintuka C., Nibasumba M. 2013. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB – IFDC, 76p
9. R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [Logiciel]. <https://www.R-project.org/>.

10. Tahraoui D. N. 2013. Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, () 244p.
11. Tessens, E., Gourdin, J. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. ISABU, Fiche labo n°19
12. Toundou 2016. Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicum esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo. Thèse de doctorat. Université de Limoges; Université de Lomé, (2016) 195p.
13. Yamoah, C. F., J. R. Burleigh, Malcolm M. R. 1990. Application of Expert Systems to Study of Acid Soils in Rwanda.

Effets combinés de la dolomie et des fumures organiques sur les rendements du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et du maïs (*Zea mays* L.) dans les Plateaux Centraux du Burundi

Séverin Nijimbere^{1*}, Désiré Nizigiyimana², Diomède Hatangimana², Gordien Birayi¹, Ndhokubwayo Soter¹, Oscar Nduwimana³, Salvator Kaboneka¹, Micaël Beun³

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie, BP 2700 Bujumbura, Burundi

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: severin.nijimbere@ub.edu.bi

Résumé

Cette étude a été menée en vue de déterminer la dose de dolomie et le type de fumure organique en mesure d'améliorer le rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et du maïs (*Zea mays* L.) cultivés en rotation sur un ferralsole fortement acide de Zege à Gitega au Burundi pendant deux années culturales successives de 2023 à 2025. Les combinaisons de trois niveaux de dose de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) et de quatre types d'amendements organiques (fumiers de vache et de chèvre, composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara* et le témoin) ont été testées. L'essai installé était en blocs aléatoires complets à trois répétitions. Les engrais organo-minéraux étaient appliqués de la même manière dans tous les traitements. Les résultats obtenus montrent que le rendement du haricot cultivé au cours des saisons 2023B et 2024B augmente avec l'augmentation de la dose de dolomie.

Le meilleur rendement étant la combinaison du fumier de vache et 4 T/ha de dolomie (rendement de 1142 kg/ha en 2023B et de 945 kg/ha en 2024B). Ce rendement n'est pas significativement différent de ceux des traitements combinant la dose de 4 T/ha de dolomie et les différentes fumures organiques. Toutefois, l'usage de la dolomie seule sans fumure organique n'améliore pas significativement le rendement du haricot. Le rendement du maïs récolté au cours des deux saisons culturales 2024A et 2025B montre également une supériorité de la combinaison du fumier de vache et de la dose de 2 T/ha de dolomie (5 406 kg/ha en 2024A et 4 380 kg/ha en 2025A).

Pour la saison 2024A, ce meilleur traitement ne diffère significativement que du traitement sans fumure organique mais avec 2 T/ha de dolomie et du traitement au compost de *Lantana camara* sans dolomie. Pour la saison 2025A, ce meilleur traitement ne diffère que du traitement témoin sans fumure organique ni dolomie, du traitement au compost de *Lantana camara* sans dolomie et sans fumure organique, et du traitement sans fumure organique mais avec 2 T/ha de dolomie. L'analyse du rapport valeur sur coût de toute la période d'essai montre une rentabilité économique très élevée de l'application du fumier de vache ou de chèvre ou du compost de *Tithonia diversifolia* en combinaison ou non avec 2 T/ha de dolomie. En conclusion, l'application de 2 T/ha de dolomie, déterminée avec la formule de Yamoah et al. (1990), en combinaison avec du fumier de vache ou de chèvre ou avec du compost de *Tithonia diversifolia* améliore le rendement du haricot et du maïs cultivés sur un ferralsole fortement acide.

Mots clés : Acidité du sol, ferralsole, dolomie, fumure organique, rentabilité, rapport V/C, haricot, maïs

Abstract

The present study was conducted in the objective of determining dolomitic rate and type of organic manure capable of improving yields of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and maize (*Zea mays* L.) crops under rotational cropping systems on highly acidic ferralsol of Zege-Gitega in Burundi, during two successive cultural years, 2023 to 2025.

Combinations of 3 levels of lime application (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) and 4 types of organic amendments (cow and goat manures, composts of *Tithonia diversifolia* and *Lantana camara* and the control) were tested, under a completely randomized bloc design with 3 replicates. Rates of organo-mineral fertilizers were uniformly applied across tested treatments. Obtained results demonstrate that bean yields during seasons 2023B and 2024B increase with increasing lime application. The best overall treatment was the combination of cow manure with 4 T/ha of dolomitic lime (1142 kg/ha in 2023B and 945 kg/ha in 2024B), though these yields did not show significant differences with other treatments combining 4 T/ha of lime with other organic fertilisers. However, application of sole dolomitic lime without organic fertilizers did not improve bean yields. On the other hand, maize yields obtained during seasons 2024A and 2025B show the superiority of cow manure in combination with 2 T/ha of dolomitic lime (5406 kg/ha in 2024A and 4380 kg/ha in 2025A). During season 2024A, the former treatment only statistically differ from treatment without organic fertilisers with 2 T/ha of lime and the *Lantana camara* compost also without dolomitic lime. With 2025A season, the same best gave treatment higher yields but was only different from : the control (no lime no organic fertilizer applied) ; *Lantana camara* compost without lime ; treatment with 2 T/ha of lime without organic fertiliser. Analysis of the value cost (V/C) ratio show a very high economic profitability of all organic fertilizers, except *Lantana* compost, with their combination with or without 2 T/ha of lime. In conclusion, application of 2 T/ha of lime, determined by the Yamoah et al.

(1990) formula/equation, in combination with cow and goat manures, as well as with *Tithonia diversifolia* based compost agronomically and economically improve bean and maize yields on a very acidic ferralsol.

Keywords : Soil acidity, ferralsol, lime, organic matter, profitability, V/C, bean, maize, yield



1. INTRODUCTION

Les plantes cultivées sur les sols acides rencontrent diverses limitations liées à l'indisponibilité des éléments nutritifs insolubilisés suite à la réaction acide du sol, l'inhibition de l'élongation racinaire, la toxicité de certains éléments dont l'aluminium (Bado et al., 1997,). L'acidification du sol induit l'inactivité de certains microorganismes utiles à la croissance des plantes et/ou à l'amélioration des propriétés du sol sont rendus inactifs (Sullivan et al., 2017).

Les sols acides occupent une superficie considérable de la par le monde ou même au Burundi. Il est connu que le degré d'acidité augmente avec l'augmentation de l'altitude sur la toposéquence toutes choses restant égales par ailleurs (Ali et al., 2019, Hailemariam et al., 2023, Borůvka et al., 2009) ; les cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) se détachant plus facilement du complexe d'échange pour partir avec la solution de lessivage vers les bas-fonds et finalement dans les lacs et les océans en laissant sur place des éléments acides (Al^{3+} et H^+) (Boyer, 1982).

Dans certaines régions du monde dont le Burundi, les populations vivent dans leur majorité de l'agriculture. Au Burundi, les activités agricoles occupent 85,7% des ménages (INSBU, 2025). Les sols connaissent des dégradations diverses en commençant par l'érosion qui emportent les particules du sol vers d'autres endroits. Des dégradations internes du sol comprennent essentiellement le déficit en éléments nutritifs, la réduction du contenu en carbone organique, l'acidification et la salinisation du sol. L'acidification du sol affecte la plus grande partie du territoire arable du Burundi. Des études récentes conduite par IFDC et ISABU (Musonerimana et al., 2025) a montré qu'environ 73% des sols du Burundi sont fortement acide à très fortement acide ($\text{pH} < 5,5$). Cette étude a également montré que les proportions de terres arables burundaises accusant des teneurs faibles à très faibles en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium sont de l'ordre de 35% pour l'azote total, 99% pour le phosphore assimilable, 52% pour le potassium échangeable, 46% pour le calcium échangeable et 30% pour le Mg échangeable. Par ailleurs, une autre étude menée en 2013 par ces mêmes institutions (Nduwimana et al., 2013) avait mentionné des teneurs faibles à très faibles qui touchent 71% de la superficie cultivables pour le soufre, 62% pour le zinc et presque 100% pour le bore.

De plus, ces sols sont caractérisés sur la grande superficie par des teneurs toxiques en aluminium et un faible pouvoir de rétention des nutriments (faible Capacité d'Échange Cationique). Les solutions envisageables pour une gestion durable de ces sols sont basées sur les usages simultanés de la chaux dolomitique, de la fumure organique et des engrais minéraux ou organo-minéraux.

En tenant compte de cette série de contraintes qui paraissent combinées, il convient d'agir simultanément sur les actions suivantes sur les sols acides d'altitude du Burundi : la correction de l'acidité pour permettre la disponibilité des nutriments et pour corriger la toxicité aluminique, la fumure organique pour augmenter le pouvoir de rétention des nutriments et améliorer la structure et les propriétés biologiques du sol, la lutte contre l'érosion hydrique pour les pertes en terre et en nutriments (Van Wambeke, 1992, Van Ranst, 1995, IUSS Working Group WRB, 2015). Au Burundi, les principales cultures vivrières comprennent le maïs, le haricot, le manioc, la pomme de terre, le riz, le blé (Nduwimana et al., 2020 ; ISTEERU, 2018). Les systèmes de rotation le plus mis en pratiqué est celui de la rotation maïs – haricot. Pourtant, le haricot et le maïs sont parmi les cultures sensibles à l'acidité du sol à l'aluminium (Buerkert et al., 1990, Fageria et al., 2012). L'obtention d'une bonne récolte de ces cultures nécessite l'adoption des pratiques de gestion du sol ci-haut évoqués. Néanmoins, peu d'informations sont connues sur les quantités de chaux à appliquer sur le sol pour optimiser le rendement des cultures et les propriétés du sol, ni sur les effets des fumures organiques des combinaisons de ces deux types d'amendements du sol le rendement des cultures et les propriétés du sol.

Pour tenter de répondre à ces questions, un essai expérimental a été conduit par des chercheurs de la FABI sur un sol acide du campus Zege (pH initial de 4,82) de janvier 2023 à avril 2025. L'étude était financée par le projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée des Sols (PAGRIS) de l'International Fertilizer Development Center (IFDC). L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les effets interactifs de la dolomie et des amendements organiques sur le rendement des cultures conduites sur un ferralsol fortement acide. Spécifiquement, l'étude a visé l'identification d'un type de fumure organique qui permet d'améliorer le rendement des cultures de haricot de maïs, la détermination de la dose optimale de chaux dolomitique à recommander à court et à long terme pour la correction de l'extrême acidité observée dans les sols d'altitude du Burundi et pour améliorer le rendement du haricot et du maïs in fine, et enfin la détermination de la meilleure combinaison de matière organique et de la dose de la dolomie qui permet d'améliorer le rendement des cultures (haricot et maïs en rotation).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Caractéristiques de la zone d'étude

Le site expérimental de cette étude est un champ de la ferme didactique de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi (UB), localisée sur la sous-colline Zege, colline Rukoba en commune Gitega de la province Gitega dans la région agroécologique de Kirimiro. La région de Kirimiro connaît un climat tropical humide. C'est un climat doux avec des précipitations moyennes annuelles comprises entre 1040 et 1400mm et une température moyenne annuelle de 19,6°C. Les coordonnées géographiques de ce site sont 3°24'82» S et 29°55'20,42» E en DMS (degrés, minutes, secondes). Ce site a été choisi son sol est connue pour son extrême acidité et pour son appartenance au groupe ferralsols, le groupe le plus représenté dans la région de Kirimiro et au Burundi. La valeur du pH du site expérimental de 4,8, analysée avant la conduite de l'essai, montre que c'est un sol fortement acide selon Motsara et Roy (2008) ; c'est-à-dire un sol dont le pH est compris entre 4,6 et 5,5. Nombreux chercheurs ont montré que les sols ayant un pH pareil accuse une toxicité aluminique et excès de Co, Cu, Fe, Mn, Zn et déficience en Ca, K, N, Mg, Mo, P, S et B (Buol et al., 1980, Landon, 1991).

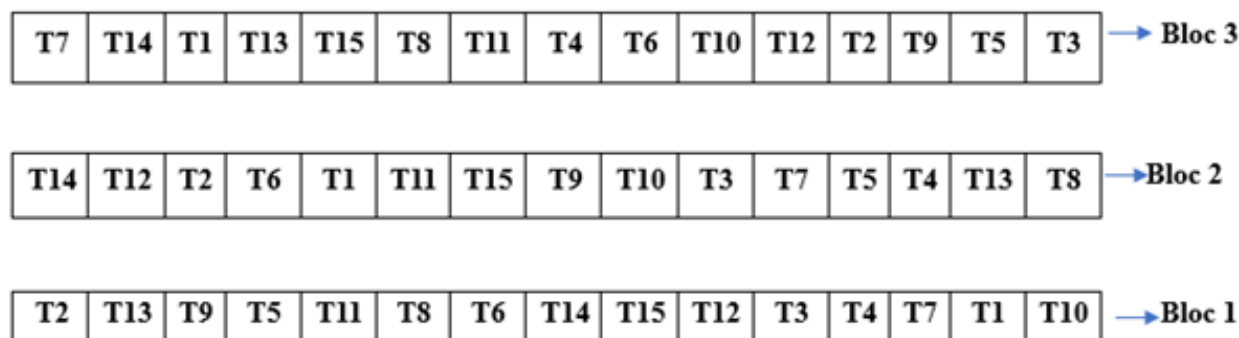
2.2. Démarche méthodologique et expérimentale

L'étude a commencé en janvier 2023 et a suivi les étapes suivantes :

1. Défrichage du terrain,
2. Prélèvement de l'échantillon composite du site expérimental avant l'essai,
3. Installation du dispositif expérimental par la délimitation du terrain en 3 blocs constitué de 15 parcelles chacun, chaque parcelle ayant une forme carrée de 8 m x 8 m,
4. Conduite de la culture de haricot pour la saison culturale 2023B de février à mai 2023,
5. Analyse des échantillons de sols de toutes les parcelles élémentaires prélevés en septembre 2023,
6. Conduite de la culture du maïs de septembre 2023 à février 2024 ;
7. Analyse des échantillons de sols de toutes les parcelles élémentaires prélevés en mars 2024,
8. Conduite de la culture de haricot pour la saison culturale 2024B de février à mai 2024,
9. Conduite de la culture du maïs de septembre 2024 à février 2025,
10. Analyse des échantillons de sols de toutes les parcelles élémentaires prélevés en mars 2025.

2.2.1. Dispositif expérimental

Le plan expérimental était le dispositif en blocs aléatoires complets comprenant 3 blocs et trois répétitions pour chaque traitement (Figure 1). Chaque traitement correspondait à une parcelle expérimentale 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 3 m. La délimitation de ces parcelles expérimentales a été réalisée en dates du 03 au 05 janvier 2023.



Le traitement consistait en une combinaison factorielle de cinq modalités de types de matières organiques (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*) et de trois modalités de dose de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) faisant en tout 15 traitements suivants :

T1 (D0-TE)	: 0 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique (témoin),
T2 (D0-FV)	: 0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache,
T3 (D0-FC)	: 0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre,
T4 (D0-TD)	: 0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> ,
T5 (D0-LC)	: 0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> ,
T6 (D2-TE)	: 2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique,
T7 (D2-FV)	: 2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache,
T8 (D2-FC)	: 2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre,
T9 (D2-TD)	: 2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> ,
T10 (D2-LC)	: 2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> ,
T11 (D4-TE)	: 4 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique,
T12 (D4-FV)	: 4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache,
T13 (D4-FC)	: 4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre,
T14 (D4-TD)	: 4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> ,
T15 (D4-LC)	: 4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> .

La dolomie a été appliquée à une seule date, à trois semaines avant le semis de la première culture, celle du haricot. 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 réalisée par l'épandage sur toute la surface de la parcelle en commençant par ses bordures et ensuite en appliquant la chaux de manière homogène à l'intérieur.

La dose de dolomie de 2 T/ha fait référence à celle fixée par l'usage de la formule Yamoah et al. (1990) reprise ci-après :

$$BC = 16,0 - 2,87 \text{ pH}$$

Où BC est la quantité de chaux requise en tonne de CaCO_3 par ha.

Pour accélérer les effets de la chaux, nous avons dû ajouter des traitements avec la dose double de celle obtenue avec la susdite formule, c'est-à-dire 4 T/ha de dolomie, espérant que cette dose neutraliserait complètement l'extrême acidité du sol. La dose de 10 T/ha de fumure organique fraîche (fumier de vache ou de chèvres et composts de *Tithonia diversifolia* ou de *Lantana camara*) qui a été retenue dans cette étude fait référence à la dose recommandée par les services de vulgarisation.

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. Ces différentes fumures ont été appliquées dans les poquets juste avant le semis.

2.2.2. Conduite de la récolte du haricot

Le haricot a été cultivé pendant les saisons culturales 2023B et 2024B. Le semis a été réalisé en suivant 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 a été introduite du CIAT au Burundi par l'ISABU en 2008 avec code d'origine CODMLB003. Elle a été homologuée pour distribution aux agriculteurs en 2015 avec le nom local de rufutamadeni ou mutwenzi en Kirundi. Sa zone de culture se situe entre 1200 à 1700 m d'altitude et son rendement potentiel est de 1,2 T/ha.

Pour tous les traitements, une même dose d'engrais organo-minéraux, fabriqués par l'usine de production d'engrais Fertilisants Organo-Minéraux Industries (FOMI), a été appliquée dans les poquets à chaque saison culturale : celle de 200 kg de FOMI-Imbura (correspondant au 18 N, 44 P, 8 K, 26 Ca et 4 Mg). L'entretien consistait en deux passages de sarclage manuel à l'aide des houx.

La collecte des données a été réalisée au cours de la croissance du haricot et à la récolte. Les données collectées pendant la croissance du haricot sont le nombre de plants germés à deux semaines après le semis et le nombre de plants survivants à huit semaines après le semis. La collecte des données relatives au taux de survie et celles collectées à la récolte a été effectuée dans un carré de rendement de 2 m de côté installé à l'intérieur de chaque parcelle.

A la récolte, les activités de collecte des données ont été menées successivement comme suit :

- Comptage des plantes se trouvant dans le carré de rendement ;
- Arrachage des plants à l'aide d'une houe pour le retrait de toutes les parties y compris les racines ;
- Mesure de la longueur des racines ;
- Ensachage des plants dans les sacs biodégradables pour faciliter leur transport ;
- Comptage des gousses de tous les plants issus d'une même carrée de rendement ;
- Comptage des graines par gousse ;
- Séchage à l'air libre des graines et résidus de récolte pendant deux semaines ;
- Pesées des graines et des résidus ; les résidus des racines et des parties aériennes a été d'abord effectuée sur 5 plants choisis au hasard parmi les plants de chaque carré puis on a passé à l'extrapolation des données à l'hectare.

Les formules utilisées pour l'estimation du taux de survie, de la biomasse racinaire et aérienne et du rendement à l'hectare sont les suivantes :

Le taux de survie a été calculé en recourant à la formule : $T = \frac{(n*100)}{Y}$

où : **T** est le taux de survie des plants dans la parcelle ; **n** est le nombre de plants comptés dans carré de rendement, **Y** est le nombre total de plants plantés dans le carré de rendement

Le rendement en graines, la biomasse totale sèche par parcelle, la biomasse aérienne par parcelle et la biomasse racinaire par parcelle ont été calculés en rapportant les valeurs pesées des cinq plants échantillons de chaque carré de rendement au nombre total de plants survivant dans chaque carré de rendement.

L'estimation de leurs valeurs par hectare a été réalisée à l'aide de la formule :

$$X_{ha} = X_c * 2500$$

où **X_{ha}** est la valeur du paramètre calculée par hectare, **X_c** est la valeur calculée pour un carré de rendement de 2 m de côté, et 2500 est le facteur de conversion tenant compte de la superficie du carré de rendement.

2.2.3. Conduite de la culture du maïs

La culture du maïs a été conduite au cours des deux saisons cultures 2024A et 2025A. Les semences de maïs utilisées étaient la variété composite MZ605 achetées à l'ISABU. Cette variété a été introduite au Burundi du centre CIMMYT localisé au Zimbabwe par l'ISABU. La zone de culture de cette variété se situe entre 1200 à 1800 m d'altitude et son rendement potentiel varie de 3,5 à 4,5 T/ ha.

Les opérations de semis commençaient par le creusement des poquets de 5 cm. Elles se poursuivaient par l'application du fumier ou du compost à la dose de 10 t/ha dans les traitements concernés, puis par l'application d'engrais organo-minéraux dans tous les poquets en raison de 270 kg/ha de FOMI – Imbura, puis par le dépôt de trois graines par poquets, et enfin le remplissage du poquet avec du sol. A deux semaines après le semis, on a procédé au démariage pour ne garder que deux meilleurs plants de maïs par poquet.

Les opérations d'entretien du maïs réalisées étaient le sarclo-binage et le sarclo-buttagage effectuées respectivement à 30 jours et à 60 jours après le semis. Chacune de ces deux opérations était accompagnée par l'application de l'engrais FOMI-Totahaza à la dose de 50 kg/ha.

Des attaques des plants par les grillons et les termites et les chenilles foreuses ont été observées. Elles étaient contrecarrées par les applications de dursuban granulé pour les deux premiers ravageurs et de Dudu Fenos pour les chenilles foreuses.

Les paramètres collectés étaient la hauteur et le nombre de feuilles pendant la croissance, le poids de grains et la biomasse totale au moment de la récolte.

2.2.4. Echantillonnage de sols et prétraitement des échantillons de sol

Juste avant l'installation de l'essai en janvier 2023, un échantillon composite constitué de huit échantillons élémentaires de surface (20 cm supérieurs) a été collecté pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques initiales du site.

Après les quatre saisons culturales (de 2023A à 2025A), des échantillons composites de surface ont été collectés dans tous les 45 parcelles expérimentales de l'étude pour évaluer les effets des traitements sur les propriétés physico-chimiques du sol. Les analyses de ces échantillons ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Les analyses de l'échantillon de départ et des échantillons des sols issus des 45 parcelles ont porté sur la granulométrie (pour l'échantillon de départ seulement), le pH (pH H₂O et pH KCl), la conductivité électrique, azote total, le carbone organique, le phosphore assimilable, la CEC, les bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) et l'acidité d'échange (Al³⁺, H⁺).

Les méthodes d'analyse sont celles d'usage dans ce laboratoire. L'analyse granulométrique a été menée, après destruction des matières organique et des oxydes et des carbonates, par l'élimination des argiles par sédimentation et la séparation des limons et des sables par filtration. Le pH et la conductivité électrique ont été analysés dans les suspensions de sol au rapport sol/eau de 1/5. Le carbone organique a été dosée par la oxydation sulfochromique et dosage volumétrique, l'azote total par la méthode Kjeldahl modifiée, le phosphore assimilable par la méthode d'Olsen, les bases (Na, K, Ca, Mg) par extraction par agitation ou par percolation à l'acétate d'ammonium et dosage par SAA/flamme, la CEC par la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7, l'acidité d'échange par méthode volumétrique après l'extraction avec KCl.

2.2.5. Traitement statistique des données de croissance et de rendement des cultures

Les données relatives à la croissance et au rendement du haricot et du maïs ont été saisies avec MS-Excel. Ensuite, la comparaison des moyennes a été réalisée par une analyse de la variance à un seul facteur (ANOVA 1). En cas de résultat significatif ($p < 0,05$), les comparaisons des traitements par paires étaient réalisées en recourant au test de Tukey HSD. Toutes ces analyses étaient faites en utilisant le logiciel R (R Core Team, 2021).

2.2.6. Calcul de la rentabilité économique

La rentabilité économique de la combinaison de la dose de dolomie et du type de fumure organique a été évaluée par la méthode du rapport valeur sur coût (V/C). Les deux termes de ce rapport sont :

- V= Valeur de la production physique multiplié par le prix d'une unité de production ;
- C= La somme des dépenses relatives à toutes les opérations liées à la production.

Pour cet exercice, les deux termes ont été ramenés à l'hectare. Les coûts de production considérés étaient ceux relatifs aux opérations de labour, d'application de la dolomie, aux achats des intrants (engrais, fumures organiques et produits phytosanitaires), aux opérations de semis, de sarclage, de traitements phytosanitaires, de récolte et d'opérations post-récolte (séchage, égrainage et vannage).

Les coûts de production ont été estimés en se référant aux coûts locaux pour la période de septembre 2024 à juin 2025, tandis que les prix des produits utilisés se réfèrent au prix du marché local à la période du mois de juillet 2025. Le coût de location du terrain n'a pas été inclus dans le terme des coûts parce que le terrain était une propriété propre de l'Université du Burundi. Le coût de la dolomie est calculé en multipliant la quantité appliquée avec les prix en vigueur au cours de l'année culturale 204-2025, les prix par sac de 50 kg de FOMI-Imbura, FOMI-Totahaza et de la dolomie étant respectivement de 105235 FBU, 91965 FBU et 22863 FBU. Les coûts des semences du haricot et du maïs sont ceux qui sont applicables à l'ISABU qui nous les a fournies en raison de 1800 FBU/kg pour les deux cultures, la quantité semée étant de 100 kg de haricot et de 16 kg de maïs par hectare. Le coût du fumier est de 200.000 FBU par benne de 5 tonne ; ce qui fait 400.000 FBU par 10 T/ha. Ce prix a été aussi retenu pour les composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*. Les produits phytosanitaires appliqués sur le haricot et le maïs étaient respectivement le ridomyl et dudufenos. Ces derniers ont coûté 3200 FBU chacun. La main d'œuvre a été payée à 5000 FBU par homme-jour en raison de 1 a/HJ pour le labour de la saison 2023B et 2 a/HJ pour le labour des autres saisons culturales, 3 a/HJ pour le sarclage, le semis ou la récolte du maïs, 5 a/HJ pour la récolte du haricot et 25 a/HJ pour l'application des produits phytosanitaires. Le coût des opérations de séchage et d'égrainage du maïs est 120 FBU/kg de grains.

La valeur de la production a été obtenue en multipliant le rendement à l'hectare par les prix observés sur marché local qui sont 3500 FBU et 1700 FBU respectivement pour le haricot et pour le maïs. Les valeurs de la valeur de la production et les coûts de production ont alors été utilisés pour le calcul du rapport valeur sur coût à l'aide de la formule suivante :

$$V/C = \frac{\text{Volume de production} \times \text{prix unitaire}}{\text{somme des dépenses relatives à la production}}$$

Ce rapport a été calculé saison par saison et pour toute la période de deux années culturales. Les résultats ont été interprétés en tenant compte de la norme de Young (1989) qui considère qu'une pratique agricole est rentable lorsque le rapport de la valeur de la production sur le coût de la production est supérieur ou égal 2.

3. PRESENTATION DES RESULTATS

3.1. Caractéristiques du sol du site d'essai

Le sol du site de Zege est un ferralsol selon la carte des sols de texture argileuse, ayant les caractéristiques physico-chimiques suivantes (Tableau 1) :

- Une texture argileuse, classe de texture obtenue en projetant les pourcentages en argile, limon et sable sur le triangle textural du département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA) en recourant au logiciel TALWIN mis au point par Christopher et Mokhtaruddin (1996),
- Un sol fortement acide Motsara et Roy (2008) ($4,6 < \text{pH} < 5,5$),
- une teneur normale en matière organique selon Tessens et Gourdin (1993), c'est-à-dire un pourcentage en carbone organique comprise entre 1 et 3,68%
- une teneur faible en azote (teneur comprise entre 0,1 et 0,2% selon (Landon, 1991, Tessens et Gourdin, 1993)
- Une teneur tellement faible en phosphore qu'elle est indétectable par les appareils de laboratoire.
- Une teneur faible en Ca selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) (comprise entre 0,2 et 4,0 cmolc/kg),
- Une teneur moyenne en Mg selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) (comprise entre 0,2 et 0,5 cmolc/kg),
- Une teneur faible à très faible en K selon Landon (1991) et Tessens et Gourdin (1993) ($< 0,2$ cmolc/kg)

- Une capacité d'échange cationique effective, calculée par la somme des teneurs de tous les cations échangeables, de très faible (de 2,53 cmolc/kg) ; indiquant un faible pouvoir de rétention des nutriments par ce sol.
- Une capacité d'échange cationique mesurée avec la méthode Metson (à acétate d'ammonium à pH 7) qui est de loin plus élevée que la capacité d'échange cationique effective (CECE) (CEC de 7,13 cmolc/kg et CECE de 2,53 cmolc/kg). Cette grande différence entre les deux paramètres justifie que le sol du site expérimentale regorge des constituants dominés par les charges variables dont la quantité de charges négatives augmentent avec l'augmentation du pH ;
- Une grande saturation du complexe d'échange par l'aluminium ; valeur du taux de saturation de 56,50 % calculée par la formule de calcul de m (%) = Al éch *100/CECE
- Une désaturation très poussée en bases (Ca, Mg, K et Na), matérialisée par un taux de saturation en bases de 23,79%.

En tenant compte de ses caractéristiques ci-haut montrées, on conclut grosso modo que le sol du site d'essai de Zege est un sol fortement acide, très désaturé en bases et très concentré en aluminium et à très faible fertilité chimique. Des solutions pour récupérer ce sol pour l'agriculture sont les actions combinées de chaulage, d'application de la matière organique et de fertilisation chimique.

Le chaulage permettra d'augmenter le pH, de neutraliser l'aluminium échangeable et d'en augmenter la CEC. L'enrichissement en matière organique permettra d'augmenter la CEC de ce sol et d'optimiser les effets des engrais chimiques.

Tableau 1. Paramètres physico-chimiques du sol d'expérimentation

pH-H ₂ O (1/5)	PH-KCl (1/5)	CE (µS/ cm)	CO (%)	N (%)	P-Olsen (mg/kg)	CEC (Méthode Metson) et Cations échangeables (cmolc. kg ⁻¹)							Granulométrie		
						CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
4,8	4,13	24,5	1,43	0,131	0	7,13	0,214	0,274	0,079	0,035	1,43	0,499	65,7	8,75	25,55

3.2. Composition chimique des fumures organiques utilisées

La composition chimique des composts utilisés pour l'essai est montrée au Tableau 2. En analysant ces résultats, nous remarquons que seules les teneurs en azote des fumiers de vache et de chèvre sont suffisantes pour la production agricole. Selon Baker (1997), pour qu'un fertilisant organique soit qualifié de bonne qualité pour la fertilisation des cultures, il faut que sa teneur en azote total soit supérieure à 1%.

Le rapport C/N des fumures organiques utilisées dans cet essai, sauf le compost de *Tithonia diversifolia*, est compris entre 10 et 15. D'après Namkoong et al. (1999), ces trois fumures sont matures, tandis que le compost de *Tithonia diversifolia* est instable et à faible dose de composés humifères puisqu'ils présentent des valeurs de C/N inférieures à 10 (Tahraoui, 2016).

De même, les trois fumures (fumiers de vache et de chèvre et compost de *Lantana camara*) contiennent des teneurs en potassium suffisantes à largement suffisantes puisqu'elles se situent dans ou au-delà de l'optimum de 0,4 et 1% M.S, recommandé par la FAO et l'AFNOR (Toundou, 2016).

Tableau 2. Caractéristiques chimiques des fumures organiques utilisées dans l'essai de Zege

N° d'ordre	N Labo	Type de fumure	pH	CE (µS/cm)	% CO	% N	% CaO	% MgO	% K ₂ O	% Na ₂ O
1	M 1702	Fumier de vache	8,76	8120	19,1	1,87	1,42	1,14	3,15	0,083
3	M 1704	Fumier de chèvre	9,43	10850	29,1	2,53	2,75	1,663	5,14	0,243
4	M 1705	Compost de <i>Tithonia diversifolia</i>	7,69	1591	2,09	0,324	0,322	0,1341	0,464	0,013
5	M 1706	Compost de <i>Lantana camara</i>	7,34	733	6,63	0,640	0,341	0,1710	0,270	0,014

3.3. Effet interactif de la dolomie et des fumures organiques sur le rendement du haricot

3.3.1. Culture du haricot au cours de la saison 2023B

3.3.1.1. Indicateur de survie des plants

Le taux moyen de survie des plants de haricots de la variété rufutamadeni au cours de la saison A 2023 compris entre 33, 7±17,04 et 60,7±10,3% (Tableau 3). Le taux le plus élevé a été observé dans le traitement de 4 T/ha de dolomie combiné à 10 T/ha de fumure de vache (T12) tandis que le taux de survie le plus faible a été observé dans le traitement amendé avec 10 T/ha de fumure de chèvre sans dolomie (T3). Ce qui suggère que la fumure de vache combinée à 4 T/ha de chaux a un effet très favorable sur la survie des plantes, tandis que les traitements sans fumure organique (T1, T6, T11) présentent les taux de survie les plus faibles.

L'ANOVA du taux de survie montre le traitement T12 (10 T/ha de fumier de vache et 4 t/ha de dolomie) est significativement différent des traitements T3 (10 T/ha de fumier de chèvre et 0 t/ha de dolomie), T6 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de dolomie), T1 (0 T/ha de fumure organique et 0 T/ha de dolomie), T8 (10 T/ha de fumier de chèvre et 2 T/ha de dolomie), T4 (10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia* et 0 t/ha de dolomie) et T5 (10 T/ha de compost de *Lantana camara* et 0 T/ha de dolomie). Cette discrimination des traitements montre clairement que les parcelles non chaulées présentent des taux de survie du haricot qui sont bas, à l'exception de celles au fumier de vache (T2) qui se classe parmi les meilleurs pour ce paramètre avec un taux de survie de 55,00±13,00 %.

Dans le groupe des traitements qui ont connu une application de 2 T/ha de dolomie, on constate que celui du fumier de chèvre (T8) et celui du sol non chaulé (T6) se classent parmi les mauvais traitements et ne diffèrent pas significativement du témoin intégral (T1).

Tableau 3. Taux de levée des plants de haricot

Traitement	Taux de survie (%)
T1 : Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	35,33±6,81d
T2 : 10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	55,00±13,00abc
T3 : 10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	33,67±17,04d
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	40,33±17,21bcd
T5 : 10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	40,67±6,66bcd
T6 : Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	34,67±10,69d
T7 : 10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	50,67±14,29abcd
T8 : 10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	36,33±0,58cd
T9 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	57,67±18,48ab
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	45,33±9,45abcd
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	47,00±12,49abcd
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	60,67±10,26a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	50,33±11,59abcd
T14:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de dolomie	57,67±4,04ab
T15:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de dolomie	45,67±6,81abcd

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.1.2. Paramètres de rendement du haricot

3.3.1.2.1. Nombre de gousses par plant

Le nombre moyen de gousses par plant varie de 7,66 à 4,39 (Tableau 4) ; ces valeurs extrêmes étant respectivement celles des traitements témoin (T1) et du traitement au fumier de chèvre avec 0 T/ha de dolomie (T3). Pour ce paramètre, les traitements se rangent par ordre décroissant comme suit : T1 (D0-TE) > T13 (D4-FC) > T11 (D4-TE) > T5 (D0-LC) > T9 (D2-TD) > T14 (D4-TD) > T6 (D2-TE) > T8 (D2-FC) > T4 (D0-TD) > T10 (D2-LC) > T12 (D4-FV) > T15 (D4-LC) > T2 (D0-FV) > T7 (D2-FV) > T3 (D0-FC).

L'ANOVA du nombre de gousses par plant de haricot montre l'existence de deux groupes de moyennes homogène qui se chevauchent. Cette analyse montre que les traitements T10 (D2-LC), T12 (D4-FV), T15 (D4-LC), T9 (D2-TD), T11 (D4-TE) et T6 (D2-TE) présentent des nombres de gousses par plant qui sont significativement plus élevés que celui du traitement T13. L'autre constat est que les effets de la dose de dolomie et du type de fumure organique ne sortent pas clairement.

3.3.1.2.2. Nombre des graines par gousse

Le nombre moyen de graines par gousses varie de 2,06 à 3,07 (Tableau 4). Le plus grand nombre de graines par gousse est observé dans le traitement T10 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Lantana camara*), tandis que le plus petit nombre de graines par gousse est observé dans le traitement T13 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre). L'ANOVA de cette variable montre que les traitements se classent dans deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Elle montre également que les traitements T10 (10 T/ha du compost de *Lantana camara* et 2 T/ha de dolomie), T12 (10 T/ha du fumier de vache et 4 T/ha de dolomie), T15 (10 T/ha du compost de *Lantana camara* et 4 T/ha de dolomie), T9 (10 T/ha du compost de *Tithonia diversifolia* et 2 T/ha de dolomie), T11 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de dolomie), T6 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de dolomie) présentent des nombres de graines par gousses qui sont significativement plus grands que celui du traitement T13 (10 T/ha du fumier de chèvre et 4 T/ha de dolomie).

Tableau 4. Nombre de gousses et nombre de graines

Traitement	Nombre de gousses par plant	Nombre de graines par gousse
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	4,39±0,37ab	2,60±0,26ab
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	7,15±2,76ab	2,60±0,30ab
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	7,66±1,55ab	2,80±0,56ab
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	6,02±1,87ab	2,77±0,49ab
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	5,16±2,47ab	2,77±0,47ab
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	5,83±1,35a	2,93±0,06a
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	7,5±2,11ab	2,70±0,56ab
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	5,93±2,9ab	2,47±0,86ab
T9:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	5,53±0,29a	2,93±0,12a
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	6,51±0,7a	3,07±0,25a
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	5,05±2,26a	2,93±0,25a
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	6,89±0,54a	3,03±0,46a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	4,845±2,07b	2,07±0,12b
T14:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de dolomie	5,69±0,86ab	2,50±0,62ab
T15:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de dolomie	6,91±0,7a	3,03±0,38a

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement \pm écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.1.2.3. Production en biomasse

La biomasse moyenne racinaire par traitement pesée après la récolte comprise entre 57,00 et 303,00 kg/ha (Tableau 5), les deux valeurs extrêmes étant celles des traitements T6 (2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique) et T2 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumure de vache). L'ANOVA de cette variable montre que la biomasse enregistrée dans le traitement T2 est significativement plus élevée que celles obtenues dans tous les autres traitements conduits sans dolomie (T1, T3, T4 et T5), celles des traitements à 2 T/ha de dolomie combinés avec les composts de *Tithonia diversifolia* (T9) et de *Lantana camara* (T10) ou conduit sans fumure organique (T6), et celles des traitements à 4 T/ha de dolomie combinés avec le fumier de vache (T12) et avec les composts de *Tithonia diversifolia* (T14) et de *Lantana camara* (T15).

La biomasse aérienne varie de 344 et 1166 kg/ha (Tableau 5). Cette valeur la plus élevée est celle du traitement T13 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre), tandis que la valeur la plus faible est celle du traitement T6 (2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique). L'analyse statistique montre que les biomasses aériennes obtenues dans les parcelles sans fumure organique et au plus 2 T/ha (T1 et T6) sont significativement plus petites que celles des traitements T13 (4 T/ha de dolomie et 10 t/ha de fumier de chèvre et) et T2 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache), T7 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache), T12 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache) et T14 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*). L'examen de l'ordre de classement des traitements pour cette variable montre que ce sont les traitements aux fumiers de vache et de chèvre qui occupent les premières places tandis que les traitements non chaulés (à l'exception de celles aux fumiers de vache et de chèvre) affichent des biomasses aériennes les plus basses.

La biomasse totale varie de 401,33 à 1422,33 kg/ha (Tableau 5), les deux valeurs extrêmes étant celles des traitements T6 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de dolomie) et T13 (10 T/ha de fumier de chèvre et 4 T/ha de dolomie). Les mêmes tendances observées pour la biomasse aérienne le sont pour la biomasse totale. Les rapports biomasse racinaire/aérienne sont statistiquement similaires variant entre 0,16 et 0,29 (Tableau 5). Le rapport le plus élevé est obtenu au traitement T1, tandis que le rapport le plus petit est celui du traitement T15. Il n'existe pourtant pas de différence significative entre les traitements pour ce paramètre.

Tableau 5. Production de la biomasse du haricot cultivé au cours de la saison B en 2023

Traitement	BR (kg/ha)	BA (kg/ha)	BT (kg/ha)	BR/BA
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	91,67±6,66c	356,33±126,73f	448,00±128,31e	0,29±0,13a
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	303,00±262,03a	1041,67±481,91ab	1344,67±741,57a	0,26±0,11a
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	119,33±82,71c	582,00±297,88cdef	701,33±375,37bcde	0,20±0,05a
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	93,33±56,90c	447,00±204,59ef	540,33±250,64de	0,20±0,10a
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	96,00±33,41c	451,33±94,45ef	547,33±74,90de	0,23±0,13a
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	57,00±27,22c	344,33±122,85f	401,33±148,78e	0,16±0,03a
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	181,67±38,53abc	944,67±267,05abc	1126,33±295,37ab	0,20±0,03a
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	157,67±43,09bc	704,00±163,36cdef	861,67±196,67bcde	0,23±0,05a
T9:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	104,67±32,35c	660,67±248,84cdef	765,33±227,83bcde	0,18±0,10a
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	116,00±34,18c	526,00±38,11ef	642,00±70,68cde	0,22±0,05a
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	108,33±29,94c	538,00±92,73def	646,33±113,93cde	0,20±0,05a

T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	162,67±50,33bc	902,67±160,62abcd	1065,33±157,09abc	0,18±0,06a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	256,67±11,37ab	1165,67±227,28a	1422,33±216,08a	0,23±0,06a
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	150,67±83,58bc	803,33±193,09abcde	954,00±266,65abcd	0,18±0,08a
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	90,33±48,13c	586,67±195,24cdef	677,00±228,32bcde	0,16±0,07a

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.1.2.4. Poids de mille graines

Le poids de mille graines de haricot le plus élevée (413 g) a été obtenu dans le traitement témoin T1 (0 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique), tandis que celui le plus petit (288 g) a été mesuré dans le traitement T8 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre) (Tableau 6). L'analyse statistique conduit sur cette variable montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements pour ce paramètre.

3.3.1.2.5. Rendement en kg/ha

Le rendement en graines de haricot par hectare varie de 398 à 1141,7 kg/ha (Tableau 6); valeurs obtenues respectivement dans les traitements T8 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre) et T12 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache) respectivement.

Par ordre croissant les traitements se rangent comme suit T8 (D2-FC) < T1 (D0-TE) < T13 (D4-FC) < T5 (D0-LC) < T6 (D2-TE) < T11 (D4-TE) < T3 (D0-FC) < T4 (D0-TD) < T14 (D4-TD) < T10 (D2-LC) < T9 (D2-TD) < T2 (D0-FV) < T15 (D4-LC) < T7 (D2-FC) < T12 (D4-FV).

L'ANOVA du rendement en graines par hectare montre que le traitement au fumier de vache et 4 t/ha de dolomie présente un rendement qui est significativement plus élevé que ceux des traitements T8 (D2-FC), T1 (D0-TE), T13 (D4-FC), T5 (D0-LC), T6 (D2-TE), T11 (D4-TE), T3 (D0-FC) et T4 (D0-TD). Le constat est que pour une même dose de dolomie, le traitement au fumier de vache l'emporte sur les autres, tandis que celui au fumier de chèvre occupe la dernière place pour les doses de 2 et 4 T/ha de dolomie.

3.3.1.2.6. Indice de récolte

Les résultats montrent que les traitements aux rendements les plus élevés présentent des indices de récolte les plus élevés (Tableau 6). Cette variable s'étend de 0,26 (T13- 4 T/ha de dolomie et 10 t/ha de fumier de chèvre) à 0,60 (T15 - 4 T/ha de dolomie et 10 t/ha de compost de Lantana camara). L'ANOVA de cet indice montre que les traitements sont T15 (D4-LC), T6 (D2-TE), T10 (D2-LC), T4 (D0-TD), T12 (D4-FV), T9 (D2-TD), T1 (D0-TE) et T3 (D0-FC) affichent des indices de récolte qui sont significativement plus élevés que ceux des traitements T13 (D4-FC) et T8 (D2-FC).

Tableau 6. Poids de mille graines, rendement en graines par hectare et indice de récolte

Traitement	PMG (g)	Rendement (kg/ha)	IR
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	412,67±70,32a	416,67±125,73de	0,54±0,08a
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	350,67±36,36abc	863,33±272,09ab	0,46±0,12ab
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	361,00±8,72ab	608,33±282,90bc	0,52±0,16a
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	377,33±27,02ab	650,00±361,90bc	0,58±0,06a
T5:10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	331,67±17,24bc	475,00±241,92cde	0,50±0,13ab
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	357,67±15,95ab	518,33±188,24bcde	0,60±0,01a
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	357,33±20,98abc	878,33±285,06ab	0,48±0,13ab
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	288,33±37,55c	398,33±262,50e	0,34±0,18bc
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	352,00±7,55abc	805,00±156,20abcd	0,56±0,04a

T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	352,33±27,01abc	781,67±22,55abcde	0,60±0,01a
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	326,67±58,86bc	523,33±196,36bcde	0,49±0,11ab
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	362,00±15,52ab	1141,67±152,51a	0,56±0,06a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	328,33±107,45bc	456,67±289,67de	0,26±0,12c
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	358,00±10,15ab	766,67±326,24abcde	0,48±0,12ab
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	364,67±10,41ab	866,67±194,44abc	0,60±0,07a

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.2. Culture du haricot au cours de la saison 2024B

3.3.2.1. Indice de survie des plants de haricot

Le taux moyen de survie des plants de haricot cultivé au cours de la saison 2024B est compris entre 21,33 et 74,33 (Tableau 7); valeurs enregistrées respectivement pour le traitement témoin (T1) et le traitement T12 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache). L'ANOVA du taux de survie du haricot de 2024B montre un effet significatif des traitements sur le taux de survie et qu'il existe de trois groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Ce test montre que les traitements T12 présente un taux de survie qui est significativement plus élevé que celui observé dans les traitements T1 (témoin) et T5 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de Lantana camara).

Tableau 7. Taux de survie du haricot pendant la saison 2024B

Traitement	Taux de Levée (%)
T1 : Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	21,33 ±13,05c
T2 : 10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	61,00±24,88ab
T3 : 10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	65,33±3,21ab
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	52,67±38,85ab
T5 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	43,67±5,03bc
T6 : Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	50,33±1,15ab
T7 : 10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	56,67±12,42ab
T8 : 10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	60,33±8,62ab
T9 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	65,33±15,89ab
T10: 10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	52,00±7,94ab
T11: Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	50,00±17,35ab
T12: 10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	74,33±8,96a
T13: 10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	62,00±3,61ab
T14: 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	53,00±12,12ab
T15: 10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	63,33±12,22ab

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.2.2. Paramètres de rendement

3.3.2.2.1. Nombre de gousses par plant

Le nombre moyen de gousses par plant varie de 2,05 à 7,16 (Tableau 8); valeurs enregistrées respectivement pour les traitements T1 (témoin) et T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*). L'ANOVA de ce paramètre montre une discrimination des traitements en 5 groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le traitement T4 (D0-TD) présente un nombre de gousse par plant qui est significativement plus élevé que celui des traitements T1 (D0-TE), T5 (D0-LC) et T6 (D2-TE), T10 (D2-LC), T9 (D2-TD), T3 (D0-FC). Il convient de signaler que les traitements sans application de dolomie mais avec du compost de *Tithonia diversifolia* (T4) et du fumier de vache (T2) se classe dans le premier groupe avec tous les traitements à 4 T/ha de dolomie.

3.3.2.2.2. Nombre de graines par gousse

Le nombre de graines par gousse varie de de 2,31 et 3,24 (Tableau 8) ; valeurs recueillies respectivement dans les traitements T8 (D2-FC) et T10 (D2-LC). L'analyse statistique montre l'existence de quatre groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Les traitements T10 (D2-LC) et T14 (D4-TD) diffèrent significativement des traitements T8 (D2-FC), T5 (D0-LC), T6 (D2-TE), T1 (D0-TE), T2 (D0-FV) et T3 (D0-FC). Ces meilleurs traitements ne diffèrent pas significativement des traitements On remarque que les meilleurs traitements sont ceux qui ont connu une application de 4 T/ha de dolomie et de 2 T/ha de dolomie (à l'exception des traitements T6 et T8) se classent dans le premier groupe.

Tableau 8. Nombre de graines et nombre de gousses

Traitement	NG/plant	NGr/plant	NGr/gousse
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	2,05±0,51e	5,25±1,69e	2,53±0,24cd
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	5,88±1,09ab	15,19±4,67abcd	2,59±0,59bcd
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	4,72±0,32bcd	12,39±1,77bcde	2,62±0,22bcd
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	7,16±3,67a	21,98 ± 11,80a	3,05±0,33abc
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	3,15±0,45de	7,61±1,74de	2,40±0,22d
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	3,47±0,58cde	8,36±0,79cde	2,44±0,34d
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	5,14±2,00abcd	14,15±5,21abcd	2,76±0,13abcd
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	5,50±1,01abcd	12,20±2,98bcde	2,31±0,83d
T9:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	4,51±1,30bcd	12,66±4,15bcde	2,78±0,14abcd
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	4,45±0,58bcd	14,44±2,71abcd	3,23±0,20a
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	5,12±0,08abcd	14,60±1,49abcd	2,85±0,25abcd
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	5,69±0,72abc	18,01±4,19ab	3,15±0,38ab
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	5,57±0,75abc	16,04±3,11abc	2,86±0,19abcd
T14:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de dolomie	5,60±1,76abc	18,60±8,33ab	3,23±0,45a
T15:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de dolomie	5,74±2,01abc	16,36±6,45abc	2,82±0,12abcd

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.3.2.2.3. Production en biomasse et rendement en graines

La biomasse totale produite s'étend de 93 à 692 kg MS/ha, valeurs obtenues dans les traitements T1 (D0-TE) et T2 (D0-FV) (Tableau 9). La comparaison des moyennes par la méthode de la plus petite différence significative au seuil de 5% montre l'existence de cinq groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Tous les traitements à 4

t/ha de dolomie (sauf le traitement T11 : D4-TE) et tous les traitements à 2 T/ha (sauf le traitement T6 : D2-TE et T10 : D2-LC) se classent dans le premier groupe. Parmi les traitements qui n'ont pas connu d'application de dolomie, les traitements à fumier de vache et de chèvre (T2 et T3) et le traitement au compost de *Tithonia diversifolia* se classe également dans le premier groupe de moyenne homogène pour la biomasse totale.

Le poids de mille graines de haricot varie de 292 à 398 g (Tableau 9), valeurs enregistrées dans les traitements T3 (D0-FC) et T1 (D0-TE). Bien qu'il y ait de différence significative générée par l'ANOVA, l'effet de la dose de la chaux et du type de fumure organique sur le poids de mille graines n'est pas bien tracé. Le rendement en graines varie de 100 à 945 kg/ha (Tableau 9). Ces valeurs extrêmes sont respectivement celles des traitements T1 (D0-TE) et T12 (D4-FV). L'ANOVA du rendement en grains montre l'existence d'une différence significative entre les traitements. Le test de la plus petite différence significative discrimine les traitements en cinq groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le premier groupe rassemble tous les traitements à 4 T/ha de dolomie, les traitements avec 2 T/ha de dolomie combinés avec les fumiers de vache (T7) et de chèvre (T8) et avec compost de *Tithonia diversifolia* (T9), mais aussi les traitements sans dolomie mais avec le compost de *Tithonia diversifolia* (T4) et le fumier de vache (T2).

Tableau 9. Production en biomasse et rendement en graines

Traitement	BTS (kg/ha)	PMG (g)	Rdt en grains (kg/ha)
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	93,33±27,54e	398,28±73,21a	100,00±44,44e
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	691,67±232,29a	296,36±40,49b	661,67±272,96abc
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	485,00±65,57abc	272,11±8,32b	550,00±73,65bcd
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	461,67±251,06abcd	308,88±28,57b	686,67±425,16abc
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	235,00±47,70de	316,25±29,91b	260,00±57,66de
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	293,33±45,09cde	331,97±93,08ab	348,33±101,04cde
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	490,00±158,75abc	281,06±21,68b	598,33±378,46abcd
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	466,67±87,37abcd	312,00±39,35b	568,33±143,64abcd
T9:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	460,00±183,58abcd	306,36±5,03b	668,33±338,28abc
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	381,67±90,05bcd	274,45±28,35b	516,67±146,83bcd
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	430,00±170,37bcd	313,16±8,82b	588,33±263,93abcd
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	673,33±46,46a	288,01±7,14b	945,00±75,66a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	523,33±53,46abc	288,85±2,56b	713,33±110,94abc
T14:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de dolomie	541,67±222,34ab	272,91±56,73b	705,00±389,36abc
T15:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de dolomie	561,00±119,30ab	312,19±13,29b	766,67±115,90ab

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.4. Effet interactif de la dolomie et des fumures organiques sur le rendement du maïs

3.4.1. Culture du maïs au cours de la saison 2024A

3.4.1.1. Nombre de grains

Le nombre moyen de grains par épi varie de 407,42 à 1246,88 (Tableau 10) ; les valeurs extrêmes étant celles des traitements de T6 (2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique) et T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*) (Tableau 10). L'ANOVA de cette variable montre qu'il y a une différence significative entre les traitements et discrimine les traitements en six groupes de moyennes homogènes. Le premier groupe rassemble tous les traitements à la dose de 4 T/ha de dolomie, tous les traitements de 2 T/ha (sauf les traitements

T9 et T6) ainsi que deux traitements sans dolomie à savoir T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*) et T3 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre). Ce test montre également que le dernier groupe est constitué par le traitement sans dolomie ni fumure organique (témoin T1), les traitements sans dolomie (à l'exception du traitement à compost de *Tithonia diversifolia* (T4)), les traitements à 2 T/ha de dolomie sans fumure organique (T6) ou avec composts de *Tithonia diversifolia* (T9) ou de *Lantana camara* (T10) ainsi que le traitement à 4 T/ha de dolomie et fumier de chèvre (T13).

Le nombre de grains par épi obtenu au traitement T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*) est significativement plus élevé que ceux qui sont enregistrés dans le traitement témoin (T1), dans les traitements sans dolomie fumier de vache (T2) ou avec compost de *Lantana camara* (T5) et dans le traitement à 2 t/ha de dolomie sans fumure organique (T6).

Tableau 10. Nombre de grains par épi

Traitement	Nombre de grains par épi
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	585,00±170,66cdef
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	554,63±336,17def
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	942,67±225,95abcdef
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	1246,88±91,93a
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	470,75±438,08ef
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	407,42±357,22f
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	1023,50±417,47abcde
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	1102,10±44,25abccd
T9:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 2 T/ha de dolomie	638,60±315,76bcdef
T10:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 2 T/ha de dolomie	741,63±469,99abcdef
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	1182,50±386,26ab
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	1146,40±223,69abc
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	865,33±679,92abcdef
T14:10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 4 T/ha de dolomie	1085,50±265,09abccd
T15:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 4 T/ha de dolomie	1140,42±279,25abc

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.4.1.2. Biomasse, poids de mille grains, rendement en grains et indice de récolte

Les valeurs de la biomasse aérienne, du poids de mille grains, du rendement en grains par ha et de l'indice de récolte sont montrées dans le tableau 11. Les biomasses moyennes aériennes sont comprises entre 4881,00 et 14021,50 kg/ha, ces deux valeurs extrêmes étant celles du traitement témoin (T1 : 0 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique) et du traitement à la dose de 4 t/ha combinée au fumier de chèvre (T13).

L'ANOVA de la biomasse montre que le traitement à la plus grande biomasse (T13) diffère significativement des traitements presque tous les traitements T1 (0 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique), T6 (2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique), T5 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Lantana camara*), T10 (2 T/ha de dolomie et 0 t/ha de fumure organique), T3 (0 T/ha de chaux et 10 T/ha de fumier de chèvre), T9 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*) et T7 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache). Il est à noter que ce même traitement à la dose de 4 T/ha et fumier de chèvre (T13) ne diffère pas significativement aux autres traitements à dose de 4 T/ha de dolomie, ni aux traitements T8 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre), T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*) et T2 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache).

Le poids moyen de mille grains du maïs à l'état sec varie de 244,44 à 355,56 (Tableau 11) ; les valeurs extrêmes étant celles des traitements T6 et T9. L'ANOVA de cette variable montre l'existence de trois groupes de moyennes

homogènes qui se chevauchent. Le premier groupe est constitué par les traitements T9 (D2-TD), T14 (D4-TD), T7 (D2-FV), T15 (D4-LC), T1 (D0-TE), T12 (D4-FV), T8 (D2-FC), T10 (D2-LC), T13 (D4-FC), T2 (D0-FV) et T3 (D0-FC). Le deuxième groupe est celui des traitements T14 (D4-TD), T7 (D2-FV), T15 (D4-LC), T1 (D0-TE), T12 (D4-FV), T8 (D2-FC), T10 (D2-LC), T13 (D4-FC), T2 (D0-FV), T3 (D0-FC), T11 (D4-TE) et T4 (D0-TD). Le dernier groupe rassemble les traitements T15 (D4-LC), T1 (D0-TE), T12 (D4-FV), T8 (D2-FC), T10 (D2-LC), T13 (D4-FC), T2 (D0-FV), T3 (D0-FC), T11 (D4-TE), T4 (D0-TD), T5 (D0-LC) et T6 (D2-TE).

De ce qui précède, on constate que l'effet de la dose de dolomie ni du type de fumure organique sur le poids de mille grains n'est pas perceptible.

Le rendement en grains par hectare varie de 2122 à 5407 kg/ha (Tableau 11). Ces valeurs extrêmes de rendement sont celles des traitements T6 (D2-TE) et T7 (D2-FV). L'ANOVA de ce paramètre montre un effet significatif du facteur étudié (combinaison dose de dolomie et types de fumure organique) sur le rendement du haricot ($p < 0,05$). Elle montre aussi l'existence de trois groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le premier groupe est celui des traitements T7 (D2-FV), T8 (D2-FC), T3 (D0-FC), T12 (D4-FV), T14 (D4-TD), T13 (D4-FC), T11 (D4-TE), T15 (D4-LC), T9 (D2-TD), T4 (D0-TD), T1 (D0-TE), T10 (D2-LC) et T2 (D0-FV). Le deuxième groupe est constitué par les traitements du premier groupe auxquels on retranche le traitement T7 (D2-FV) et on ajoute le traitement T5 (D0-LC).

Le troisième groupe rassemble tous les traitements du deuxième groupe auxquels on retire les traitements T8 (D2-FC) et T3 (D0-FC) et on ajoute le traitement T6 (D2-TE). De cette discrimination tracée par l'ANOVA découle que les traitements T7 (D2-FV), T8 (D2-FC) et T3 (D0-FC) (qui ne font pas partie du troisième groupe) se distinguent nettement des autres traitements parce qu'ils diffèrent significativement du traitement au plus faible rendement en grains T6 (D2-TE).

L'indice de récolte du maïs varie de 0,25 à 0,46 (Tableau 11) ; les deux valeurs extrêmes étant celles des traitements T13 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha fumier de chèvre) et T3 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha fumier de chèvre). L'ANOVA de cette variable montre qu'il n'y a pas de différence significative des traitements sur l'indice de récolte. Les traitements se rangent par ordre décroissant d'indice de récolte comme suit T3 (D0-FC) > T1 (D0-TE) > T7 (D2-FV) > T9 (D2-TD) > T11 (D4-TE) > T14 (D4-TD) > T8 (D2-FC) > T5 (D0-LC) > T15 (D4-LC) > T12 (D4-FV) > T10 (D2-LC) > T2 (D0-FV) > T4 (D0-TD) > T6 (D2-TE) > T13 (D4-FC). En analysant ce classement, on constate qu'aucune dose de dolomie et qu'aucun type de fumure organique ne se distingue des autres pour l'indice de récolte du maïs.

Tableau 11. Biomasse aérienne (kg/ha), poids de mille grains (g), rendement en grains (kg/ha) et indice de récolte

Traitement	BA (kg/ha)	PMG (g)	Rdt en grains (kg/ha)	IR
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	4881,00±1499,98d	311,11±38,49abc	3649,20±570,69abc	0,44 ± 0,10a
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	9051,33±4552,76abcd	288,89±38,49abc	3080,42±1810,65abc	0,28±0,18a
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	7285,33±4803,96bcd	288,89±38,49abc	4833,09±609,09ab	0,46±0,25a
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	10411,25±560,71abc	266,67±0,00bc	3803,53±941,61abc	0,27±0,04a
T5:10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	5962,17±1869,48cd	244,44±38,49c	2629,09±1497,53bc	0,31±0,19a
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	5082,50±3815,13d	244,44±38,49c	2121,61±1790,17c	0,26±0,10a
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	8515,33±4063,93bcd	333,33±0,00ab	5406,90±313,79a	0,42±0,13a
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	11253,67±1459,99ab	311,11±38,49abc	5157,69±308,59ab	0,32±0,03a
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	8110,25±2869,57bcd	355,56±38,49a	4294,74±363,56abc	0,36±0,08a

T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	6901,67±2471,06bcd	288,89±38,49abc	3105,37±2032,23abc	0,29±0,08a
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	9551,17±2593,27abcd	266,67±0,00bc	4542,76±1278,09abc	0,32±0,09a
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	11339,50±753,98ab	311,11±38,49abc	4682,60±646,98abc	0,29±0,03a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	14021,50±4862,46a	288,89±138,78abc	4550,91±3711,55abc	0,25±0,18a
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	10490,33±3650,05abc	333,33±0,00ab	4666,55±347,69abc	0,32±0,07a
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	10002,33±2671,41abcd	311,11±76,98abc	4509,36±2177,25abc	0,31±0,11a

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.4.2. Culture du maïs au cours de la saison 2025A

3.4.2.1. Hauteur moyenne des plants

La hauteur moyenne des plants par traitement sont montrées au tableau 12. Ce paramètre de croissance varie de 187,56 à 276,11 cm. La hauteur moyenne la plus petite est observée dans le traitement témoin (T1), tandis que la hauteur la plus élevée est enregistrée dans le traitement T12 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache). L'ANOVA de la hauteur montre une différence significative entre les traitements ($p=0,03$). La hauteur des plants du traitement 12 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache) est significativement plus grande que les hauteurs des plants des traitements mesurées des traitements T1 (témoin) et T5 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de Lantana camara), T4 (0 T/ha de dolomie et compost de Tithonia diversifolia), T6 (2 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique), T9 (2 T/ha de dolomie et compost de Tithonia diversifolia), T11 (4 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique), T3 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre) et T10 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de Lantana camara). Cette hauteur n'est pas toutefois significativement différente de celles des traitements T7 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache), T8 (2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre), T15 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de Lantana camara), T14 (4 T/ha de dolomie et compost de Tithonia diversifolia), T13 (4 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre) et T2 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache). De ce qui précède, on constate que tous les traitements au fumier de vache (y compris celui qui n'a pas été chaulé) et tous les traitements avec 4 T/ha de dolomie (excepté le traitement T11 qui n'a pas connu d'application de la fumure organique) et le traitement avec 2 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de chèvre sont les meilleurs pour la hauteur des plants de maïs.

Tableau 12. Hauteur des plants à la récolte (cm)

Traitement	Hauteur des plants (cm)
T1 :Témoin (0 T/ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	187,56±22,71d
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	237,11±14,51abc
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	224,89±21,75bcd
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	209,89±49,13bcd
T5:10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	196,22±14,92cd
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	211,78±7,17bcd
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	247,89±30,98ab
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	244,44±27,69ab
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	215,11±40,20bcd
T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	230,11±28,72bcd
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	216,11±17,20bcd
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	276,11±21,47a
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	237,11±13,21abc
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	240,44±25,68ab
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	241,78±18,08ab

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement \pm écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.4.2.2. Biomasse, poids de mille grains, rendement par hectare et indice de récolte

3.4.2.2.1. Biomasse aérienne sèche (kg/ha)

La biomasse aérienne du maïs par traitement s'étend de 1841,33 à 4640,83 kg/ha (Tableau 13). La plus petite biomasse est celle du T5 (0 T/ha de dolomie et compost de *Lantana camara*), tandis que la plus grande biomasse a été enregistrée au traitement T8 (2 T/ha de dolomie et 10 t/ha de fumier de chèvre). L'ANOVA de ce paramètre de rendement montre que le traitement T8 est significativement différent des traitements T13 (D4-FC), T9 (D2-TD), T3 (D0-FC), T2 (D0-FV), T11 (D4-TE), T10 (D2-LC), T6 (D2-TE), T14 (D4-TD), T1 (D0-TE) et T5 (D2-LC). Ce traitement n'est pas par contre différent des traitements T4 (D0-TD), T12 (D4-FV), T15 (D4-LC) et T7 (D2-FV).

Le poids de mille grains pesés par traitement varie de 333 à 244 g (Tableau 13). Ces poids sont respectivement ceux des traitements T12 (D4-FV) et T5 (D0-LC). L'ANOVA conduite sur ce paramètre montre l'existence de trois groupes de moyennes homogènes. Le premier groupe collectionne les traitements T12 (D4-FV), T13 (D4-FC), T2 (D0-FV), T4 (D0-TD), T8 (D2-FC), T9 (D2-TD), T15 (D4-LC), T3 (D0-FC), T7 (D2-FV) et T10 (D2-LC). Le deuxième groupe est constitué des traitements T15 (D4-LC), T3 (D0-FC), T7 (D2-FV), T10 (D2-LC), T14 (D4-TD) et T6 (D2-TE). Le troisième groupe quant à lui est formé par les traitements T10 (D2-LC), T14 (D4-TD), T6 (D2-TE), T1 (D0-TE), T11 (D4-TE) et T5 (D0-LC). L'examen de ce classement nous fait constater que tous les traitements aux fumiers de vache et de chèvre se classent dans le premier groupe. Dans le groupe des traitements à *Tithonia diversifolia*, seuls les traitements sans dolomie et à la dose de 2 T/ha de dolomie sont du premier groupe. Parmi les traitements aux composts de *Lantana camara*, seul le traitement à la dose de 4 T/ha se classe dans le premier groupe.

Le rendement en grains de maïs varie de 2223 à 4380 kg/ha (Tableau 13); valeurs enregistrées dans les traitements T1 (témoin, c'est-à-dire 0 T/ha de dolomie et 0 T/ha de fumure organique) et T7 (2 T/ha de dolomie et 10 t/ha de fumier de vache). L'ANOVA de cette variable montre qu'il y a une différence significative entre les traitements. Le plus grand rendement observé (celui de T7) est significativement plus élevé que ceux des traitements T1 (D0-TE), T5 (D0-LC) et T6 (D2-TE). De même, le plus petit rendement (observé au traitement témoin T1) n'est pas significativement différent de ceux des traitements T5 (D0-LC), T6 (D2-TE), T14 (D4-TD), T4 (D0-TD), T13 (D4-FC) et T9 (D2-TD). Cette examen laisse remarquer que les traitements au composts de *Tithonia diversifolia* ne sont pas significativement différents du mauvais traitement au plus petit rendement (T1) ni du meilleur traitement au plus grand rendement (T7). En outre tous les traitements au fumier de vache ne sont pas significativement différents du meilleur traitement pour le rendement en grains.

L'indice de récolte calculé pour tous les traitements varie de 0,49 à 0,62 (Tableau 13) ; valeurs obtenues dans les traitements T2 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de fumier de vache) et T4 (0 T/ha de dolomie et 10 T/ha de compost de *Tithonia diversifolia*). L'ANOVA de cet indice montre qu'il existe deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Elle indique également que les traitements T2, T11 et T10 sont significativement différents que les traitements T8 et T4. Bien que cette ANOVA montre un effet significatif des traitements sur cet indice, les effets de la dose de dolomie et du type de fumure organique n'apparaissent pas clairement.

Tableau 13. Biomasse aérienne (kg/ha), poids de mille grains (g) et rendement en grains (kg/ha)

Traitement	BAS (kg/ha)	PMG (g)	Rdt en grains (kg/ha)
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	1869,00 \pm 459,06cd	244,44 \pm 38,49c	2223,33 \pm 489,80d
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	2585,50 \pm 484,12bcd	333,33 \pm 0,00a	4161,67 \pm 655,25ab
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	2711,83 \pm 971,80bcd	311,11 \pm 38,49ab	3788,33 \pm 1211,67ab
T4 : 10 T/ha de compost de <i>Tithonia diversifolia</i> + 0 T/ha de dolomie	3525,33 \pm 1501,14ab	333,33 \pm 0,00a	3193,33 \pm 703,60abcd
T5:10 T/ha de compost de <i>Lantana camara</i> + 0 T/ha de dolomie	1841,33 \pm 552,05d	244,44 \pm 38,49c	2321,67 \pm 137,87cd

T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	2439,00±174,87bcd	266,67±0,00bc	2975,00±928,00bcd
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	3173,50±535,69abcd	311,11±38,49ab	4380,00±920,04a
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	4640,83±2313,28a	333,33±0,00a	4086,67±180,58ab
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	2749,00±380,46bcd	333,33±0,00a	3571,67±1323,60abcd
T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	2554,50±710,99bcd	288,89±38,49abc	3690,00±970,41ab
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	2581,83±393,41bcd	244,44±101,84c	3833,33±370,99ab
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	3362,33±884,04abc	333,33±0,00a	3668,33±265,77abc
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	2945,67±618,07bcd	333,33±0,00a	3563,33±848,08abcd
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	2423,50±691,66bcd	266,67±0,00bc	3183,33±808,72abcd
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	3279,67±381,57abcd	311,11±38,49ab	3715,00±1180,37ab

Note : Chaque valeur correspond à la moyenne de trois répétitions par traitement ± écart-type de la moyenne. Les traitements suivis de la même lettre minuscule ne sont pas significativement différents au seuil de probabilité de 5 %.

3.5. Rentabilité économique des combinaisons de la dolomie et des fumures organiques

La rentabilité économique des combinaisons des différentes doses de dolomie et des types de matières organiques testées, réalisées avec le rapport valeur sur coût est montrée aux tableaux 14 et 15. La différence entre les deux tableaux est que le tableau 14 tient compte des coûts de la main d'œuvre tandis que le tableau 15 est élaboré en considérant le contexte de la majorité d'agriculteurs burundais dont tous les travaux agricoles sont effectués par les membres de la famille gratuitement.

Pour la culture du haricot, les coûts de productions restent les mêmes pour tous les traitements sauf ceux relatifs à l'achat de la dolomie qui varient avec la dose utilisée. Le coût de labour de 500.000 FBu/ha est utilisé pour le premier défrichage réalisé au début de l'expérimentation avant la culture du haricot, tandis qu'il est fixé à 250.000 FBu/ha pour les autres saisons culturales. Pour la culture du haricot, les autres coûts s'élèvent à 1974880 FBu/ha. Ils comprennent les coûts des semences (180.000 FBu/ha), d'engrais FOMI (841.880 FBu/ha), des fumures organiques (400.000 FBu/ha), de semis (167.000 FBu), de sarclage (167.000 FBu/ha), d'application des produits phytosanitaires (52.000 FBu/ha), et de récolte (167.000 FBu/ha).

Pour le maïs, les coûts de production comprennent, outre les coûts d'achat de la dolomie qui varie avec le traitement, la main d'œuvre pour le labour (250.000 FBu/ha), le semis (167.000 FBu/ha), le sarclage (334.000 FBu), les applications de produits phytosanitaires (20.000 FBu), la récolte (167.000 FBu/ha), et les coûts liés au séchage et à l'égrainage (qui varient avec le rendement obtenu en raison de 120 F/kg de grains). Les coûts de production du maïs comprennent également les coûts des achats des semences (28800 FBu/ha), des engrais FOMI (1.504.398 FBu), des fumures organiques (400.000 FBu) et des produits phytosanitaires (32.000 FBu). Le total de ces coûts de production fixes du maïs est de 2.653.198 FBu. Pour le calcul du coût total de production du maïs, il faudra ajouter les coûts d'achats de la dolomie et de séchage et égrainage des épis à ces coûts fixes.

Tableau 14. Rapport valeur sur coût des pratiques de chaulage avec 4 doses de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) combinées ou pas avec le fumier de vache ou de chèvre, ou avec le compost de Tithonia diversifolia ou de Lantana camara

Traitement	Haricot Saison 2023B	Haricot Saison 2024B	Maïs Saison 2024A	Maïs Saison 2024A	Haricot et maïs pour toutes les saisons
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	0,51	0,13	1,86	1,19	1,03
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	1,05	0,89	1,60	2,08	1,48
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	0,74	0,74	2,36	1,92	1,57
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	0,79	0,93	1,92	1,65	1,40
T5:10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	0,58	0,35	1,39	1,24	0,96
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	0,36	0,47	1,14	1,55	0,87
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	0,61	0,81	2,59	2,17	1,56
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	0,28	0,77	2,49	2,05	1,38
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	0,56	0,90	2,14	1,82	1,34
T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	0,54	0,70	1,61	1,87	1,17
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	0,26	0,79	2,24	1,94	1,16
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	0,56	1,27	2,30	1,87	1,35
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	0,22	0,96	2,24	1,82	1,14
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	0,38	0,95	2,29	1,65	1,18
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	0,42	1,03	2,23	1,89	1,25

L'analyse de ce tableau 14 montre que pour la saison culturale du haricot de 2023B, le rapport V/C varie de 0,22 à 1,05 ; rapports obtenus dans les traitements T13 (D4-FC) et T2 (D0-FV) respectivement. Pour cette saison, seul le traitement T2 (D0-FV) a pu manifester le rapport V/C qui atteint la valeur 1 ; ce qui traduit que les fonds investis dans les autres pratiques agricoles testées ne rapportent pas de bénéfices.

Pour la saison 2024B, la culture de haricot ne montre pas non plus de rentabilité économique considérable. Le rapport V/C varie de 0,13 (T1 : D0-TE) à 1,27 (T12 : D4-FV). Pour cette saison, seuls les traitements T12 et T15 ont permis d'avoir une production qui couvre au moins les coûts de production ; c'est-à-dire un rapport V/C de 1.

Pour les deux saisons culturales impliquant le maïs (saisons 2024A et 2025A), tous les traitements ont enregistré un rapport V/C supérieur ou égale à 1 ; ce qui traduit que les productions de maïs obtenues justifient les fonds investis pour la production. De même, pour la saison 2024A, neuf traitements présentent des rapports V/C ≥ 2 ; ce qui traduit que les pratiques agricoles de ces traitements sont rentables dans le sens de Young (1989). Les traitements qui paraissent non rentables dans ce sens ($V/C \leq 2$) sont celles qui n'ont pas connu d'application de dolomie (sauf le traitement au fumier de chèvre), l'application seule de 2 T/ha de dolomie sans fumure organique (T6 : D2-TE) et la combinaison de 2 T/ha de dolomie et le compost de Lantana camara (T10 : D2-LC). Pour la saison culturale du maïs de 2025A, trois traitements ont pu afficher des rapports V/C ≥ 2 . Il s'agit des traitements T7 (D2-FV), T2 (D0-FV), T8 (D2-FC). Les quatre traitements aux plus petits rapports sont T1 (D0-TE), T5 (D0-LC), T6 (D2-TE), T14 (D4-TD).

En considérant globalement les deux années culturales, on constate que tous les traitements affichent des rapports $V/C \leq 2$ et qu'un traitement (T6 :D2-TE) présente un rapport $V/C < 1,0$. Les traitements se rangent par ordre décroissant comme suit : T3 (D0-FC) > T7 (D2-FV) > T2 (D0-FV) > T4 (D0-TD) > T8 (D2-FC) > T12 (D4-FV) > T9 (D2-TD) > T15 (D4-LC) > T14 (D4-TD) > T10 (D2-LC) > T11 (D4-TE) > T13 (D4-FC) > T1 (D0-TE) > T5 (D0-LC) > T6 (D2-TE).

En analysant ce classement de traitements, on remarque que les fumiers de vache et de chèvre, appliqués seuls ou en combinaison avec la dolomie à la dose de 2 T/ha occupent les meilleures places surtout à la dose. Les traitements sans fumures organiques (T1, T6 et T11) manifestent des rapports V/C qui sont plus petits. Il en est de même que le compost de Lantana camara appliqué seul (T5) ou en combinaison avec 2 T/ha de dolomie (T10).

Au Burundi, la plupart de fermiers utilisent la main d'œuvre familiale qu'il ne paie pas pour les activités agricoles. Le calcul de la rentabilité économique tenant compte de ce coût de la main d'œuvre n'est pas dans leur esprit. En se plaçant dans l'esprit de ces derniers, nous avons effectué le calcul du rapport valeur sur coût en oubliant le coût de la main d'œuvre dans le calcul du coût de production. Les valeurs trouvées sont consignées dans le tableau 15.

L'analyse des rapports V/C de la saison culturale 2023B montre que seuls les traitements sans dolomie affichent des rapports $V/C \geq 1$ avec en tête de classement le traitement T2 (D0-FV) dont le rapport V/C a pu dépasser la valeur de 2. Pour la saison 2024B, la situation change en faveur des traitements à 4 T/ha de dolomie qui occupent les premières places excepté le traitement T11 sans fumure organique. Ce groupe de traitements, auquel on ajoute le traitement au compost de Tithonia diversifolia combiné à 2 T/ha ou appliqué seul, présentent des rapports V/C atteignant la valeur de 2,0. Deux traitements, le traitement témoin T1 (D0-TE) et le traitement T5 (D0-LC) manifestent des rapports V/C plus petits (< 1). Ils sont suivis par le traitement à 2 T/ha de dolomie mais sans fumure organique (T6).

Pour le maïs, tous les rapports V/C obtenus dépassent la valeur 2. Pour la saison 2024A, huit traitements affichent des rapports $V/C > 5$. Il s'agit des traitements à la dose de 2 T/ha de dolomie et fumiers de vache (T7) ou de chèvre (T8) et des doses de 4 T/ha associées ou non aux fumures organiques (T11, T12, T13, T14, T15). Trois autres traitements (T1 : D0-TE, T4 : D0-TD et T9 : D2-TD) possèdent des rapports V/C compris entre 4,0 et 4,9 ; deux autres (T4 : D0-TD et T1 : D0-TE) présentent des valeurs V/C compris entre 3,0 et 3,9, tandis que deux autres (T10 : D2-LC et T2 : D0-FV) en affichent avec des valeurs comprises entre 2,0 et 2,9. Pour la saison 2025A, les rapports V/C sont compris entre 2,5 et 4,8 ; les rapports extrêmes étant ceux des traitements T1 (D0-Te) et T7 (D2-FV). Neuf traitements (T7 (D2-FV), T2 (D0-FV), T8 (D2-FC), T11 (D4-TE), T3 (D2-FC), T15 (D4-LC), T10 (D2-LC), T12 (D4-FV), T9 (D2-TD)) montrent des rapports V/C compris entre 4,0 et 4,8 ; quatre autres (T13 (D4-FC), T4 (D0-TD), T14 (D4-TD), T6 (D2-TE)) possèdent des rapports V/C compris entre 3,0 et 3,9 ; tandis que deux autres traitements (T5 et T1) manifestent des rapports V/C de 2,6 et 2,5 respectivement.

L'analyse globale des rapports V/C de toute la période des quatre saisons culturales 2023B, 2024A, 2024B et 2025A montre qu'à l'exception du traitement à la dose de 2 T/ha de dolomie sans fumure organique (T6, tous les traitements affichent des rapports V/C supérieurs à 2,0 parmi lesquels quatre traitements (T3 (D0-FC), T2 (D0-FV), T4 (D0-TD), T7 (D2-FV)) présentent des rapports $V/C \geq 3,0$.

Des deux méthodes de calcul, associant les coûts de la main d'œuvre ou pas, on conclut que la rentabilité économique de l'application de la dolomie est graduelle ; elle augmente graduellement au fil des années. De même, le fumier de vache et de chèvre sont les plus rentables parmi les fumures utilisées dans cet essai, le compost de Tithonia diversifolia l'est aussi mais un peu moins que ces derniers, alors que la rentabilité du Lantana camara n'est pas rassurante. Par ailleurs, l'usage de la dolomie seule, non associée à une fumure organique n'est pas rentable. En outre, la culture du haricot est moins rentable que la culture du maïs.

Tableau 15. Rapport valeur sur coût des pratiques de chaulage avec 4 doses de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) combinées ou pas avec le fumier de vache ou de chèvre, ou avec le compost de Tithonia diversifolia ou de Lantana camara en considérant que la main d'œuvre est gratuite.

Traitement	Haricot Saison 2023B	Haricot Saison 2024B	Maïs Saison 2024A	Maïs Saison 2024A	Haricot et maïs pour toutes les saisons
T1 :Témoin (0 T /ha de fumure organique + 0 T/ha de dolomie)	1,22	0,29	4,04	2,46	2,25
T2 :10 T/ha de fumure de vache + 0 T/ha de dolomie	2,53	1,94	3,41	4,60	3,30
T3 :10 T/ha de fumure de chèvre + 0 T/ha de dolomie	1,78	1,61	5,35	4,19	3,54
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha de dolomie	1,90	2,01	4,21	3,53	3,10
T5:10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha de dolomie	1,39	0,76	2,91	2,57	2,07
T6:Témoin (0 T/ha de fumure organique +2 T/ha de dolomie)	0,54	1,02	2,35	3,29	1,62
T7:10 T/ha de fumure de vache + 2 T/ha de dolomie	0,92	1,75	5,98	4,85	3,03
T8:10 T/ha de fumure de chèvre + 2 T/ha de dolomie	0,42	1,66	5,71	4,52	2,68
T9:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha de dolomie	0,85	1,96	4,75	3,95	2,56
T10:10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha de dolomie	0,82	1,51	3,44	4,08	2,22
T11:Témoin (0 T/ha de fumure organique + 4 T/ha de dolomie)	0,34	1,72	5,03	4,24	2,00
T12:10 T/ha de fumure de vache + 4 T/ha de dolomie	0,73	2,77	5,18	4,06	2,33
T13:10 T/ha de fumure de chèvre + 4 T/ha de dolomie	0,29	2,09	5,04	3,94	1,97
T14:10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha de dolomie	0,49	2,06	5,16	3,52	2,02
T15:10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha de dolomie	0,56	2,24	4,99	4,11	2,15

4. DISCUSSION DES RESULTATS

A travers ces résultats présentés dans les paragraphes précédents, le rôle de la dolomie dans l'amélioration des rendements du haricot et du maïs est mis en évidence. Pour chaque type de fumure organique, les paramètres de rendement du haricot et du maïs se voient améliorés avec l'augmentation de la dose de dolomie ; la dose nulle de dolomie se rangeant en dernière position.

Par ailleurs, les fumiers de vache et de chèvre manifestent des effets positifs particulièrement importants sur les paramètres de rendement du haricot et du maïs, excepté le fumier de chèvre sur le haricot de la saison 2023B. Les effets de la fumure organique dans la globalité sur le rendement du haricot et du maïs est bien manifeste puisque les traitements sans fumure organique occupent les derniers rangs quelle que soit la dose de dolomie.

Le sol étudié est caractérisé par une réaction acide ($\text{pH-H}_2\text{O} = 4,8$) et allique (taux de saturation en Aluminium de 56,5 %), désaturé en bases (taux de saturation en bases de 23,79%), déficient en azote, en phosphore, en calcium et en potassium, et à faible pouvoir de rétention des nutriments. C'est un sol qui mérite des efforts spéciaux d'aménagements comprenant le chaulage pour augmenter le pH du sol au-delà de 5,5 et neutraliser l'aluminium échangeable pouvant être toxique, la fertilisation minérale pour relever les niveaux des nutriments, des applications considérables de fumure organique pour accroître le pouvoir de rétention des nutriments.

Ces sols sont reconnus pour leurs contraintes chimiques majeures, notamment la toxicité de l'aluminium, la faible disponibilité du phosphore, et une faible capacité de rétention des nutriments (Niyungeko et al., 2022). L'Aluminium

échangeable précipite le phosphore et inhibe la croissance racinaire, ce qui justifie pleinement la nécessité de l'amendement calcique via la dolomie (Nijimbere et al., 2020). La capacité d'échange cationique (CEC =7,13 cmolc/kg) reflète une faible réserve en nutriments échangeables, typique des sols pauvres en matière organique et en argiles de type kaolinitique. La matière organique (CO =1,43%) et l'azote total (N=0,131%) sont très faibles, ce qui traduit une fertilité limitée, aggravée par l'absence totale de phosphore assimilable (P-Olsen = 0 mg/kg), facteur critique pour l'initiation de la croissance végétative et le développement racinaire.

Les résultats montrent que les fumures animales (chèvre et vache) sont riches en nutriments essentiels .le fumure de chèvre se distingue par ses teneurs élevées en azote (2,53%), calcium (2,75%) et magnésium (1,66%), ce qui lui confère une forte valeur agronomique, notamment pour les cultures exigeantes et les sols pauvres en bases échangeables. Le fumier de vache, bien que légèrement moins concentré (N =1,87%), est reconnu pour son effet structurant sur le sol et sa capacité à activer l'active biologique (Kaboneka et al., 2020).

Les composts végétaux, notamment le compost de *Tithonia diversifolia*, bien que pauvres en carbone organique (CO =2,09%) et en azote (N=0,324%), sont connus pour leur décomposition rapide, libérant rapidement l'azote et le phosphore assimilables, ce qui les rends efficaces dans les systèmes de culture a cycle court (Kaboneka et al., 2019). Le compost de *Lantana Camara*, avec une composition plus ligneuse, se minéralise plus lentement. Il est mieux adapter à la reconstitution progressive de la fertilité et à l'amélioration de la structure des sols à long terme.

L'analyse montre que les fumures animales (vache et chèvre) sont à privilégier pour leur richesse en nutriments basiques, tandis que les composts végétaux, notamment *Tithonia diversifolia* sont complémentaires pour leur rôle dans la fourniture rapide d'azote et la stimulation initiale de la croissance. Cette complémentarité est renforcée par le chaulage, qui améliore la biodisponibilité des nutriments et réduit la toxicité aluminique (Bado et al., 1997).

Les résultats corroborent les recommandations de l'ISABU (2015) qui soulignent l'importance d'associer sources organiques et minérales, notamment sur les sols acides du Burundi, pour améliorer durablement la fertilité et la productivité agricole. Le taux de survie des plants de haricot varie considérablement selon les traitements. Le traitement avec 10 t/ha de fumure de vache combinée à 4 t/ha de chaux affiche le taux de survie le plus élevée (60,67±10,26%). Cela est cohérent des résultats de Hicintuka et Masilya (2013) qui ont démontré que l'utilisation de fumures organiques améliore la vigueur des plants en fournissant des nutriments essentiels et en modifiant la structure du sol. Le traitement témoin sans fumure ni chaux montre une survie nettement inférieure (35,33±6,81%), soulignant l'impact négatif de l'absence de fertilisation.

Les biomasses racinaires du haricot varient de 57,00±27,22 kg/ha à 303,00±262,03 kg/ha .le traitement avec fumure de vache (T2) a produit la biomasse racinaire la plus élevée. Ce résultat indique que le chaulage et les apports organiques favorisent le développement des racines ,ce qui est en accord avec les conclusions de Nijimbere et al. (2024) qui a noté que la disponibilité accrue de calcium et d'autres nutriments améliore la croissance racinaire. En revanche, les parcelles non amendées avec la matière organique montrent des biomasses racinaires plus faibles ; ce qui peut être attribue à une carence en nutriments et e une acidité mal corrigée.

Les biomasses aériennes du haricot les plus élevées ont été observées pour les traitements avec fumure de vache et chaux, atteignant jusqu'à 1165,67±227,28 kg/ha. Ces résultats corroborent à ceux de Hicintuka et Masilya (2013) qui ont souligné que des amendements organiques combinés à des corrections de pH améliorent la croissance végétative. Le témoin intégral, sans chaux ni fumure organique, affiche une biomasse aérienne plus faible (91,67±6,66 kg/ha) ; ce qui traduit l'effet de l'acidité et de la toxicité aluminique sur la réduction de la croissance végétale.

Que ce soit en saison 2023B ou en saison 2024B, les traitements au fumier de vache, y compris ceux qui n'ont pas connu d'application de la dolomie, se classent toujours parmi les meilleurs rendements en grains du haricot. Ces résultats corroborent ceux de Nijimbere et al. (2024) qui constatèrent un rendement du haricot significativement plus élevé dans les parcelles amendées avec du fumier de vache comparativement aux parcelles sans fumure organique et aux parcelles amendées avec les composts de *Calliandra calothyrsus* et de *Lantana camara*. L'examen des résultats montre l'effet évident de l'application de la dolomie sur le rendement. En effet, à l'exception du traitement au fumier de vache des deux saisons et du compost de *Tithonia diversifolia* en saison 2024B, les autres traitements sans dolomie affichent des faibles rendements en graines de haricot qui ne sont pas significativement différents de celui du témoin intégral non chaulé et sans fumure organique. L'effet de la chaux dolomie sur le rendement du haricot a été signalé par d'autres auteurs notamment Hicintuka et Masilya (2013) et Wouters (1992).

En comparant les rendements obtenus avec ceux qui sont couramment observés pour cette variété rufutamadeni dans les stations de recherche agronomiques (1200 kg/ha) et en milieu réel dans les exploitations des agriculteurs (800 kg/ha) (Nduwarugira et al., 2018), nous remarquons qu'au cours de la saison 2023A, seules les traitements au fumier de vache (D4-FV, D2-FV et D0-FV), le traitement à la dose de 4 t/ha de dolomie combinée au compost de *Lantana camara* (D4-LC), et traitement à la dose de 2 t/ha de dolomie combinée au compost de *Tithonia diversifolia* (D2-TD) ont pu atteindre/dépasser le rendement moyen observé dans les exploitations agricoles rurales. Pour la saison 2024B, seules les parcelles chaulées avec 4 T/ha et amendées avec le fumier de vache (D4-FV) ont pu atteindre le rendement de 800 kg/ha observé en milieu réel.

Les rendements en grains de maïs enregistrés pour la variété ZM 605 – 24 en station et en milieu réel sont de 3,5 t/ha et 4,5 T/ha (ONCCS, 2020). Au cours de la saison cultural 2024A, tous les cinq traitements à la dose de 4 t/ha de dolomie, les traitements avec 2 T/ha de dolomie et le fumier de vache ou de chèvre (D2-FV et D2-FC), et le traitement sans dolomie mais avec le fumier de chèvre (D0-FC) ont pu dépasser le rendement de 4,5 T/ha observé en station. De même, les traitements au compost de *Tithonia diversifolia* sans dolomie (D0-TD) ou avec 2 T/ha de dolomie (D2-TD) et le témoin intégral sans dolomie ni fumure organique (D0-TE) ont pu atteindre/dépasser le rendement de 3,5 T/ha observée pour cette variété en milieu réel.

Au cours de la saison cultural 2025A, aucun traitement n'a pu atteindre le rendement moyen en grains de maïs observé dans les stations expérimentales. Par contre, la majorité des traitements ont atteint le rendement de 3,5 T/ha observé dans les exploitations des agriculteurs en milieu réel. En revanche, les traitements sans fumure organique avec 2 t/ha de dolomie (D2-TE) ou sans dolomie (D0-TE), les traitements au compost de *Lantana camara* sans dolomie (D0-TD) ou avec 4 T/ha de dolomie (D4-TD) et le traitement au compost de *Lantana camara* sans dolomie (D0-LC) n'ont pas atteint ce seuil. Cette constatation diverge avec celles d'une autre étude récente réalisée au Burundi (Nijimbere et al., 2024) qui a conclu que le compost *Lantana camara* peut remplacer le fumier de vache pour la culture du haricot.

Une étude récente menée sur un sol ferrallitique de la région des plateaux centraux du Burundi (Kaboneka et al., 2020) a montré que les systèmes de culture intégrant des amendements organiques et la chaux dolomitique améliorent significativement les rendements du maïs. La hauteur des plants de maïs est plus importante dans les traitements au fumier de vache

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a été menée en vue de déterminer la dose de dolomie et le type de fumure organique en mesure d'améliorer le rendement du haricot et du maïs cultivés en rotation sur un ferralsol fortement acide pendant deux années culturales. Les combinaisons de trois niveaux de dose de dolomie (0 T/ha, 2 T/ha et 4 T/ha) et quatre types d'amendements organiques (fumiers de vache et de chèvre, composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*) et témoin ont été testées. Globalement, les paramètres de croissance et de rendement enregistrés durant ces essais montrent des performances croissantes avec l'augmentation de la dose de dolomie. En outre, les fumiers de vache et de chèvre sont plus efficaces que les composts de *Tithonia diversifolia* et de *Lantana camara*. Par ailleurs, en combinaison avec la fumure organique, la dose de 2 T/ha de dolomie déterminée en utilisant la formule de Yamoah et al. (1990), montre déjà son efficacité à augmenter le rendement des cultures. En outre, les applications des différentes fumures organiques testées augmentent significativement le rendement du haricot et du maïs en comparaison avec la dolomie seule sans fumure organique qui n'améliore pas le rendement du haricot ni du maïs. Tout compte fait, la dose de 4 T/ha de dolomie n'est ni économiquement ni agronomiquement justifiée. Dans la globalité, tenant compte des travaux transversaux réalisés dans le cadre de ce projet PAGRIS dans le domaine de la correction de l'acidité par la dolomie, la dose la plus agronomiquement et économiquement réaliste tourne autour de 2 T/ha qui émane de l'application de la formule empirique établie par Yamoah et al. (1990).

La présente étude a abouti aux résultats pertinents certes, mais elle n'a pas exploré l'effet qu'aurait la combinaison de la dose inférieure à celle déterminée avec la formule de Yamoah et al. (1990) et les différentes fumures organiques. Elle n'a pas non plus déterminé la dose optimale des différentes doses de fumures organiques en combinaison avec les différentes doses de dolomie. Ces questions méritent d'être approfondies dans des travaux ultérieurs.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDÉES

1. Ali, S., Hussain, I., Hussain, S., Hussain, A., Ali, H., Ali, M. 2019. Effect of altitude on forest soil properties at Northern Karakoram. *Eurasian Soil Science*, 52(10), 1159-1169.
2. Bado, B. V., Sédogo, M. P., Cescas, M. P., Lompo, F., Bationo, A. 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 6, 571-575.
3. Baker, A.V. (1997). Composition and Uses of Compost. In *Agricultural Uses of By-Products and Wastes* (Chapter 10); Rechigl J.E., Mackinnon H.C., Eds; ACS Symposium Series; 668. American Chemical Society: Washington, DC. DOI: 10.1021/bk-1997-0668.ch010
4. Borůvka, L., Nikodem, A., Drábek, O., Vokurková, P., Tejnecký, V., Pavlů, L. 2009. Assessment of soil aluminium pools along three mountainous elevation gradients. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 103(11), 1449-1458.
5. Boyer, J. 1982. *Les Sols Ferrallitiques: Facteurs de fertilité et utilisation des sols*, Tome X. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Paris
6. Buerkert, A., Cassman, K. G., De la Piedra, R., & Munns, D. N. 1990. Soil acidity and liming effects on stand, nodulation, and yield of common bean. *Agronomy journal*, 82(4), 749-754.
7. Buol, S. W., Hole, F. D., and McCracken, R. J. 1980. *Soil genesis and classification*. Second edition, the Iowa State University Press, Ames
8. Christopher, T. B. S., Mokhtaruddin, A. M. 1996. A computer program to determine the soil textural class in 1-2-3 for Windows and Excel. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27(9-10), 2315-2319.
9. Fageria, N. K., Baligar, V. C., Melo, L. C., De Oliveira, J. P. 2012. Differential soil acidity tolerance of dry bean genotypes. *Communications in soil science and plant analysis*, 43(11), 1523-1531.
10. Hailemariam, M. B., Woldu, Z., Asfaw, Z., Lulekal, E. 2023. Impact of elevation change on the physicochemical properties of forest soil in South Omo Zone, Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2023(1), 7305618.
11. Hicintuka, C., Masilya, P. M. 2013. Gestion optimale et intégrée de la fertilité des sols acides du Burundi. In *Vertigo* (Issue Hors-série 17). <https://doi.org/10.4000/vertigo.13898>
12. INSBU. 2025. Résultats du recensement général de la population, de l'habitat, de l'agriculture et de l'élevage au Burundi. <https://www.insbu.bi/resultatRGPHAE2024>
13. ISTEEBU, 2018. Enquête Nationale Agricole du Burundi (ENAB). Résultats de la campagne agricole 2017-2018. Bujumbura, 139 p.
14. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
15. Kaboneka, S., Ntukamazina, N., Gacoreke, S., Butoki, N. 2020. Analyse biologique, nutritionnelle et économique de l'association maïs-haricot. *Revue de l'université Du Burundi, Série-Sciences Exactes et Naturelles*, 29, 23-33.
16. Landon, J.R. 1991. *Booker Tropical Soil Manual. A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics*. J.R. Landon (Ed.) Longman Technical Copublished in the United States with John Wiley and Sons, Inc., New York, 474p.
17. Motsara, M. R., Roy, R. N. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis (Vol. 19, pp. 101-122). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
18. Musonerimana, S., Anicet, N., Ndayihanzamaso, P., Semenova, E., Niyuhire, M. C., Sendegeya, Beun M., Nibasumba A. 2025. Maps of major soil parameters: A reference for monitoring soil fertility in Burundi. *Sustainable Environment*, 11(1), 2521932

19. Namkoong, W., Hwang, E.Y., Cheong, J.G. and Choi, J.Y. (1999). A comparative evaluation of maturity parameters for food waste composting. *Compost Science & Utilization*, 7(2), 55-62.
20. Nduwarugira, E., Ntukamazina, N., Ruraduma, C., Nijimbere, B., Niyoyankunze, J.M.V., Ndabashinze, B., Bizimana, S., Bigirimana, B., Nzeyimana, J. and Hakizimana, G. (2018). Catalogue des variétés de haricot en diffusion au Burundi. Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). Disponible en ligne : <https://docplayer.fr/109472406-Catalogue-des-varietes-de-haricot-en-diffusion-au-burundi.html>
21. Nduwimana O., Nzohabonayo Z., Hicintuka C., Nibasumba M. 2013. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB – IFDC, 76p
22. Nduwimana, O., Nzohabonayo, Z., Hicintuka, C., Nibasumba, M. 2020. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. IFDC, 77p+
23. Nijimbere, S., Kaboneka, S., Irakoze, W., Ntukamazina, N., Nduwayezu, D. 2024. Effects of Integrated Use of Lantana camara, Calliandra calothyrsus and Cow Manure with Diammonium Phosphate and Potassium Chloride on Haricot Bean Yield in the Northern Part of Burundi. *Journal of Agricultural Sciences - Sri Lanka*, 19(2), 259–274. <https://doi.org/10.4038/jas.v19i2.9562>
24. Nijimbere, S., Kaboneka, S., Ndiokubwayo, S., Irakoze, W., Ndikumana, J. 2020. Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi). *Sciences Exactes et Naturelles*, 34(January), 34–44. www://ub.edu.bi/JUB
25. Niyungeko, C., Marie-chantal, N., 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. *Revue de l'Université du Burundi*, 33(2022), 1–12.
26. ONCCS. 2020. Catalogue National des Espèces et Variétés Végétales admises à la certification au Burundi. Gitega, 404p
27. R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [Logiciel]. <https://www.R-project.org/>.
28. Sullivan, T. S., Barth, V. P., Lewis, R. W. 2017. Soil acidity impacts beneficial soil microorganisms.
29. Tahraoui, D. N. 2013. Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 244p.
30. Tessens, E., Gourdin, J. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo, (19).
31. Toundou, O. 2016. Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo. Thèse de doctorat. Université de Limoges; Université de Lomé, 195p.
32. Van Ranst, E. 1995. Rational Soil Management in the Humid Tropics. *Bull. Seanc. Acad. R. Sci. Outre-Mer*, 40, 209–233.
33. Van Wambeke, A. 1992. *Soils of the Tropics, Properties and Appraisal*; McGraw-Hill, Inc.: New York; 343.
34. Wouters, J. F. R. 1992. Effet du chaulage sur la croissance et l'autotrophie azotée du haricot commun. In CIAT African Workshop Series (CIAT). no. 16.
35. Yamoah, C. F., Burleigh, J. R., Malcolm, M. R. 1990. Application of expert systems to study of acid soils in Rwanda. *Agriculture, ecosystems & environment*, 30(3-4), 203-218.
36. Young, W. Y. 1989. Méthode d'enquête sur la gestion des entreprises agricoles. FAO. Rome. 246p

Evaluation de l'effet combiné du chaulage et de la fumure organique sur la nodulation du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides d'altitude du Burundi

Béatrice Nijimbere¹, Salvator Kaboneka², Séverin Nijimbere², Spéciose Gacoreke², Gordien Birayi², Melchior Irakoze², Oscar Nduwimana³ et Micael Beun³.

¹Université du Burundi, Ecole Doctorale de l'Université du Burundi et Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE). B.P. 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail:salvator.kaboneka@gmail.com

Résumé

Le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) est la légumineuse la plus cultivée au Burundi dans toutes les zones agro-écologiques du pays. Il est reconnu pour sa sensibilité à l'acidité et à la toxicité aluminiques des sols. L'application de la dolomie sur les sols acides du Kirimiro, du Mugamba (Nord) et du Mumirwa, particulièrement en combinaison avec la fumure organique (fumier de vache) améliore significativement la nodulation du haricot et sa production de biomasse racinaire et foliaire. La pratique de fertilisation dualiste combinant la dolomie à la matière organique et optimisant leur synergie est une stratégie viable pour une production agricole durable sur les sols acides du Burundi. A l'avenir, la production et la vulgarisation des inocula de rhizobium et mycorhizes pour fixer l'azote et le phosphore dans le sol devrait constituer une des priorités des services agricoles du Burundi, avec à la tête l'ISABU et le cas échéant, les Institutions Universitaires à vocation agronomique.

Mots clés : Acidité du sol, dolomie, fumure organique, nodulation, haricot, inoculum

Abstract

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a leguminous crop widely cultivated in Burundi across its agro-ecological zones. It is recognized as of the most sensitive crop to soil acidity and Al toxicity. Results obtained from the experimental studies outlined in this paper demonstrate that dolomitic lime applied on acidic soils of Kirimiro, Mugamba (North) and Mumirwa, particularly in combination with cow manure, significantly improve common bean nodulation, coupled with root and foliar biomass of common bean. Therefore, it must be stressed out that the dual fertilisation practice combining dolomitic lime to organic fertiliser and optimizing their synergy, is a viable strategy for a sustainable food production under Burundi acidic soils. We are of the strongest conviction and belief that, production and large use of Rhizobium (N fixation) and mycorrhiza inocula (P) could/should be on top of the agenda of the agriculture research priorities within Burundi national research (ISABU) and academic agriculture-oriented institutions (Universities).

Mots clés : Soil acidity, dolomitic lime, organic manure, nodulation, bean, inoculum

1. INTRODUCTION

Au Burundi, le secteur agricole occupe une place importante dans l'économie. La production végétale est caractérisée par une faible productivité à cause de la faible utilisation des intrants et de la dégradation des sols, conséquence: appauvrissement rapide des sols en matière organique, en azote, phosphore et en d'autres éléments minéraux essentiels. Les systèmes de productions traditionnelles acidifient souvent les sols agricoles. La fertilisation chimique envisagée comme solution alternative est souvent inappropriée : coût élevé, pollution des eaux, acidification.

Parmi les solutions envisageables, les légumineuses paraissent comme une alternative d'intérêt important du fait de leur capacité d'enrichissement rapide des sols par la fixation d'azote atmosphérique (FBN) et la production abondante de biomasse végétale. La vulgarisation et l'adoption de la FBN est une plus value car il remplace les engrais azotés qui sont chers et non accessibles aux petits exploitants agricoles

Le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.), la légumineuse la plus cultivée au Burundi dans toutes les zones agro écologiques du pays. De fait, le haricot commun peut obtenir une quantité importante de ses besoins azotés grâce à la fixation symbiotique de l'azote, lorsqu'il est inoculé avec des souches efficaces et compatibles de *Rhizobium*. Il constitue alors un bon précédent cultural: utilisé dans des rotations culturales ou associé à d'autres cultures sans usage excessif des engrais azotés, etc. C'est aussi un aliment de base des ménages pour sa haute valeur nutritionnelle (surtout fer et zinc). Cependant, cette spéculation vivrière est l'une des cultures vivrières qui est très sensible à l'acidité des sols.

Les terres sous l'effet de la surexploitation sans restitution des éléments exportés, de manque de jachères et d'érosion se dégradent de plus en plus et perdent leur fertilité, en particulier l'azote et le phosphore assimilable. Le principal facteur limitant est rattaché aux teneurs en éléments nutritifs et aux problèmes de toxicité des éléments minéraux de la solution du sol, comme l'acidité du sol (présence de H^+) et la teneur en Aluminium échangeable. Le haricot est particulièrement affecté par l'acidité du sol, limitant le processus de nodulation. Une forte acidité du sol affecte surtout les stades du processus de nodulation et la population de *Rhizobium* peut rapidement diminuer dans les sols présentant une forte saturation en Aluminium.

L'amendement des sols acides avec de la dolomie peut ainsi être favorable à la croissance des cellules bactériennes en fournissant des nutriments (Ca et Mg) et en augmentant la disponibilité du P et d'autres éléments nutritifs pour la culture. L'apport de la dolomie dans le sol modifie positivement les réactions chimiques du sol par le remplacement des ions H^+ et Al^{3+} sur le complexe absorbant par les ions basiques échangeables Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ceci conduit à la neutralisation du complexe qui était acide. Elle permet de maintenir ou d'élever le pH jusqu'aux limites optimales voulues et amorcer la fixation réversible du phosphore sur le complexe argilo-humique. D'où l'intérêt de la dolomie comme amendement dans la rhizosphère

La présente étude qui fait partie d'une thèse de Doctorat du premier auteur s'intéresse à la correction de l'acidité des sols associée à l'approche intégrée pour augmenter la production du haricot commun, une culture de très grande importance sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi.

L'étude visait les objectifs spécifiques ci-après :

- i Evaluer l'interaction fumure organique et dolomie sur la nodulation de la culture de haricot nain.
- ii Comparer les opérations de chaulage et non chaulage sur les performances agronomiques et biologiques du haricot volubile et nain.

2. MATERIELS ET METHODES

Les essais dont les résultats sont rapportés sont décrits ailleurs dans le présent document (Hatungimana et al., 2025, Ntiyantetereje et al., 2025 ; Nijimbere et al., 2025). A côté des paramètres mesurés dans les différents pré-référenciés, la présente étude s'est focalisée sur les effets des différents traitements testés sur la nodulation du haricot. Les milieux d'étude étaient localisés en station (Zege) et en milieu réel (Mabayi, Matongo et Gashikanwa).

Les échantillonnages ont été effectués au stade floraison (45 jours après le semis) du haricot ; période où l'activité biologique/formation des nodules chez le haricot est à son maximum. Les plantes issues de chaque parcelle élémentaire ont été soigneusement prélevées avec leurs racines sans détériorer les nodules. Cette opération était suivie par le comptage des nodules et la mesure des biomasses racinaires et foliaires.

Les analyses des données ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio faisant sortir les groupes de moyenne homogène pour chaque paramètre mesuré (R Core Team, 2021).

3. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus dans ces différentes investigations sur la nodulation du haricot nain et volubile sont concentrés dans les représentations tabulaires et graphiques qui suivent (Tableaux 1 à 5, Figure 1 et 2 et Photo 1). Les résultats détaillés seront présentés en temps opportun par l'auteur principal, Doctorante à l'Ecole Doctorale de l'Université du Burundi.

3.1 Essais en station (Zege)

Le tableau 1 ci-après présente les résultats obtenus à la ferme didactique de Zege (FABI), au cours de la saison culturale 2023B. Trois paramètres ont été suivis, à savoir le nombre de nodules par plant (NN/plant), la masse racinaire par plant (MR) et la masse foliaire par plant (MF/plant).

Tableau 1. Effet de la combinaison fumure organique et dolomie sur la nodulation du haricot nain (variété Rufutamadeni) en saison 2023B à Zege.

Traitement	NN/plant	MR/plant (g)	MF/plant (g)
T1 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 0 T/ha Dolomie	10b	2,10b	7,48ab
T2 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 0 T/ha Dolomie	34a	6,67a	12,11a
T3 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 0 T/ha Dolomie	32a	4,75ab	7,98ab
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha Dolomie	18b	3,62ab	7,46ab
T5 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha Dolomie	24a	3,07b	6,45ab
T6 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 2 T/ha Dolomie	15b	2,88b	6,57ab
T7 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 2 T/ha Dolomie	33a	5,80a	10,83a
T8 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 2 T/ha Dolomie	27a	4,56ab	8,99ab
T9 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha Dolomie	34a	4,56ab	6,39ab
T10 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha Dolomie	31a	3,81ab	5,42b
T11 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 4 T/ha Dolomie	27a	3,04b	6,65ab
T12 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 4 T/ha Dolomie	33a	4,92ab	7,13ab
T13 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 4 T/ha Dolomie	31a	3,81ab	8,81ab
T14 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha Dolomie	33a	4,23ab	7,66ab
T15 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha Dolomie	29a	3,59ab	6,37ab

S'agissant du nombre de nodules par plant, les traitements se trouvant en tête sont les traitements T2, T7, T9, T12 et T14 se retrouvent dans un même groupe homogène a. Ces traitements sont le fumier de vache et compost avec Tithonia, quelle que soit la dose de dolomie appliquée. Ils ont un nombre de nodules plus élevés, allant de 27 à 34 nodules par plant. Les nombres de nodules par plant les plus sont observés avec les traitements T1 (0 T/ha de fumure organique et 0 T/ha de Dolomie), T6 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de Dolomie) et T4 (10 T/ha de Compost à base de Tithonia diversifolia et 0 T/ha de Dolomie). Les autres traitements occupent des positions intermédiaires.

Les masses racinaires et foliaires les plus élevées sont observées avec les traitements T2 (10 T/ha de Fumier de Vache + 0 T/ha Dolomie) et T7 (10 T/ha de Fumier de Vache + 2 T/ha Dolomie). A l'opposé, les masses racinaires et foliaires les plus faibles sont respectivement obtenues avec le traitement T1 ((0 T/ha de fumure organique et 0 T/ha de Dolomie) pour la masse racinaire et le traitement T7 (10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha Dolomie). Les autres traitements occupent des positions intermédiaires.

Les résultats correspondant à la saison 2024 B pour les mêmes paramètres sont consignés dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2. Effet de la combinaison fumure organique et dolomie sur la nodulation du haricot nain (variété Rufutamadeni) en saison 2024B à Zege.

Traitement	NN/plant	MR/plant (g)	MF/plant (g)
T1 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 0 T/ha Dolomie	1cd	1,56abc	10c
T2 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 0 T/ha Dolomie	6ab	1,73ab	29,3a
T3 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 0 T/ha Dolomie	1a	0,69c	19,96abc
T4 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 0 T/ha Dolomie	1d	1,14abc	19,34abc
T5 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 0 T/ha Dolomie	4abc	1,86ab	17,7bc
T6 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 2 T/ha Dolomie	1d	1,27abc	19,94abc
T7 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 2 T/ha Dolomie	10a	1,96a	30,5a
T8 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 2 T/ha Dolomie	3bcd	0,96abc	22,04ab
T9 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 2 T/ha Dolomie	2cd	1,24abc	23,7ab
T10 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha Dolomie	2cd	1,63ab	18,05bc
T11 : Témoin (0 T/ha de Fumure Organique) + 4 T/ha Dolomie	2cd	1,79ab	19,15abc
T12 : 10 T/ha de Fumier de Vache + 4 T/ha Dolomie	4abc	1,23abc	28,3ab
T13 : 10 T/ha de Fumier de Chèvre + 4 T/ha Dolomie	1d	0,88bc	28,2ab
T14 : 10 T/ha de compost de Tithonia diversifolia + 4 T/ha Dolomie	2cd	0,99abc	23,7ab
T15 : 10 T/ha de compost de Lantana camara + 4 T/ha Dolomie	bcd	0,88bc	20,7ab

S'agissant du nombre de nodules par plant, les traitements se trouvant en tête sont les traitements T2, T7, T9, T12 et T14 se retrouvent dans un même groupe homogène a. Ces traitements sont le fumier de vache et compost avec Tithonia, quelle que soit la dose de dolomie appliquée. Ils ont un nombre de nodules plus élevés, allant de 27 à 34 nodules par plant. Les nombres de nodules par plant les plus sont observés avec les traitements T1 (0 T/ha de fumure organique et 0 T/ha de Dolomie), T6 (0 T/ha de fumure organique et 2 T/ha de Dolomie) et T4 (10 T/ha de Compost à base de Tithonia diversifolia et 0 T/ha de Dolomie). Les autres traitements occupent des positions intermédiaires.

Les masses racinaires et foliaires les plus élevées sont observées avec les traitements T2 (10 T/ha de Fumier de Vache + 0 T/ha Dolomie) et T7 (10 T/ha de Fumier de Vache + 2 T/ha Dolomie). A l'opposé, les masses racinaires et foliaires les plus faibles sont respectivement obtenues avec le traitement T1 ((0 T/ha de fumure organique et 0 T/ha de Dolomie) pour la masse racinaire et le traitement T7 (10 T/ha de compost de Lantana camara + 2 T/ha Dolomie). Les autres traitements occupent des positions intermédiaires.

Les résultats correspondant à la saison 2024 B pour les mêmes paramètres liés à la fixation biologique de l'azote, à savoir le nombre de nodules par plant, la masse racinaire et la masse foliaire par plant sont consignés dans le tableau 3 ci-après. Cet essai commandité par l'Ambassade des Pays Bas au Burundi tentait de tester l'efficacité agronomique d'un fertilisant organique produit à base des fientes de poule, le FertiKal. Il a fait l'objet d'un mémoire d'Uen Etudiante de Master à la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi. Les résultats complets de cet essai seront partagés en temps opportun.

Tableau 3. Effet de la combinaison fumure organique et dolomie sur la nodulation du haricot nain (variété Rufutamadeni) en saison 2024B à Zege.

Traitement	NN/plant	MR/plant (g)	MF/plant (g)
T1 : Témoin intégral + Dolomie	1c	0,8c	9,7c
T2 : 0,5 T/ha FertiKal + Dolomie	2bc	0,8c	9,7c
T3 : 1 T/ha FertiKal + Dolomie	5abc	1,1bc	19,1abc
T4 : 1,5 T/ha FertiKal + Dolomie	9abc	1,1bc	14,7bc
T5 : 2 T/ha FertiKal sans Dolomie	8abc	1,4abc	24,4abc
T6 : 2 T/ha Fertikal + Dolomie	4abc	1,02bc	22,5abc
T7 : 2 T/ha Fientes Locales sans Dolomie	14abc	1,2abc	26,1ab
T8 : 2 T/ha Fientes Locales + Dolomie	4abc	0,8c	29,1ab
T9 : 2,5 T/ha FertiKal + Dolomie	7abc	1,4abc	30,5a
T10 : 3 T/ha FertiKal + Dolomie	5ab	1,3abc	26,2ab
T11 : Témoin ISABU DAP/KCl/Urée + Dolomie	16ab	2,1a	31,9a
T12 : Témoin FOMI + Dolomie	19a	1,9ab	28,7ab
T13 : 1 T/ha FertiKal + Dolomie + ½ T11	3bc	1,4abc	28,1ab

L'analyse du tableau 3 relève que le traitement le plus performant pour le nombre de nodules par plant est le traitement T12 (FOMI Imbura + Dolomie) avec une moyenne de 19 nodules par plant. Il est suivi à distance par les traitements T11 (Traitement combinant DAP, Urée et KCl + Dolomie) et le traitement T7 (2 T/ha de fientes de poule locales sans Dolomie). La masse racinaire de la culture de haricot testée est la plus élevée pour le traitement T11 suivi du traitement T12. La masse foliaire du haricot testé affiche au top les traitements T11 et le traitement T9 (2,5 T/ha de FertiKal + Dolomie).

A chaque fois, les traitements les moins performants pour les trois paramètres évalués étaient les traitements T1 (0 Fertilisant organique + Dolomie) et T2 (0,5 T/ha + Dolomie). Tous les autres traitements occupant des positions intermédiaires entre les deux traitements extrêmes mentionnés.

L'essai FertiKal a été étendu à la saison 2025A. Ses résultats pendant cette saison sont rapportés dans le tableau 4 ci-après.

Tableau 3. Effet de la combinaison fumure organique et dolomie sur la nodulation du haricot nain (variété Rufutamadeni) en saison 2025A à Zege.

Traitement	NN/plant	MR/plant (g)	MF/plant (g)
T1 : Témoin intégral + Dolomie	0,9d	0,87e	1,72f
T2 : 0,5 T/ha FertiKal + Dolomie	1,2d	1,27de	18,53def
T3 : 1 T/ha FertiKal + Dolomie	10,6cd	1,62cde	14,67ef
T4 : 1,5 T/ha FertiKal + Dolomie	7,8cd	1,92cde	17,14def
T5 : 2 T/ha FertiKal sans Dolomie	8,6cd	2,84bc	29,76bcde
T6 : 2 T/ha Fertikal + Dolomie	4,6cd	2,24cde	19,26def
T7 : 2 T/ha Fientes Locales sans Dolomie	41,6a	3,99b	37,17bc
T8 : 2 T/ha Fientes Locales + Dolomie	6,2cd	3,03bc	32,17bcde
T9 : 2,5 T/ha FertiKal + Dolomie	18,1bc	2,32cde	33,43bcd
T10 : 3 T/ha FertiKal + Dolomie	13,1cd	2,48bcd	26,19cde
T11 : Témoin ISABU DAP/KCl/Urée + Dolomie	9,4cd	3,96b	45,2b
T12 : Témoin FOMI + Dolomie	29,3ab	6,41a	80a
T13 : 1 T/ha FertiKal + Dolomie + ½ T11	5,2cd	2,85bc	39,3bc

Cette fois, le traitement qui se démarque des autres quant au nombre de nodules par plant est le traitement T (2 T/ha de fientes de poule locales sans Dolomie) avec 41,6 nodules de moyenne par plant de haricot. Il est suivi de loin par le traitement T12 (FOMI Imbura + Dolomie). Le traitement T11 (DAP+KCl+Urée+Dolomie) tombe au bas de l'échelle à la saison 2025A, indiquant une absence d'effet résiduel pour ce traitement.

La même analyse appliquée aux masses racinaire et foliaire générées par l'application des 13 traitements testés montre la supériorité nette du traitement T12 (FOMI Imbura + Dolomie). Il est suivi dans les deux cas par le traitement T11. Les deux traitements se démarquent nettement des autres traitements évalués à la ferme didactique de Zege. Comme pour la saison 2024B, les traitements les moins performants pour les trois paramètres évalués étaient les traitements T1 (0 Fertilisant organique + Dolomie) et T2 (0,5 T/ha + Dolomie).

3.2. Essais en milieu réel

Cette investigation sur l'effet de l'application de la dolomie sur la nodulation du haricot nain et volubile fait partie de l'essai dont les résultats sont rapportés ailleurs dans ce document de synthèse (Hatungimana et al., 2025). Les figures 1 et 2 montrent l'effet du chaulage comparé au non chaulage sur le nombre de nodules par plant, la masse de nodules par plant, la masse d'une nodule, la masse racinaire et la masse foliaire par plant, ainsi que les rapports masse des nodules/masse racinaire et biomasse racinaire sur biomasse aérienne (foliaire).

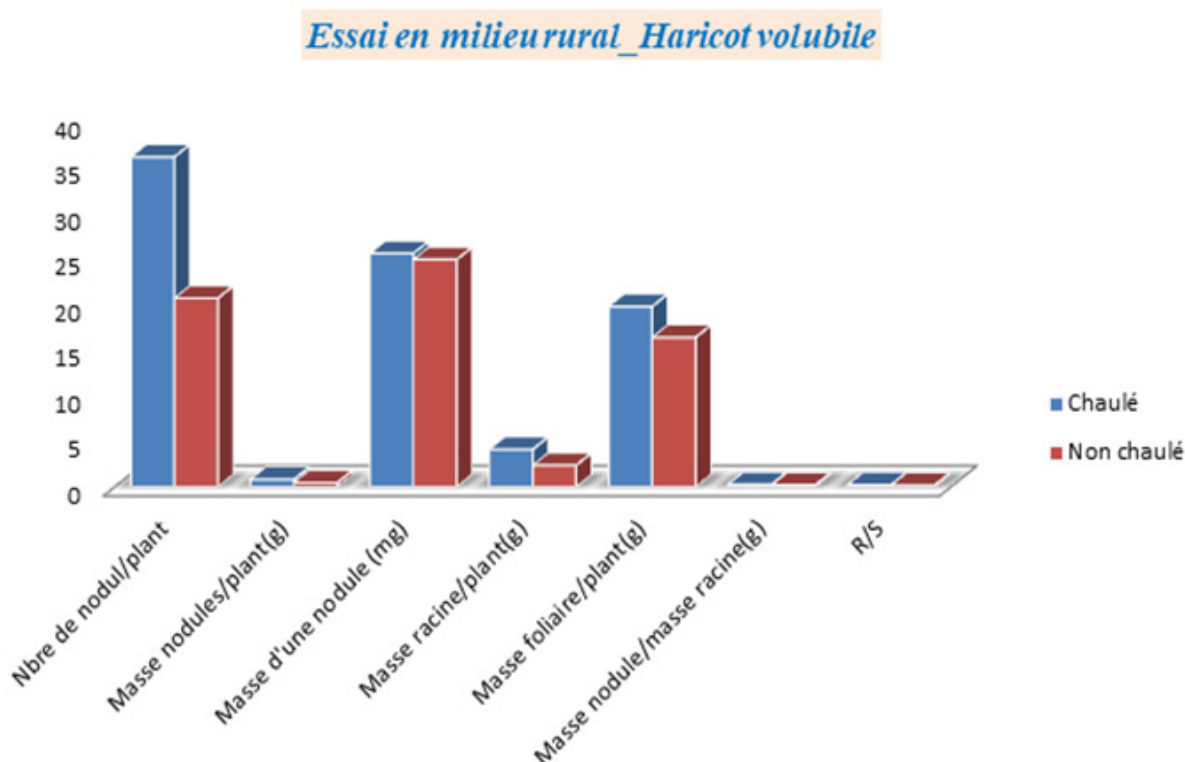


Figure 1. Effet de la dolomie sur la nodulation du haricot volubile en milieu rural

Pour les paramètres mesurés, l'application de la dolomie améliore systématiquement les performances de nodulation et d'accumulation de biomasse du haricot volubile (Figure 1) et du haricot nain (Figure 2) par au non chaulage. La même observation s'applique aux résultats de rendements rapportés par Hatungimana et al. (2025), ailleurs dans le présent document.

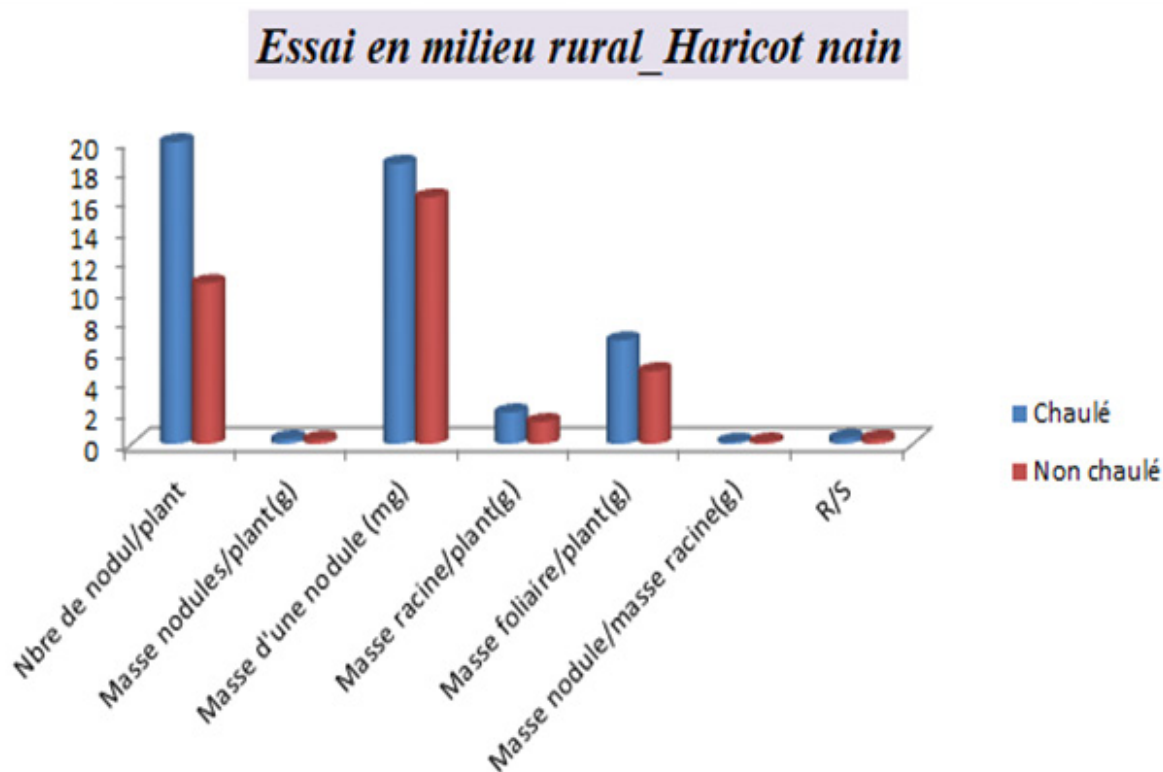


Figure 2. Effet de la dolomie sur la nodulation du haricot nain en milieu rural

4. CONCLUSION ET PESPCTIVES

Les résultats obtenus sur la nodulation sont cohérents avec ceux présentés par les autres auteurs du présent document. Le fumier de vache combiné à la dolomie montre de meilleures performances pour la nodulation du haricot. De manière globale, l'on constate que dans les sols acides non chaulés, la nodulation est presque nulle. De l'autre côté, le chaulage associé à l'approche intégrée de la fertilité des sols, combinant la dolomie à la matière organique améliore significativement la nodulation du haricot, aussi bien nain que volubile. La pratique de fertilisation dualiste combinant la dolomie à la matière organique et optimisant leur synergie est une stratégie viable pour une production agricole durable sur les sols acides du Burundi. La production et la vulgarisation des inocula de rhizobium et mycorhizes pour fixer l'azote et le phosphore dans le sol devrait constituer une des priorités des services agricoles du Burundi, avec à la tête l'ISABU et le cas échéant, les Institutions Universitaires à vocation agronomique. Ce serait l'agro-écologie à l'oeuvre.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi. Nos remerciements s'adressent de manière particulière aux agri-chercheurs qui ont accepté de mettre à notre disposition leurs parcelles pour la conduite des expérimentations et aux techniciens de terrain du MINEAGRIE et des partenaires de terrain du projet PAGRIS/IFDC qui en ont efficacement assuré leur suivi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDES

1. Achigan-Dako E. G., Houdegbe A. C., Glèlè M., Womdim R. N., MAEP, 2013. Analyse du système de production et de distribution des semences de maïs (*Zea mays* L.) au Sud-Bénin. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 18(1), 49-60
2. Andrade, D.S., Murphy, P.J., Giller, K.E., 2002. The Diversity of Phaseolus-nodulating rhizobial populations is altered by liming of acid soils planted with *Phaseolus vulgaris* L. in Brazil. *Applied and Environmental Microbiology* 68, 4025-4034.
3. Bado BV. 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. *Philosophiae Doctor (Ph.D.)*, Université de Laval, Laval, p. 197.
4. Bargaz A., 2012. Caractérisation agrophysiologique et biochimique de symbioses haricot (*Phaseolus vulgaris*)-rhizobia performantes pour la fixation symbiotique de l'azote sous déficit en phosphore. (DESA: Biotechnologies Microbienne et Alimentaire), 163 p.
5. Bargaz A., Ghoulam C., Amenc L., Lazali M., Faghire M., Abadie J., Drevon J.J., 2012. Phosphoenol pyruvate phosphatase is induced in the root nodule cortex of *Phaseolus vulgaris* under phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany* 63, 4723-4730.
6. Drevon J.J., Alkama N., Araujo A.P., Beebe M., Blair M., Attar H., Jaillard B., Lopez A., MartinezRomero E., Rodino P., Tajiri F., Zaman-Allah M., 2011. Nodular diagnosis for ecological engineering of the symbiotic nitrogen fixation with legumes. *Proceedings of Environmental Sciences* 9, 40-46
7. Kasongo RK, Van Ranst E, Kanyankogote P, Verdoodt A, Baert G. 2012. Réponse du soja (*Glycine max*) à l'application de phosphate de Kanzi et de dolomie rose de Kimpese sur sol sableux en RD Congo. *Canadian Journal of Soil Science*, 92: 905-916. DOI: 10.4141/CJSS2011-097
8. Lazali M., Brahimi S., Merabet C., Latati M., Benadis C., Maougal R.T. Blavet D., Drevon J.J., Ounane S.M., 2016. Nodular diagnosis of contrasting recombinant inbred lines of *Phaseolus vulgaris*
9. Maougal, R.T., Brauman, A., Plassard, C., Abadie, J., Djekoun, A., Drevon, J.-J., 2014. Bacterial capacities to mineralize phytate increase in the rhizosphere of nodulated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under P deficiency. *European Journal of Soil Biology* 62, 8-14
10. Megueni C, Awono ET, Ndjouenkeu R. 2011. Effet simultané de la dilution et de la combinaison du *Rhizobium* et des mycorhizes sur la production foliaire et les propriétés physico-chimiques des jeunes feuilles de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *J. Appl. Biosci.*, 40: 2668-2676.
11. Ntihakose, S., 1986. Symbiose *Rhizobium*/Légumineuses : Production d'Inoculum et Contrôle de l'efficacité de trois souches de *Rhizobium japonicum* et trois souches de *Rhizobium leguminosarum*. Mémoire. Bujumbura. FACAGRO, 82p.
12. Planchette C, Clermont-Dauphin C, Meynard JM, Fortin JA. 2005. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1): 31-40.
13. Sindayihebura, F. 1990. Récupération des sols acides du Burundi. Effet de la dose de calcaire sur la croissance et l'autotrophie azotée du haricot (*Phaseolus vulgaris* L. var Diacol Calima. Mémoire UB. Faculté des Sciences Agronomiques. Département de Fertilisation et Phytotechnie.
14. Zoundji CC, Houngnandan P, Amidou MH, Kouelo AF and Toukourou F (2015b). Inoculation and phosphorus application effects on soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] productivity grown in farmers' fields of Benin. *The Journal of Animal and Plant Science* 25(5): 1384-1392.

Efficacité agronomique et efficacité économique du chaulage en milieu réel sur la culture de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)

Hatungimana Innocent², Salvator Kaboneka^{1*}, Séverin Nijimbere¹, Oscar Nduwimana³ et Micael Beun³

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie. Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. BP 2700 Bujumbura, Burundi. BP 2700 Bujumbura, Burundi.

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: salvator.kaboneka@ub.edu.bi

Résumé

La majorité des sols du Burundi sont ferallitiques, acides avec des risques de toxicité Al, très désaturés en bases (Ca, Mg, K), carencés en P, à faible activité microbienne et très peu productifs. L'étude vise à évaluer l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage sur la culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans les parcelles de démonstration. Dans cette optique des expérimentations sur l'efficacité du chaulage ont été conduites en milieu réel à Kiremba, Tangara, Muruta, Matongo et à Mabayi sur le haricot volubile et le haricot nain. L'évaluation de l'efficacité agronomique a porté sur plusieurs paramètres notamment le rendement de la culture du haricot, la croissance en hauteur, le poids de 1000 graines, la longueur racinaire, la production de biomasse racinaire sèche, la biomasse aérienne sèche, la biomasse totale sèche, l'indice de récolte (Harvest Index), le rapport R/S, le nombre de gousses par plant, le nombre de graines par gousse, le nombre de graines par plant et le rendement en grains afin d'obtenir une analyse complète de l'impact de la dolomie sur la culture du haricot. Les résultats montrent un effet positif et significatif du chaulage sur ces paramètres considérés sauf sur le poids de 1000 graines. Rien qu'en considérant le paramètre intégrateur qui est le rendement, l'on relève que pour le haricot volubile, la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,1 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC). La même comparaison analytique appliquée au haricot nain montre que la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,6 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC). En ce qui concerne l'efficacité économique, les résultats analytiques montrent clairement que les bénéfices agronomiques obtenus grâce au chaulage justifient les coûts engagés pour cette pratique. Cette étude souligne l'importance du chaulage comme pratique agronomique pour améliorer la productivité de la culture de haricot, ce qui pourrait contribuer à la sécurité alimentaire et nutritionnelle au Burundi. Les résultats encouragent les agriculteurs à adopter cette pratique pour maximiser leurs rendements.

Mots-clés : Acidité, dolomie, haricot, efficacité agronomique, efficacité économique

Abstract

The majority of soils of Burundi are ferallitic, acids with Al toxicity risks, highly disaturated in bases (Ca, Mg, K), deficient in P, low microbial activity and very unproductive. The study aims to evaluate the agronomic effectiveness and economic efficiency of liming on bean cultivation in demonstration pots. In this light of experimentations on the effectiveness of lime application have been led in real-world environment in Kiremba, Tangara, Muruta, Matongo and Mabayi on the volubile bean and midrain bean. The Evaluation of agronomic efficiency carried on several parameters notably yield of bean crop, height growth, 1000 seed weight, root length, dry root biomass production, dry air biomass, total biomass dry, harvesting biomass, harvesting index (Harvesting grain is Index, R/S report, seedling number, crop analysis, and grain crop analysis, the number of grain yield, and the number of seeds

yielded by pod yield, the number Results show a positive and significant effect of the chaulage on these parameters considered except on the weight of 1000 seeds. Nothing ilst considering the integrator parameter which is the yield, the Canon reports that for the volubile bean, the mean of the yield of the bolted plots (PC) is 2.1 times higher than that obtained in the unchained plots (PNC). The same analytical comparison applied to the dwarf bean shows that the average of yield of the stalled plots (PC) is 2.6 times higher than that obtained in the uncasted plots (PNC). Regarding economic efficiency, analytical results clearly show that agronomic profits obtained through the chaulage justify the costs incurred for this practice. This study emphasizes the importance of caulking as agronomic practice to improve bean crop productivity, which could contribute to food security in Burundi. Results encourage farmers to adopt this practice to maximize their returns.

Keywords: Acidity, dolomitic lime, bean, agronomic efficiency, economic efficiency



1. INTRODUCTION

Le Burundi est confronté à de nombreux problèmes de dégradation des sols, d'érosion en nappe, de glissements de terrains et d'inondations (Roose, 1990; FABI/IFDC, 2024). La baisse de la fertilité des sols est une préoccupation aussi bien pour les agriculteurs qui se heurtent au coût élevé des intrants que pour les chercheurs dont les travaux de recherche visent à maintenir ou à restaurer la fertilité des sols dégradés pour une intensification de la production agricole (Biaou et al., 2017).

Les sols du Burundi sont pauvres à cause de la toxicité aluminique, de la carence en Ca, Mg, en potasse et en soufre ainsi qu'une faible activité microbienne avec une faible capacité de fixation d'azote (Hicintuka & Masilya, 2013; ISABU/IFDC, 2021). Les études faites et les cartes produites sur l'état actuel de la fertilité du sol par l'ISABU en 2013 et par l'IFDC en 2021 ont prouvé que la majorité des sols du Burundi sont à 73 % très acides. L'acidité du sol est l'un des principaux facteurs limitant la croissance et la productivité de nombreuses cultures, en particulier dans la plupart des régions tropicales et subtropicales (Junior et al., 2020).

Les causes de l'acidité des sols sont nombreuses et variées. Elles sont décrites par les équations rapportées au Chapitre 1. L'acidité des sols contrôle la vie dans le sol, la croissance, la physiologie et la production des plantes et l'environnement (Kaboneka et al., 2020). Elle diminue également la capacité à retenir les cations échangeables (Ca, Mg, K) (Bravin et al., 2018). Par conséquent, une forte acidité réduit la disponibilité en éléments nutritifs et induit la toxicité en aluminium (Al^{3+}), ce qui provoque une baisse des rendements (Bado et al., 1997).

Le chaulage, ou l'application de chaux dolomitique, est une pratique courante visant à neutraliser l'acidité du sol, mais son efficacité spécifique et son impact économique réel dans des conditions de culture réelles sont des sujets qui méritent une étude approfondie. Son efficacité agronomique réside dans ses effets bénéfiques sur le sol et les cultures. En neutralisant l'acidité du sol, la chaux dolomitique favorise une meilleure disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes, ce qui peut augmenter le rendement des cultures. Ainsi, l'application de fumure organique, le chaulage, les techniques de conservation... permettent de favoriser certains éléments ou augmenter leur disponibilité (Rosy & Biolders, 2019).

Dans les contextes réels de production, il est essentiel de comprendre l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage dans la culture du haricot. Cependant, malgré son importance potentielle, il existe un manque de recherches approfondies sur le sujet, en particulier en ce qui concerne les effets spécifiques du chaulage sur la culture du haricot dans des conditions réelles de production. Ainsi, pour pallier à ce genre de problème et afin d'évaluer les effets du chaulage sur le haricot volubile et le haricot nain, des essais visant la combinaison optimale de la fumure organique, organo-minérale et l'amendement dolomitique ont été conduits, dans les champs des agri-chercheurs, à Kiremba et Tangara en province de Ngozi, à Muruta et Matongo en province de Kayanza et à Mabayi en province de Cibitoke. Afin de combler cette lacune de connaissances, la présente étude vise à «évaluer l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage sur la culture du haricot dans les parcelles de démonstration suivies et entretenues par les agri-chercheurs associés au PAGRIS, sous l'encadrement de son personnel de terrain».

La plupart des sols du Burundi sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), très bourrés en aluminium et pauvres en éléments nutritifs. Près de trois quarts (73 %) des sols du Burundi sont acides (ISABU & IFDC - PAGRIS, 2021). De ce fait, l'acidité des sols est un problème généralisé sur le territoire du Burundi sauf dans certains endroits de la plaine de l'Imbo et dans les dépressions du nord. La réaction acide 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 (Kaboneka et al., 2020). Dans ce contexte, l'application de la chaux dolomitique et des fumiers sont recommandées pour corriger l'acidité des sols. C'est une pratique agronomique courante utilisée pour améliorer la fertilité et la productivité des sols dans de nombreuses régions du monde. Elle consiste en l'application de chaux agricole au sol pour neutraliser l'acidité et améliorer les conditions physiques, chimiques et biologiques du sol. Cette pratique est largement adoptée dans l'agriculture, mais son impact spécifique sur certaines cultures, en particulier le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), en conditions réelles demeure relativement peu documenté.

Cependant, le chaulage n'est pas sans coûts. L'achat et l'application de la chaux agricole peuvent représenter des dépenses importantes pour les agriculteurs. De plus, la réaction chimique entre la chaux et l'acidité du sol peut prendre du temps, ce qui signifie que les effets bénéfiques du chaulage peuvent ne pas être immédiatement

perceptibles. Ainsi la présente étude vise à combler cette lacune de connaissance en évaluant l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage sur la culture du haricot dans les parcelles de démonstration suivies et entretenues par les agri-chercheurs associés au PAGRIS, sous l'encadrement de son personnel de terrain».

L'acidité du sol est un important facteur qui limite le rendement des cultures et la santé globale des sols (Dupré, 2021). Cela est principalement dû au fait que le sol acidifié réduit la disponibilité de plusieurs éléments nutritifs vitaux, tout en exacerbant le niveau de toxicité des autres éléments toxiques, en modifiant de nombreuses réactions chimiques et biologiques dans le sol (Li et al., 2019). L'acidification est causée à la fois par des processus naturels (via les cycles C, N et S) et par des activités anthropiques (Holland et al., 2018).

Une grande partie du territoire burundais est caractérisée par des sols à forte acidité, se traduisant par une faible saturation en bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) sur le complexe d'échange qui est par contre essentiellement saturé en cations acides, en l'occurrence les ions Al^{3+} et H^+ (Nduwimana et al., 2020 ; Opdecamp, 1988). L'acidité des sols contrôle la vie dans le sol, la croissance, la physiologie et la production des plantes et l'environnement (Kaboneka et al., 2020). Elle contrôle le fonctionnement physique, chimique et microbiologique du sol dans son ensemble. Certains chercheurs avancent même que l' Al^{3+} échangeable est le principal indicateur de la qualité d'un sol et de sa productivité potentielle (Opdecamp, 1988; Hue et al., 1986) Un certain nombre de travaux ont montré que les amendements calco-magnésiens améliorent la productivité des sols acides et neutralisent la toxicité aluminique (e.g. Landa, 1983;Wakana, 1984 ; Bacanamwo & Ruyikiri, 1987; Materechera & Mkhabela, 2002; Bizimana, 2003; Nimubona, 2005; Ndayishimiye, 2007).

La matière organique du sol ou appliquée joue aussi un rôle de chaulage, en ce sens que les molécules organiques complexent (chélation) Al^{3+} et le rendent ainsi inoffensif (Hue et al., 1986 ; Hue, 1992). Des travaux de mémoires effectués à la Faculté des Sciences Agronomiques (FACAGRO) de l'Université du Burundi (Bizimana, 2003; Nimubona, 2005) ont rapporté une plus grande efficacité des fientes de poule (*Gallus domesticus*) par rapport aux fumiers de vache (*Bos taurus*), de chèvre (*Capra aegagrus hircus*) ou de mouton (*Ovis aries*). Cependant, pour contrer les effets de l'acidité, L'ajout des amendements chaulant aux sols acides représente la principale stratégie utilisée depuis des siècles ; or ces apports dépendent du pouvoir des sols à résister contre le changement de leur acidité et des pH ciblés des cultures (Dupré, 2021).

Le chaulage est une pratique agricole visant à augmenter le pH des sols acides via des amendements basiques (Caulus, 2018); consistant à appliquer du calcaire (sous forme de chaux agricole) sur le sol pour neutraliser son acidité et améliorer sa structure. Il améliore les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol (Poozesh, 2007). Le chaulage augmente la réponse des engrais en améliorant le prélèvement des nutriments par les plantes et permet de réduire la toxicité aluminique et de stimuler l'activité microbienne, ce qui peut permettre d'augmenter la disponibilité des éléments nutritifs essentiels (Sall, 2018). Cela permet d'optimiser les conditions de croissance des plantes en favorisant l'absorption des nutriments du sol et en réduisant les effets néfastes de l'acidité sur les racines.

Les amendements basiques sont des produits de différentes origines capables d'augmenter le pH d'un sol et d'en améliorer la structure (Crémer et al., 2008). Le chaulage peut donc être une technique intégrée qui affecte l'ensemble des paramètres régissant le comportement global de l'écosystème agricole (Laguisse, 2017).

Le chaulage présente plusieurs avantages pour les cultures ci-après. Ils contribuent à augmenter les rendements agricoles et à améliorer la qualité des cultures. Ils sont notamment les suivants :

1. Ajustement du pH du sol : Le chaulage permet de corriger l'acidité du sol, favorisant ainsi un pH optimal pour la croissance des plantes.
2. Amélioration de la structure du sol : Le chaulage peut aider à améliorer la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules, ce qui facilite la circulation de l'air et de l'eau.
3. Réduction de la toxicité des métaux lourds : Il peut contribuer à réduire la disponibilité des métaux lourds dans le sol, ce qui est bénéfique pour la santé des plantes et la sécurité alimentaire
4. Fourniture de Ca et de Mg : Le chaulage fournit du Ca et du Mg, deux éléments essentiels pour la croissance et le développement des plantes

5. Amélioration de l'efficacité des engrais : En ajustant le pH du sol, le chaulage rend les nutriments présents dans le sol ou ajoutés par des engrais plus accessibles aux plantes.
6. Réduction des maladies du sol : Il peut aider à réduire la prévalence de certaines maladies du sol en créant un environnement moins favorable aux pathogènes
7. Stimulation de l'activité des microbienne bénéfique : Un pH du sol équilibré favorise l'activité des micro-organismes bénéfiques responsables de la décomposition de la matière organique et de la libération de nutriments.

De l'autre côté, le chaulage peut présenter quelques inconvénients, notamment en ce qui concerne son impact sur l'environnement. En effet, dans des situations où l'utilisation de chaux vive ou de chaux hydratée pour le chaulage peut entraîner une augmentation du pH du sol, ce qui peut avoir des effets néfastes sur la biodiversité du sol et sur les organismes vivants qui y résident (Bolan et al., 2003). De plus, le chaulage peut également entraîner une augmentation de la salinité du sol, ce qui peut affecter la croissance des plantes et réduire la disponibilité des nutriments pour les cultures (Rengel, 2003). En outre, l'excès de chaux dans le sol peut également entraîner des perturbations dans le cycle des éléments nutritifs, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur la fertilité du sol à long terme (Bolan et al., 2003).

Enfin, il convient de noter que le chaulage peut également avoir des effets négatifs sur la qualité de l'eau en favorisant le lessivage des nutriments et des polluants vers les eaux souterraines et les cours d'eau avoisinants (Rengel, 2003). Il est donc important de prendre en compte ces différents aspects avant de recourir au chaulage comme pratique agricole.

D'autre part, l'application de la chaux/dolomie améliore la fixation biologique de l'azote. La capacité des bactéries fixatrices d'azote à agir avec succès dépend de divers facteurs physico-chimiques et environnementaux telles que la température, la salinité, le pH, l'humidité, le manque de nutriments ou encore la toxicité métallique, pouvant affecter significativement les performances agronomiques et physiologiques de la plante, la bactérie fixatrice (*Rhizobium*) et le fonctionnement efficace des nodules (Razafintsalama, 2018).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Description et localisation géographique des zones d'étude

L'étude expérimentale a été réalisée au Burundi, dans les parcelles de démonstration appartenant aux agricheurcheurs dans les communes de Kiremba et Tangara de la province de Ngozi, dans les anciennes communes Muruta et Matongo de la province Kayanza et en commune Mabayi de la province Cibitoke, en milieu rural. Ces sites ont été choisis du fait qu'ils se situent dans les zones d'action du projet PAGRIS. La carte suivante montre la localisation géographique des zones d'étude.

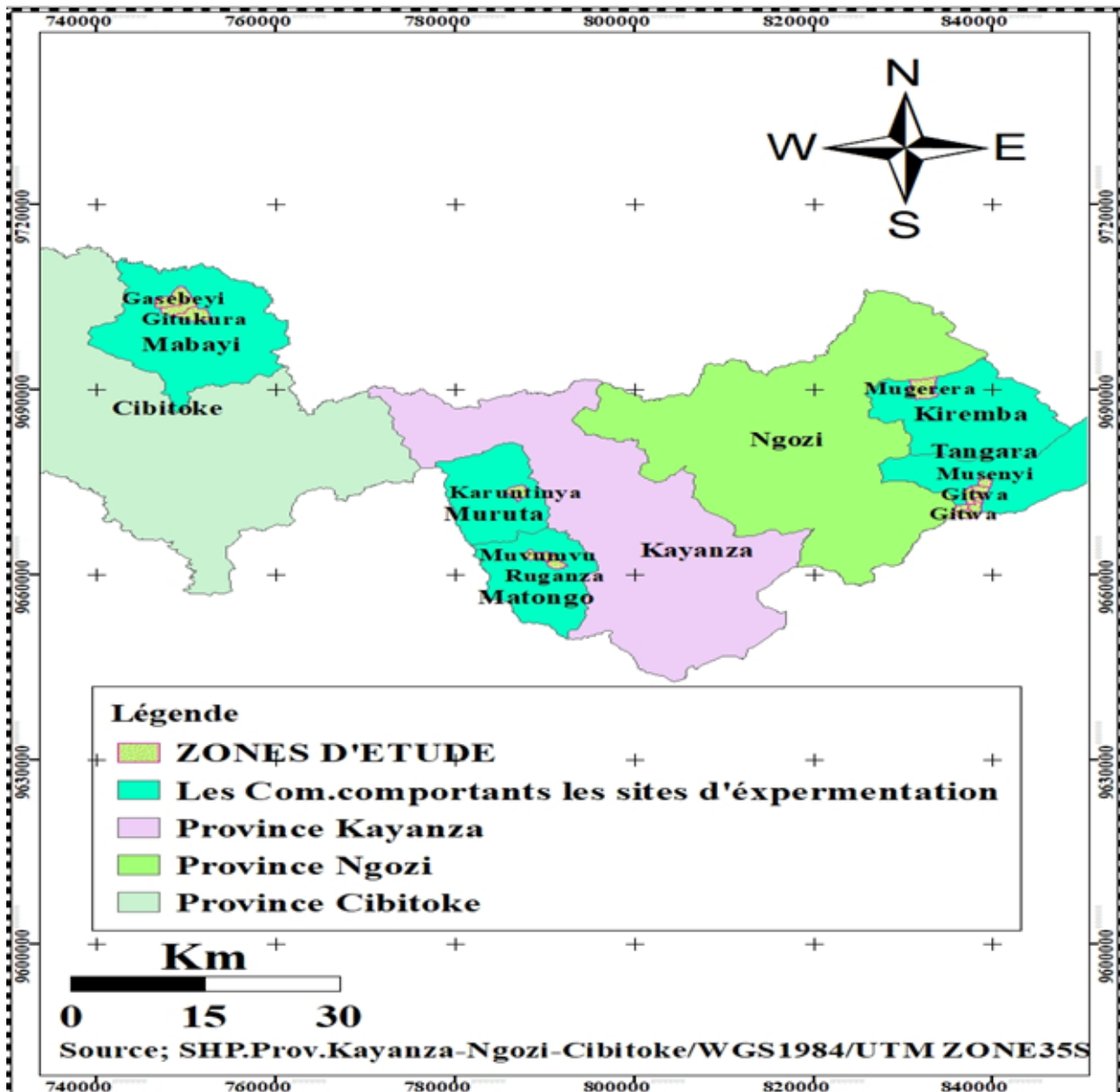


Figure 3. Localisation de la zone d'étude

2.2. Collecte des données

2.2.1. Matériel végétal et application des intrants agricoles

Le choix de la culture de haricot a été motivé par sa sensibilité à l'acidité et la toxicité Al du sol (Wouters et al., 1985). La culture test utilisée dans cette étude menée en milieu réel était celle du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) volubile et nain. Les agriculteurs ont utilisé leurs propres semences de haricot. Nous avons également utilisé les engrais organo-minéraux (FOMI-Imbura), le fumier et la dolomie. Le fumier utilisé pendant l'étude ont été produit par les agriculteurs eux-mêmes et l'engrais utilisé était FOMI Imbura de formule suivante : 9% N, 22% P_2O_5 , 4% K_2O , 13% CaO, 2% MgO. La chaux dolomitique utilisée avait comme composition 29% CaO et 21% MgO. Elle a été distribuée aux agriculteurs dans le cadre du projet PAGRIS et proviennent du FOMI.

L'application des fertilisants s'est référée à la fiche technique de fertilisation harmonisée pour la culture du haricot au Burundi, alors que l'application de fumure organo-minérale (FOMI-Imbura) et de la dolomie s'est faite sur formule établie par la FOMI et approuvée par l'ISABU.

2.2.2. Choix des producteurs

Les douze agri-chercheurs choisis qui ont constitué l'échantillon de notre étude sont les bénéficiaires du projet dénommé : « PAGRIS ». Pour la conduite de cette étude, chaque producteur a aménagé une parcelle de 200 m² (2 ares).

2.2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé était assimilé aux blocs complètement randomisés mais dispersés où chaque producteur constitue un bloc, correspondant à une technique de production de haricot en culture pure ou associée sur une parcelle d'une superficie de 200 m² divisée en deux parcelles élémentaires de 100 m² représentant deux traitements distincts : le traitement T1 ayant reçu la fumure organo-minérale (FOMI-Imbura) et fumure organique; et le traitement T2 ayant reçu la fumure organo-minérale (FOMI-Imbura), fumure organique et la dolomie.

De la sorte, notre étude a été faite dans les parcelles de douze agri-chercheurs dont six pour le haricot volubile et six pour le haricot nain. Le schéma du dispositif expérimental adopté est présenté sur la figure ci-dessous :

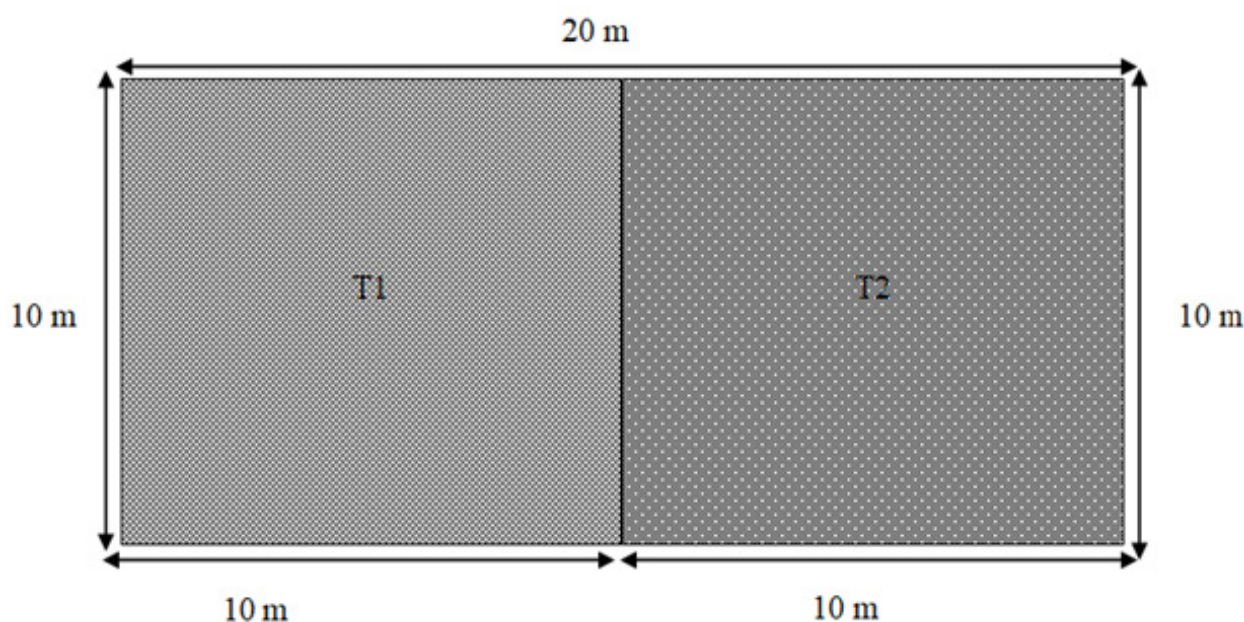


Figure 4. Dispositif expérimental utilisé

2.2.4. Opérations culturales

Une fiche de suivi attribuée à chaque producteur permettait de noter les dates des opérations culturales. Les semis ont été effectués en lignes avec deux graines par poquet, que ce soit pour le haricot volubile ou pour le haricot nain. Les écartements étaient de 40 cm entre les lignes et 20 cm entre les poquets pour le haricot nain et de 50cm entre les lignes et 20 cm entre les poquets pour le haricot volubile (Godderis, 1995; Ruraduma et al., 2012).

La dolomie a été appliquée à la dose de 0,5 T/ha ; le fumier a été apporté comme fumure de fond à la dose de 10 tonnes à l'hectare, la FOMI-Imbura a été apporté à la dose de 150 kg à l'hectare pendant le semis. Le sarclage a été effectué 3 semaines après le semis pour tous les agri-chercheurs des désherbages réguliers étaient menés par la suite afin de maintenir une propreté permanente des essais. la pose des tuteurs pour le haricot volubile a été faite avant que le haricot ne manifeste son aptitude à grimper (Godderis, 1995; Ruraduma et al., 2012). Le tableau suivant montre le calendrier de plantation et de récolte

Tableau 2. Calendrier de plantation et de récolte

Application de la dolomie	Plantation	Récolte	Cycle végétatif (jours)
12/10/2022	10/03/2023	10/06/2023	93
26/08/2023	25/02/2023	20/06/2023	116
26/08/2023	25/03/2023	20/06/2023	88
27/08/2023	28/02/2023	04/07/2023	127
22/08/2022	25/03/2023	25/06/2023	92
24/08/2022	22/03/2023	25/06/2023	96
27/08/2022	23/02/2023	04/07/2023	132
23/08/2022	25/02/2023	15/06/2023	111
23/08/2022	01/03/2023	15/06/2023	107
13/08/2022	20/02/2023	25/06/2023	126
25/08/2022	23/02/2023	25/06/2023	123
12/10/2022	25/02/2023	10/06/2023	106

2.2.5. Méthode de collecte des données

Les données ont été collectées dans deux carrés de rendements suivant une diagonale dans chaque parcelle élémentaire et à des périodes distinctes. Les superficies de ces carrés de rendement étaient de 4 m² pour la collecte des données. A la récolte, cinq plantes ont été prélevées en creusant soigneusement autour de la rhizosphère à l'aide d'une houe dans chaque carré de rendement. Les racines soigneusement récupérées ont été débarrassées des particules de terre pour les rendre mieux visibles et récupérables. Ces racines munies de la biomasse aérienne ont été soigneusement conservées dans un sachet biodégradable pour faciliter leur transport.

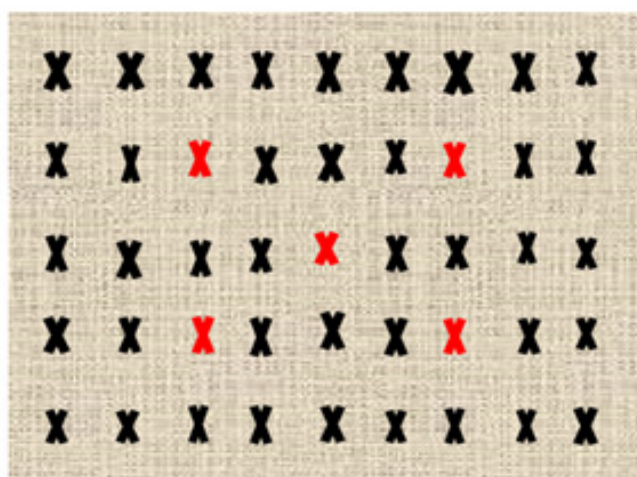


Figure 5. Méthodologie d'échantillonnage (plants échantillonnés en rouge)

Après la récolte, nous avons procédé au comptage du nombre de gousses des cinq plants échantillons de haricot. Les gousses ont été séchées à l'air libre pendant dix jours. Puis, elles ont été décortiquées séparément pour l'obtention des graines en vue du comptage afin d'avoir le nombre de graines par gousse.

Pour la détermination du poids de 1000 graines (en gramme), les gousses de chaque carré de rendement ont été décortiquées puis séchées à l'air libre pendant quinze jours.

La biomasse aérienne et racinaire de chaque carré de rendement a été séparée à l'aide d'un ciseau et puis on a déterminé le poids sec de chaque biomasse à l'aide d'une balance analytique de type Sartorius avec une précision de 0,01 près. La longueur des racines a été déterminée afin d'avoir une idée sur le volume du sol occupé par les racines. La hauteur des tiges et la longueur racinaire ont été mesurées à l'aide d'un mètre ruban. Le rendement à l'hectare (en kg) a été estimé à travers le poids total des graines sèches de chaque carré de rendement suivi d'une extrapolation des résultats obtenus.

Pour compléter l'analyse expérimentale, une enquête qualitative et quantitative a été menée auprès des douze Agri-chercheurs bénéficiaires du projet PAGRIS. Un échantillon représentatif a été sélectionné dans chaque commune de la zone d'étude. Lors de la collecte des données sur terrain, un questionnaire structuré a été élaboré intégrant des questions fermées et ouvertes pour capter à la fois des statistiques précises et des expériences personnelles.

Des visites ont été effectuées dans les communautés ciblées où on a rencontré les agriculteurs directement sur leurs exploitations. Des entretiens individuels ont été menés pour obtenir des informations détaillées sur leurs pratiques agricoles, leurs perceptions concernant le chaulage et facteurs socio-économiques influençant leurs décisions. Des observations directes sur les parcelles notant les l'état des cultures ont également réalisé.

2.3. Traitement des données

2.3.1. Paramètres mesurés

Ils concernaient : la hauteur des plants, la longueur racinaire, le nombre de gousses par plante, le nombre de graines par gousse, le poids de la biomasse aérienne sèche, le poids de la biomasse racinaire sèche, le poids de la biomasse totale sèche, le poids de 1000 graines, l'indice de récolte, l'indice de récolte ajusté (à la biomasse racinaire), la densité racinaire (g/dm^3), le rendement graines à l'hectare et le rapport R(roots)/S (shoots). Ces différents paramètres ont été mesurés chez tous les douze agri-chercheurs partenaires du projet PAGRIS.

2.3.2. Analyse statistiques

Dans le cadre de l'étude expérimentale, le tableur Microsoft Excel 2013 a été utilisé pour la saisie et paramétrage des données récoltées sur les fiches ainsi que pour la représentation des données sur les graphiques. Cela a permis d'obtenir une base de données sous format Excel. Cette base de données a été importée vers SPSS où les analyses ont été effectuées. D'abord, une analyse descriptive a été réalisée pour caractériser les enquêtés et la zone d'étude. Ainsi, les effectifs et les fréquences y relatives ont été obtenus sur les variables qualitatives. D'autre part, les statistiques descriptives telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'erreur standard et l'écart type ont été dégagés sur les variables quantitatives. Par ailleurs, l'efficacité agronomique a été étudiée en comparant certains paramètres de performances à l'aide du test de Student. De plus, l'efficacité économique a été étudiée via l'établissement des corrélations entre les coûts de production et le rendement.

Dans cette étude sur l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage, ces statistiques fournissent un cadre analytique solide pour interpréter ces données. La moyenne permet de résumer l'efficacité agronomique sur certains paramètres des cultures, et l'efficacité économique. En comparant les moyennes de différents traitements, notamment ceux avec et sans chaulage, l'impact a été étudié. De plus, l'écart-type a aidé à comprendre la variabilité des résultats obtenus dans ces essais. Une faible variabilité indique que les effets du chaulage sont cohérents, tandis qu'une forte variabilité pourrait suggérer que d'autres facteurs influencent les résultats. Ainsi, cette mesure est essentielle pour évaluer la fiabilité des résultats. Si l'écart-type est faible, cela renforce la confiance dans l'efficacité du chaulage, alors qu'un écart-type élevé pourrait nécessiter une investigation supplémentaire.

En outre, l'erreur standard fournit une estimation de la précision de la moyenne calculée à partir de l'échantillon, ce qui est particulièrement pertinent lorsqu'on évalue les résultats d'essais avec un nombre limité de répétitions. Par conséquent, une petite erreur standard indique que la moyenne observée est une bonne estimation de

la vraie moyenne de la population, ce qui est crucial pour tirer des conclusions sur l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage.

En ce qui concerne le test de Student, il est essentiel pour comparer les moyennes de deux groupes, par exemple les parcelles traitées avec chaulage contre celles sans chaulage, afin de déterminer s'il existe une différence significative entre elles. Cela permet de valider nos hypothèses sur l'impact du chaulage ; si le test indique une différence significative, cela renforce l'argument en faveur de l'utilisation du chaulage dans les pratiques agricoles. D'autre part, les figures telles que les graphiques et diagrammes sont utiles pour visualiser ces données et rendre les résultats plus accessibles. Ainsi, une bonne visualisation des données peut aider à communiquer les résultats à un public plus large, incluant des agriculteurs, des décideurs politiques et d'autres parties prenantes.

Enfin, les tests de corrélation, comme le coefficient de corrélation de Pearson, a permis d'évaluer la force et la direction des relations entre différentes variables, par exemple entre le coût de chaulage et le rendement des cultures. Cela permet d'identifier si une augmentation du chaulage est associée à une augmentation du rendement ou à une diminution des coûts, fournissant ainsi des insights précieux pour optimiser les pratiques agricoles.

3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Présentations des Résultats

3.1.1. Analyse des sols

Les analyses du sol ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols et Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'ISABU. Les analyses effectuées concernaient le pH eau, le % en azote total, le % C organique, le P assimilable (mg/kg de sol ou ppm), la CEC (méq/100 g de sol), ainsi que le Ca, Mg, K échangeables (méq/100 g de sol). Les méthodes analytiques sont celles en vigueur dans ce laboratoire. L'acidité échangeable, qui peut être considérable dans certaines parcelles (pH < 5,5) des agri-chercheurs n'a pas été mesurée. Le tableau suivant montre les caractéristiques chimiques des sols des champs d'expérimentation.

Tableau 3. Caractéristiques chimiques des sols des champs d'expérimentation

Parcelles	pH _{eau}	% N	% C	Ca (méq/100 g de sol)	Mg (méq/100 g de sol)	P(mg/kg de sol ou ppm)	K (méq/100 g de sol)	CEC (méq/100 g de sol)
1	4,97	0,21	1,41	0,70	0,48	3,48	0,74	15,3
2	4,70	0,30	2,23	0,42	0,20	4,35	0,81	15,0
3	4,95	0,39	3,33	1,05	0,16	8,58	0,07	19,9
4	4,95	0,16	0,73	1,36	0,54	4,15	0,28	8,45
5	4,50	0,25	1,48	0,80	0,35	8,40	0,08	12,6
6	5,15	0,16	1,27	1,59	0,64	11,6	0,16	8,15
7	4,97	0,21	1,84	1,48	0,73	3,98	0,16	13,3
8	4,73	0,17	1,27	0,86	0,23	6,72	0,70	12,1
9	5,32	0,23	1,13	2,71	0,98	4,40	0,68	10,3
10	5,72	0,24	1,54	6,07	2,89	9,86	0,44	14,4
11	5,30	0,24	1,68	3,66	0,80	21,8	0,70	14,7
12	5,35	0,22	1,45	0,67	0,49	3,45	0,73	15,6
Moyenne	5,02	0,23	1,61	1,78	0,71	7,56	0,46	13,3
Ecart type	0,25	0,04	0,44	1,18	0,43	3,74	0,26	2,5

Les résultats d'analyse des sols des 12 parcelles étudiées montrent des caractéristiques chimiques globalement typiques des sols cultivés du Burundi. Le pH varie de 4,50 à 5,72 avec une moyenne de 5,02, ce qui indique des sols majoritairement acides à fortement acides, en dessous du seuil de 5,6 recommandé pour une bonne fertilité (Tessens & Gourdin, 1993). Ce niveau d'acidité peut inhiber la disponibilité du phosphore, limiter la minéralisation de l'azote et accroître la toxicité de l'aluminium. Cette situation est conforme au constat de l'ISABU & IFDC, (2021) où 73 % des sols sont acides. Un chaulage à base de dolomie ou de chaux agricole est donc recommandé pour corriger cette acidité.

Concernant la matière organique, les pourcentages de carbone varient de 0,73 à 3,33 %, avec une moyenne de 1,61 %. Selon les normes nationales, cela traduit un niveau moyen à faible, certaines parcelles étant en déficit (< 1 %). De même, le taux d'azote total (%N) est compris entre 0,16 et 0,39 %, ce qui révèle une fertilité limitée en azote. Cette carence est attribuable à la faible teneur en matière organique. Il est donc conseillé d'apporter du compost ou du fumier bien décomposé en complément d'un engrais azoté adapté.

Selon Tessens & Gourdin (1993), un %C > 3,5 % est recommandé pour une bonne fertilité ; 1–3,5 % indique une fertilité moyenne, < 1 % est faible. La plupart de sols étudiés sont dans la fourchette moyenne, avec quelques parcelles faibles (< 1 %). Pour l'azote, le guide Hounkanrin (2018) classe 1–2 % comme moyennement riche donc sols étudiés sont faible à limite (0,16–0,39 %), confirmant un besoin d'engrais azotés.

Les teneurs en phosphore assimilable (3,48 à 21,8 ppm) sont très inférieures aux seuils critiques recommandés (> 50 ppm), indiquant une carence généralisée. Ce déficit est fréquent au Burundi, où 98 % des sols sont jugés pauvres en phosphore (ISABU&IFDC, 2021). L'apport d'engrais phosphatés est donc indispensable. Quant au potassium échangeable, les valeurs (0,07 à 0,81 cmol/kg) montrent une fertilité variable, certaines parcelles tombant en dessous du seuil critique de 0,2 cmol/kg. Une fertilisation potassique est requise dans ces cas.

Calcium & Magnésium : Ca 0,42–6,07 cmol (+ moy 1,78), Mg 0,16–2,89 (moy 0,71). Plusieurs parcelles présentent des niveaux faibles à moyens en Ca/Mg, ce qui, selon IFDC, justifie l'usage de chaux dolomitique pour rétablir les rapports Ca/Mg et corriger l'acidité. La capacité d'échange cationique (CEC), oscillant entre 8,15 et 19,9 cmol/kg (moyenne de 13,3), est globalement moyenne, ce qui traduit une capacité modérée à retenir les éléments nutritifs, compatible avec les sols ferrallitiques du pays. L'amélioration de la CEC peut être renforcée par l'accumulation de matière organique (Nijimbere et al. 2020). D'après Beernaert & Bitondo (1992), une CEC entre 10–25 est moyenne, reflétant une capacité modérée à retenir les cations

Les sols analysés présentent une acidité marquée, une carence en phosphore, potassium et azote, ainsi qu'un niveau modéré de matière organique et de CEC. Conformément aux recommandations de l'ISABU et aux normes de Tessens & Gourdin (1993), il est nécessaire de mettre en œuvre un programme de chaulage, d'amendement organique et de fertilisation minérale équilibrée pour restaurer durablement leur fertilité.

3.1.2 Analyse sociodémographique

1. Age des répondants

Le tableau 4 suivant montre les statistiques descriptives sur l'âge des répondants d'un échantillon.

Tableau 4: Statistiques descriptives sur l'âge

	N	Minimum	Maximum	Moyenne		Ecart type
	Statistique	Statistique	Statistique	Statistique	Erreur std	Statistique
Age	12	29	73	46,50	3,81	13,20

L'analyse de ce tableau montre que notre échantillon a en moyenne 46 ans ($\mu=46,50$ avec une erreur standard de 3,81) : Le moins âgé a 29 et le plus âgé a 73 ans. En moyenne la différence d'âge entre un enquêté et un autre est de 13 ans (Ecart type = 13,20).

2. Genre des répondants

La figure 6 suivante montre la répartition des ménages selon le genre de nos enquêtés.

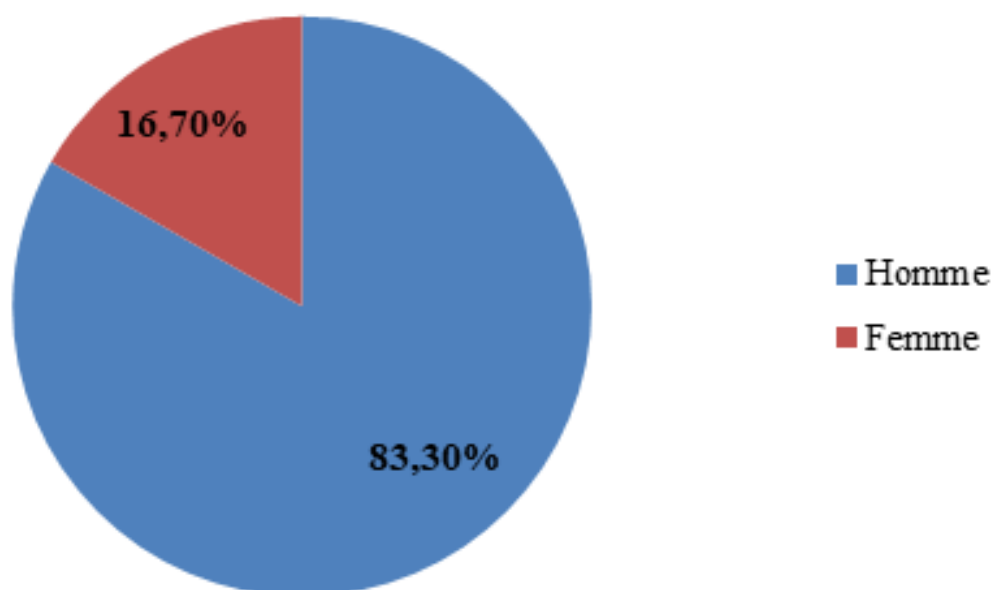


Figure 6 : Répartition des ménages selon le genre des répondants

Ainsi, l'échantillon est constitué par les hommes et les femmes. L'analyse de la figure 6 montre que cette étude porte sur 83,3% des hommes et 16,7% des femmes.

3. Taille de ménage

Le ménage est l'ensemble de personnes, quels que soient les liens qui les unissent, qui occupent un même logement à titre de résidence principale pendant au moins six mois et participent ensemble à son économie. La taille du ménage sera donc le nombre total de ces personnes. Le tableau 5 suivant met en évidence la moyenne de la taille du ménage dans un échantillon.

Tableau 5: Taille du ménage dans la zone d'étude

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
	Statistique	Statistique	Statistique	Statistique	Erreur std
Taille du ménage	12	1	10	6,08	0,70
					2,43

Les ménages de notre échantillon ont en moyenne 6 personnes. Le ménage qui a moins de personnes a une seule personne et le ménage qui a plusieurs personnes à 10 personnes. La différence de personnes entre un ménage et un autre est de 2,43 (écart-type).

4. Niveau d'étude

L'éducation est le principal outil qui permet à des individus marginalisés de sortir de la pauvreté, de réintégrer pleinement leurs communautés et de faire face à certains fléaux notamment l'acidité du sol. Dans notre échantillon, nous avons rencontré les personnes qui n'ont pas fréquentés l'école, Yagamukama, le niveau primaire et le niveau secondaire. La répartition des répondants selon leurs niveaux d'étude est présentée brièvement dans la figure 7 suivante.

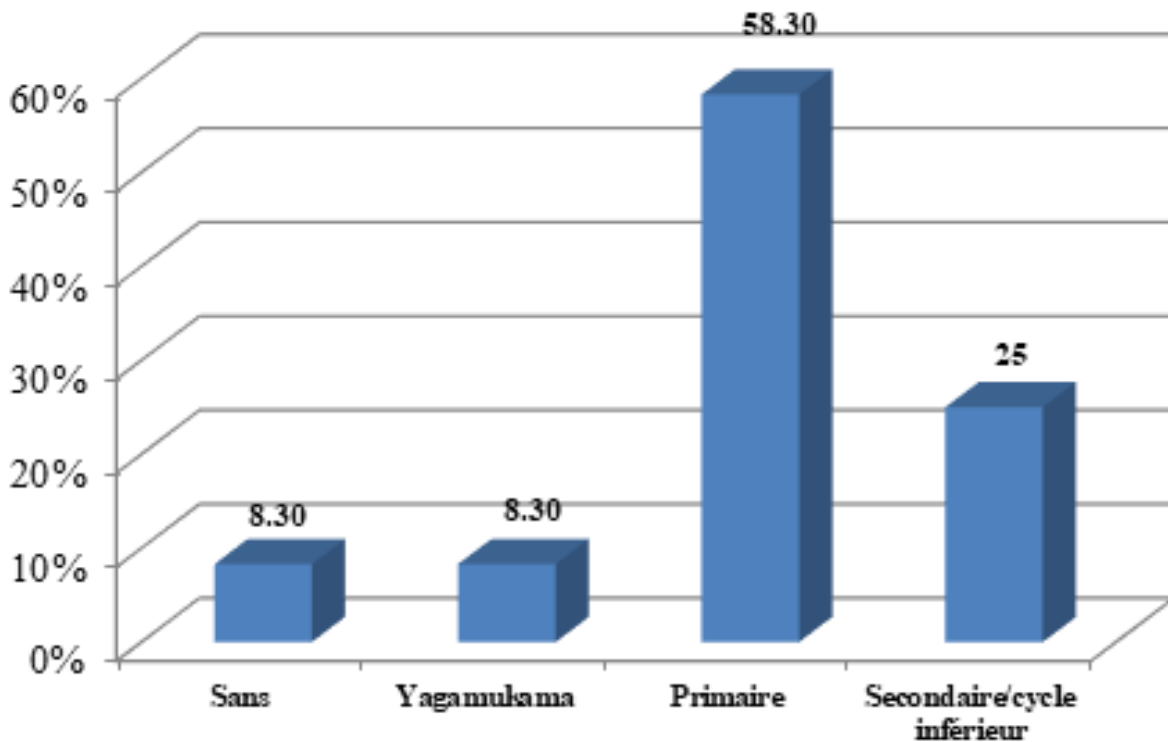


Figure 7: Répartition des répondants selon le niveau d'étude

L'analyse de cette figure montre que dans notre échantillon il y a 8,3% qui n'ont pas fréquenté l'école, 8,3% ont fait Yagamukama, 58,3% ont fait l'école primaire et 25% ont fait le cycle inférieur de l'école secondaire.

5. Statut matrimonial des répondants

Dans cet échantillon, nous avons rencontré les mariés et les célibataires. La figure 8 montre la répartition des répondants selon leur statut matrimonial.

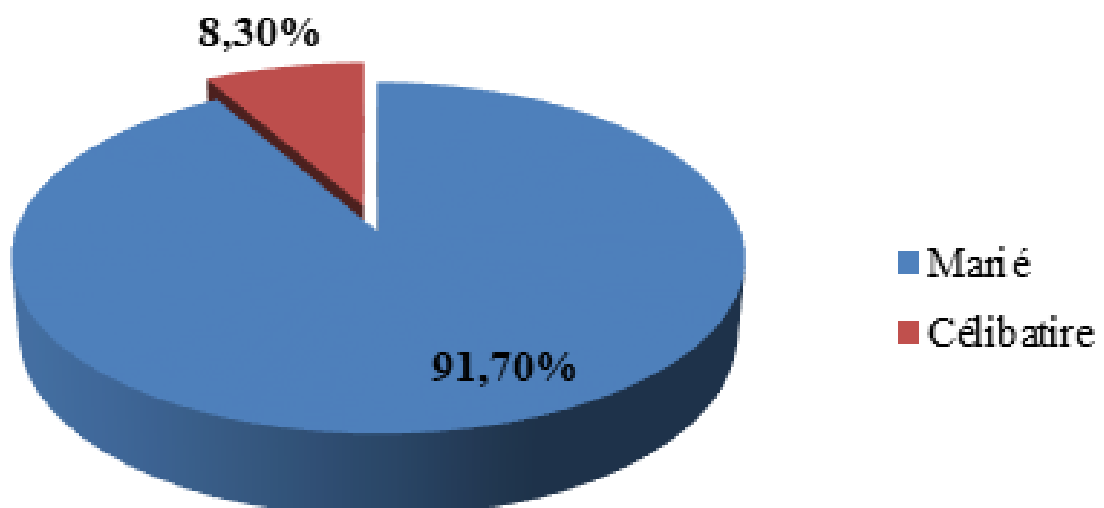


Figure 8. Répartition des répondants selon leur statut matrimonial

L'analyse de cette figure montre que la majorité dans notre échantillon est marié soit 91,7% pendant que le célibataire représente 8,3%.

Le tableau 6 suivant montre les statistiques descriptives sur la superficie exploitable dans la zone d'étude.

Tableau 6: Description de la superficie exploitable

	N	Minimum	Maximum	Moyenne		Ecart type
	Statistique	Statistique	Statistique	Statistique	Erreur std	Statistique
Superficie agricole	12	50	300	158,33	25,251	87,47

Les ménages de l'échantillon ont en moyenne une superficie de 158,33 ares avec un écart type de 87,47. La plus petite superficie est de 50 ares et la plus grande superficie est de 300 ares.

6. Activité principale et secondaire des chefs de ménage

L'occupation principale des membres des ménages ruraux demeure en grande partie agricole et constitue un secteur d'une grande importance pour l'économie familiale des burundais. Au niveau national, il emploie globalement environ 90% de la population et contribue pour 55% au produit intérieur brut.

Comme activité secondaire, le commerce occupe la première place. La figure 9 suivante montre la Répartition des ménages selon les activités des chefs de ménage.

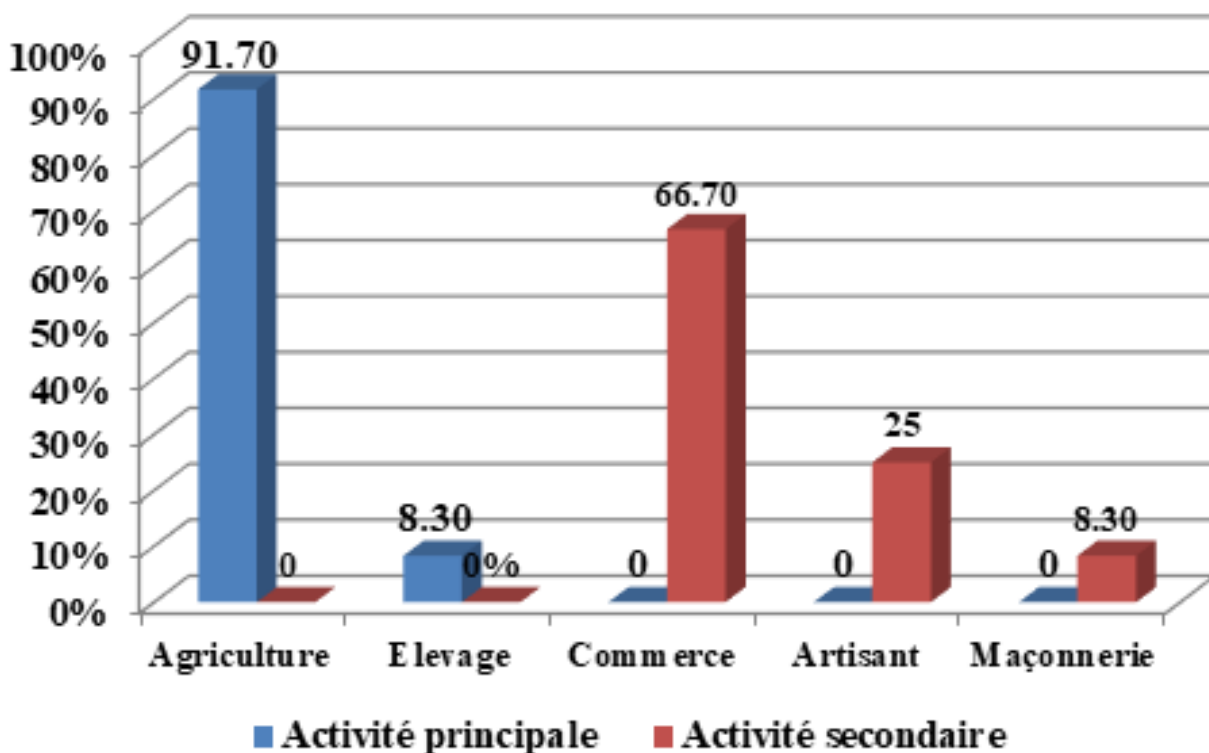


Figure 9. Répartition des ménages selon les activités des chefs de ménage

L'analyse de la figure 9 montre que 91,7% des chefs de ménage de notre échantillon exercent l'agriculture comme activité principale contre 8,3% qui exercent l'élevage comme activité principale. Par ailleurs, 66,70% exercent le commerce comme activité secondaire, 25% exercent l'artisanat comme activité secondaire et 8,3% exercent la maçonnerie.

7. Appartenance dans des associations agricoles

Les associations agricoles sont constituées à l'initiative d'un ensemble d'agriculteurs assurant une même production et qui se regroupent dans l'objectif de mutualiser leurs moyens afin de rééquilibrer les relations commerciales qu'ils entretiennent avec les acteurs économiques de l'aval des activités agricoles. Ces groupements de producteurs fournissent des services, tels que le renforcement de l'accès et la gestion des ressources naturelles, l'accès aux marchés pour les biens intermédiaires (intrants par exemple) et pour la vente de la production, l'amélioration de l'accès à l'information et à la connaissance des pratiques agricoles modernes, et faciliter la participation des petits producteurs aux processus de décision. Malheureusement, la plupart de l'échantillon n'appartient pas à des associations.

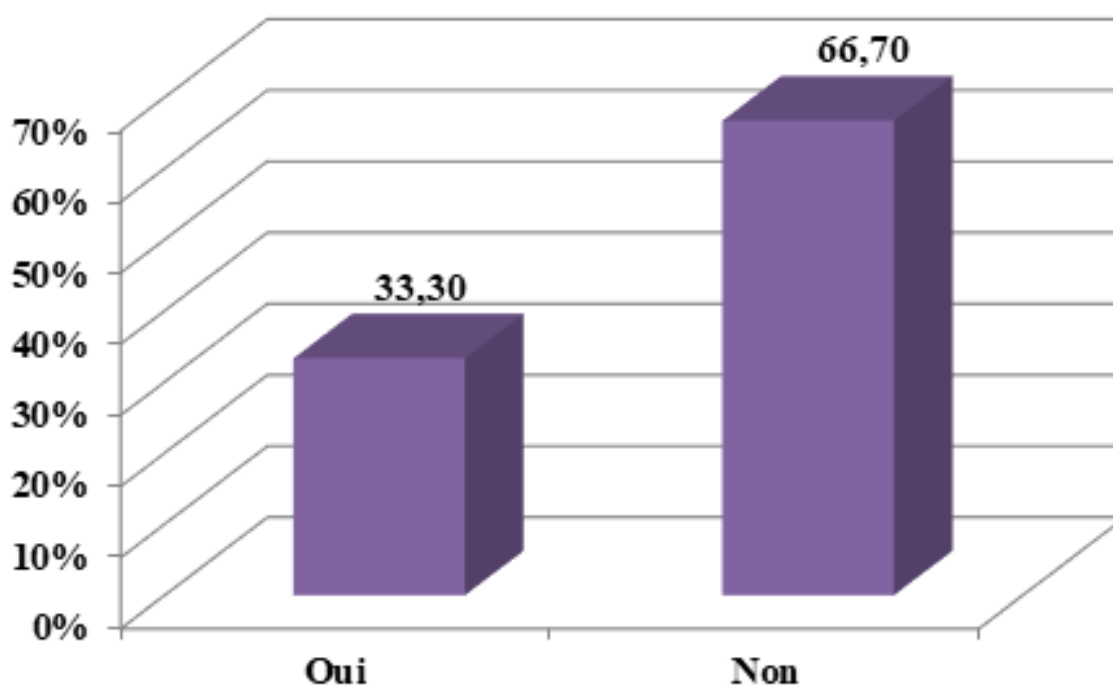


Figure 10. Répartition des répondants selon l'appartenance à des associations

Dans cet échantillon, 33,3% appartiennent à des associations agricoles et 66,7% n'appartiennent pas à des associations agricoles. Parmi ceux qui sont dans associations agricoles 8,3% sont dans une association ikigega Rusangi et 25% sont dans une coopérative Sangwe (Figure 10).

8. Encadrement agricole

Actuellement, l'encadrement est assuré par la Direction Générale de la Mobilisation pour l'Auto-Développement et la Vulgarisation Agricole (DGMAVA) relayée sur terrain par les Directions Provinciales de l'Environnement, Agriculture et Elevage (DPEAE) et différents projets soutenus par les bailleurs, avec la collaboration de l'administration territoriale et des ONG, tant nationales qu'internationales. La totalité (100%) des enquêtés de notre échantillon affirment qu'ils bénéficient de l'encadrement agricole. La figure 11 montre la structure de l'encadrement agricole. Ainsi, les structures d'encadrement rencontrées dans la zone d'étude sont les moniteurs agricoles et les ONG.

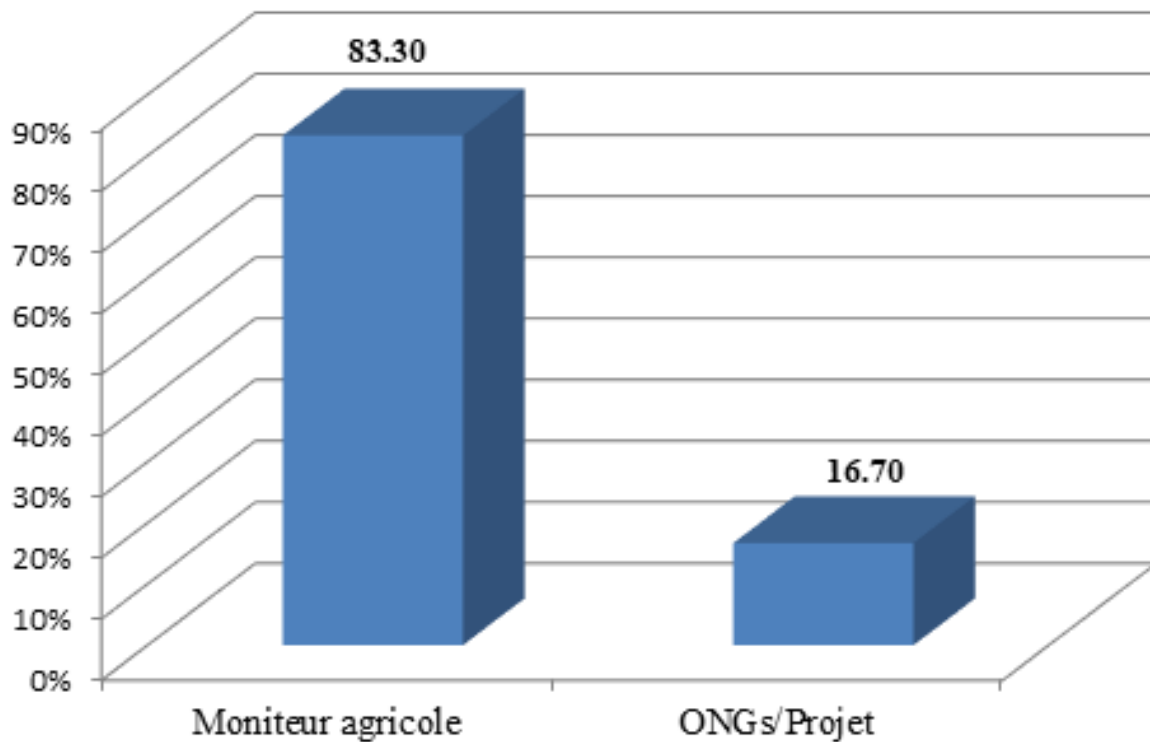


Figure 11. Structure d'encadrement agricole

De la figure 11, nous constatons que 83,3% des ménages de l'échantillon sont encadrés par les moniteurs agricoles pendant que 16,7% bénéficient de l'encadrement des ONG.

9. Actions pour augmenter la fertilité

La figure 12 montre les actions menées par les ménages de notre échantillon pour restaurer la fertilité du sol.

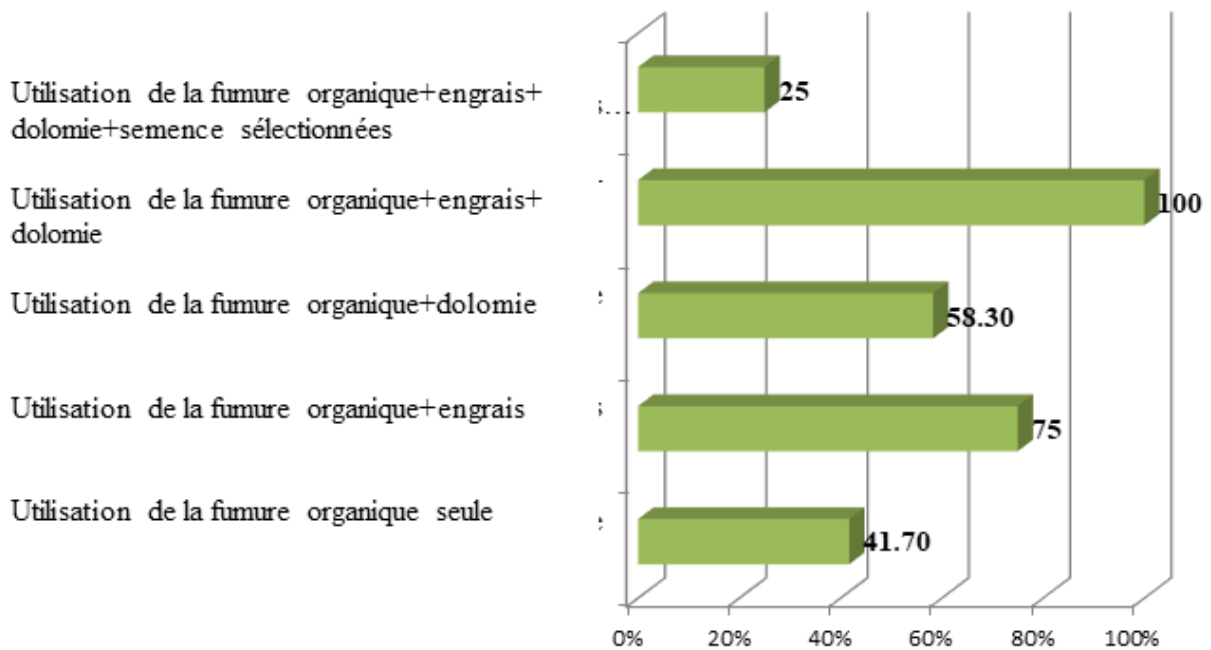


Figure 12. Niveaux d'utilisation des fumures et amendements dans les exploitations agricoles partenaires

L'analyse de la figure 12 montre que 41,7% de l'échantillon utilisent la fumure organique seule ; 75% utilisent la fumure organique combiné avec de l'engrais ; 58,3% utilisent de la fumure organique combiné avec dolomie ; 100% utilisent de la fumure organique combiné avec l'engrais minéral et la dolomie. Ce chiffre peut sembler surprenant, mais il s'explique par le fait que tous les agri-chercheurs qui constituent l'échantillon ont été impliqués dans des parcelles de démonstration où cette combinaison a été appliquée et 25% utilisent la fumure organique combiné avec l'engrais minéral, la dolomie et les semences sélectionnées.

Les agri-chercheurs utilisent la matière organique seule sur certaines parcelles tout en utilisant la fumure organique combiné avec des engrais minéral ou de la dolomie sur d'autres parcelles c'est-à-dire que la combinaison varie d'une parcelle à l'autre. Ce qui explique pourquoi les totaux cumulés dépassent 100%. Par ailleurs, 100% de notre échantillon envisagent augmenter la superficie d'application de la dolomie dans leur exploitation. Cela trouve raison dans l'intérêt positif joué par la dolomie sur la productivité, disent-ils.

10. Fertilisation des exploitations agricoles

Dans notre étude, 100% ont confirmé l'application du fumier organique dans leur exploitation agricole. La figure 13 montre les types de fumure organique utilisé et prouve qu'on utilise trois types de fumure organique à savoir : le compost, le fumier de vache et le fumier de chèvres.

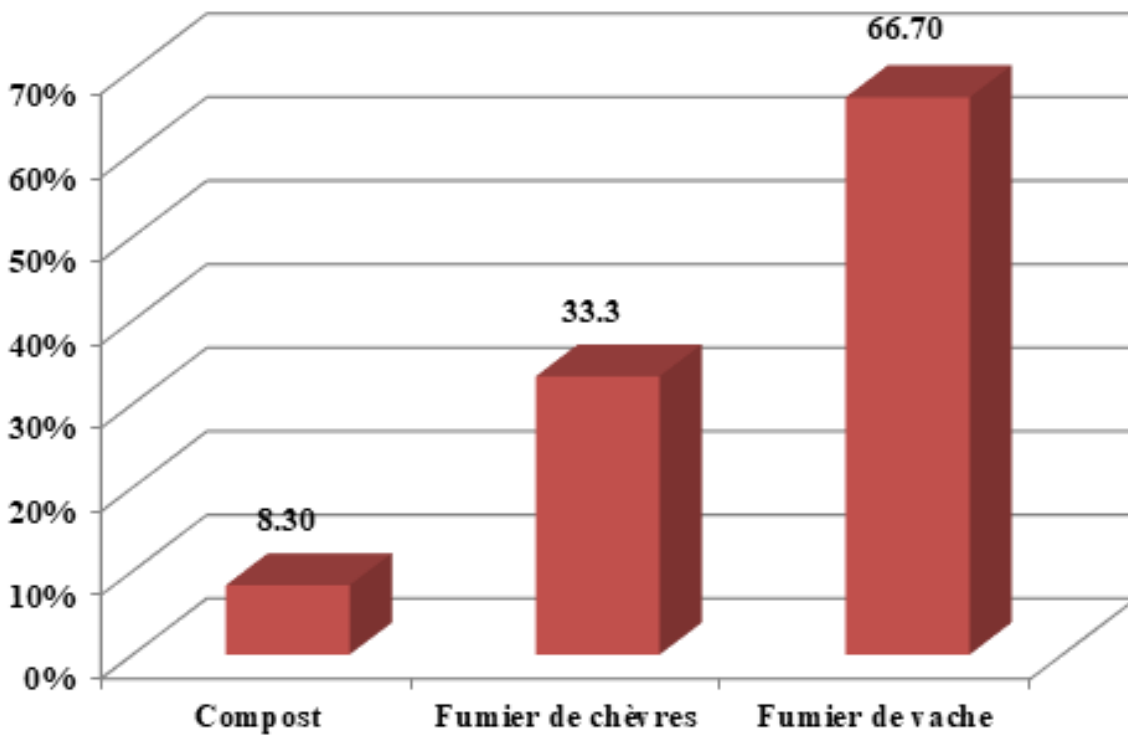


Figure 13. Types de fumure organique utilisée dans les exploitations agricoles partenaires

L'analyse de cette figure montre que 8,3% des exploitants enquêtés utilisent le compost, 33,3% fertilisent avec le fumier de chèvre et 66,7% fertilisent avec le fumier de vaches. Par ailleurs, 100% ont confirmé qu'ils utilisent la fumure minérale entre autre FOMI-Imbura.

3.1.3. Efficacité agronomique

L'évaluation de l'efficacité agronomique porte sur l'analyse des performances des cultures du haricot, telles que la croissance moyenne en hauteur moyenne (HM), poids de de 1000 graines (PMG), la longueur racinaire (LR), la production de biomasse racinaire sèche (BRS), la biomasse aérienne sèche (BAS), la biomasse totale sèche (BTS), le nombre de gousses par plant, le nombre de graines par gousse et le rendement en grains. La hauteur moyenne et la longueur moyennes sont exprimées en cm. Les biomasses et le rendement sont exprimés en kg à l'échelle d'un hectare.

3.1.3.1. Effet du chaulage sur la performance du haricot volubile

Le tableau 7 suivant montre les résultats descriptifs sur les indicateurs de performance du haricot volubile considérée dans notre étude sur les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC). La comparaison a été effectuée sur 13 paires.

Tableau 7: Statistiques descriptives sur les indicateurs de performance du haricot volubile

Indicateur de la performance		Moyenne	N	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Paire 1	Rendement PC	2667,17	6	1111,40	453,73
	Rendement PNC	1295,17	6	787,28	321,41
Paire 2	PMG PC	396,17	6	96,34	39,33
	PMG PNC	415,67	6	149,40	60,99
Paire 3	LR PC	0,16	6	0,06	0,024
	LR PNC	0,12	6	0,028	0,012
Paire 4	HM PC	2,45	6	0,63	0,26
	H M PNC	1,81	6	0,55	0,23
Paire 5	BTS PC	1816,17	6	849,25	346,71
	BTS PNC	1011,33	6	512,81	209,35
Paire 6	BAS PC	1704,25	6	806,21	329,13
	BAS PNC	942,58	6	494,34	201,81
Paire 7	BRS PC	111,98	6	57,21	23,36
	BRS PNC	68,75	6	27,03	11,03
Paire 8	HI PC	0,62	6	0,05	0,019
	HI PNC	0,58	6	0,06	0,03
Paire 9	HI ajusté PC	0,60	6	0,05	0,019
	HI ajusté PNC	0,56	6	0,06	0,02
Paire 10	R/S PC	0,07	6	0,09	0,01
	R/S P PNC	0,10	6	0,08	0,03
Paire 11	Nombre de gousse / plant PC	12,17	6	4,622	1,89
	Nombre de gousse / plant PNC	6,33	6	2,50	1,02
Paire 12	Nombre de graines / plant PC	52,83	6	19,95	8,15
	Nombre de graines / plant PNC	25,17	6	13,62	5,56
Paire 13	Nombre de graines / gousse PC	4,33	6	0,516	0,211
	Nombre de graines / gousse PNC	3,83	6	0,753	0,31

L'analyse des résultats du tableau 7 montre que, sur le rendement du haricot volubile, la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est de 2,1 fois plus élevée que celle obtenues dans les parcelles non chaulées (PNC).

Concernant le poids de mille graines, la moyenne du poids de mille graines pour les parcelles chaulées (PC) est de 5% inférieure de celle enregistrée dans les parcelles non chaulées (PNC). La longueur racinaire moyenne dans les parcelles chaulées (PC) est 33 % plus élevée que dans les parcelles non chaulées (PNC). Pour ce qui est du nombre de gousses, en moyenne, le nombre de gousses était 90 % plus élevé dans les parcelles chaulées (PC) en comparaison avec les parcelles non chaulées (PNC). La même comparaison portée sur le nombre de graines par plant de haricot volubile relève que les parcelles chaulées (PC) produisent plus de 2 fois de graines par rapport aux parcelles non chaulées (PNC), alors que le nombre moyen de graines de haricot est seulement de 13 % supérieur dans les parcelles chaulées (PC) en comparaison avec les parcelles non chaulées (PNC).

A propos de la hauteur moyenne de plants de haricot volubile, dans la parcelle chaulée (PC), était de 35% supérieure celle observée dans les parcelles non chaulées (PNC). Relativement à la biomasse totale, dans les parcelles chaulées (PC), la moyenne était 80% plus élevée que celle enregistrée dans les parcelles non chaulées (PNC). Concernant les biomasses aériennes et les biomasses racinaires, les moyennes enregistrées dans les parcelles chaulées (PC) étaient respectivement de 81 et 63 % plus élevées par rapport aux parcelles non chaulées (PNC).

S'agissant de l'indice de récolte/Harvest Index (HI), la moyenne obtenue dans les parcelles chaulées (PC) était de 7 % supérieure à celle relevée dans les parcelles non chaulées (PNC). Elle était de 11 % plus élevée pour le l'indice de récolte ajusté (HI ajusté). Pour le rapport racines sur partie aérienne (R/S), dans les parcelles chaulées, la moyenne du rapport R/S dans les parcelles chaulées (PC) représentait était 70 % de celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC).

De manière générale, nous remarquons que, pour la large majorité des paramètres évalués, les parcelles chaulées (PC) sont plus performantes que les parcelles non chaulées (PNC), démontrant à suffisance que la pratique de chaulage améliore la croissance et la productivité de la culture de haricot volubile dans la zone d'action du projet PAGRIS.

Par la suite, le test de Student sur échantillons appariés montre les différences qui existent et teste-leur Degré de signification. Le test a été appliqué aux différences de performances de croissance et de production entre les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC). Ces différences sont considérées : non significatives quand la valeur $p > 0,05$, simplement significatives quand la valeur de $p < 0,05$, hautement significatives quand la valeur de $p < 0,01$ et très hautement significatives quand la valeur de $p < 0,001$.

Tableau 8. Effet de chaulage sur les indicateurs de performance du haricot volubile

Différence moyenne	Différences appariées				T	DDL	Signif	
	Moyenne	E.T	Erreur standard moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence				
				Inférieure				Supérieure
Rdt PC – Rdt PNC	1372,00	598,79	244,46	743,60	2000,40	5,61	5	0,002**
PMG PC - PMG PNC	-19,50	64,00	26,13	-86,67	47,67	-0,75	5	0,489NS
LR PC – LR PNC	0,04	0,03	0,01	0,00	0,070	2,70	5	0,043*
HM PC – H M PNC	0,64	0,24	0,10	0,31	0,90	6,50	5	0,001***
BTS PC- BTS PNC	804,83	433,91	177,14	349,48	1260,19	4,54	5	0,006**
BAS PC – BAS PNC	761,67	395,64	161,52	346,47	1176,87	4,72	5	0,005**
BRS PC- BRS PNC	43,17	46,74	19,08	-5,88	92,22	2,26	5	0,073NS
HI PC – HI PNC	0,04	0,04	0,02	-0,00	0,08	2,57	5	0,050*
HI ajusté PC- HI ajusté PNC	0,05	0,04	0,01	0,01	0,08	3,24	5	0,023*
R/S PC - R/S PNC	-0,03	0,07	0,03	-0,10	0,05	-0,99	5	0,368NS
Nombre de gousses/plant PC – Nombre de gousses/plant PNC	5,83	2,79	1,14	2,91	8,76	5,13	5	0,004**
Nombre de grains/plant PC – Nombre de grains/plant PNC	27,67	11,52	4,70	15,58	39,75	5,88	5	0,002**
Nombre de grains/gousse PC – Nombre de grains/gousse PNC	0,50	1,05	0,43	-0,60	1,60	1,17	5	0,296NS

En somme nous remarquons que, sur la culture de haricot volubile, l'effet de chaulage est positif sur dix des treize paramètres évalués : le rendement, la longueur racinaire, la hauteur de la plante, la biomasse totale, la biomasse aérienne, la biomasse racinaire, l'indice de récolte, l'indice de récolte ajusté, le nombre de gousses par plant et le nombre de graines par plant. Par contre, cet effet est inexistant pour le poids de mille graines, le rapport R(oots)/S(hoots) et nombre de graines par gousse.

3.1.3.2. Effet du chaulage sur la performance du haricot nain

Les différences entre les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC) ne sont pas significatives ($p > 0,05$) pour les paramètres nombre de graines par gousse, le rapport R/S, la biomasse racinaire sèche et le poids de 1000 graines du haricot volubile utilisé. L'effet de l'opération de chaulage est simplement significatif ($p < 0,05$) sur la longueur ses racines, l'indice de récolte/Harvest Index (HI) et sa forme ajustée (HI ajusté). Il est hautement significatif ($p < 0,01$) pour le rendement en graines, la biomasse totale sèche, la biomasse aérienne sèche, le nombre de gousses par plant et le nombre de graines par plant de haricot volubile. Le seul effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du chaulage par rapport au non chaulage est observé pour la hauteur moyenne des plants de haricot.

Le tableau 9 suivant montre les résultats descriptifs sur les indicateurs de performance du haricot nain considérée dans cette étude.

En procédant à la même approche analytique que pour le haricot volubile. Nous en arrivons aux observations suivantes. L'analyse des résultats de ce tableau 9 indique que, sur le rendement du haricot nain, la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,6 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC). Concernant le poids de mille graines, la moyenne du poids de mille graines pour les parcelles chaulées (PC) est équivalente à celle enregistrée dans les parcelles non chaulées (PNC), tandis que la longueur racinaire moyenne dans les parcelles chaulées (PC) est 40 % plus élevée que dans les parcelles non chaulées (PNC).

Pour ce qui est du nombre de gousses, en moyenne, le nombre de gousses par plant de haricot nain était deux fois plus élevé dans les parcelles chaulées (PC) en comparaison avec les parcelles non chaulées (PNC). La même comparaison portée sur le nombre de graines par plant de haricot volubile relève que les parcelles chaulées (PC) produisent 2,5 fois de graines par plant par rapport aux parcelles non chaulées (PNC). De l'autre côté, le nombre moyen de graines de haricot par gousse est de 13 % supérieur dans les parcelles chaulées (PC), en comparaison avec les parcelles non chaulées (PNC).

La hauteur moyenne de plants de haricot nain dans la parcelle chaulée (PC) était 88 % supérieure celle observée dans les parcelles non chaulées (PNC). Relativement à la biomasse totale, dans les parcelles chaulées (PC), la moyenne était 2,2 fois plus élevée que celle enregistrée dans les parcelles non chaulées (PNC), alors que pour les biomasses aériennes et les biomasses racinaires, les moyennes enregistrées dans les parcelles chaulées (PC) étaient respectivement de 230 et 64 % plus élevées par rapport aux parcelles non chaulées (PNC).

Tableau 9. Statistiques descriptives sur les indicateurs de performance du haricot nain

Indicateur de la performance		Moyenne	N	E.T	Erreur standard moyenne
Paire 1	Rendement PC	953,67	6	372,39	152,03
	Rendement PNC	364,83	6	129,39	52,82
Paire 2	Poids de 1000 grains PC	237,50	6	39,79	16,25
	Poids 1000 grains PNC	239,33	6	52,30	21,35
Paire 3	Longueur racinaire PC	0,21	6	0,04	0,02
	Longueur racinaire PNC	0,15	6	0,03	0,01
Paire 4	Hauteur moyenne PC	0,49	6	0,16	0,07
	Hauteur moyenne PNC	0,26	6	0,04	0,02
Paire 5	Biomasse totale sèche PC	705,83	6	191,40	78,14
	Biomasse totale sèche PNC	319,50	6	65,00	26,53
Paire 6	Biomasse aérienne sèche PC	608,33	6	164,99	67,36
	Biomasse sèche aérienne PNC	260,17	6	69,35	28,31
Paire 7	Biomasse racinaire sèche PC	97,50	6	35,93	14,67
	Biomasse racinaire sèche PNC	59,33	6	15,73	6,42
Paire 8	Harvest Index PC	0,60	6	0,04	0,02
	Harvest Index PNC	0,57	6	0,09	0,04
Paire 9	Harvest Indexé ajusté PC	0,57	6	0,04	0,02
	Harvest Indexé ajusté PNC	0,52	6	0,08	0,03
Paire 10	R/S PC	0,16	6	0,04	0,02
	R/S PNC	0,24	6	0,10	0,04
Paire 11	Nombre de gousse/plant PC	8,00	6	1,41	0,58
	Nombre de gousse/plant PNC	4,00	6	0,89	0,37
Paire 12	Nombre de graines/plant PC	33,67	6	17,18	7,01
	Nombre de graines/plant PNC	13,67	6	5,68	2,32
Paire 13	Nombre de graines/gousse PC	4,00	6	1,41	0,57
	Nombre de graines/gousse PNC	3,00	6	1,27	0,52

S'agissant de l'indice de récolte/Harvest Index (HI), la moyenne obtenue dans les parcelles chaulées (PC) était de 5 % supérieure à celle relevée dans les parcelles non chaulées (PNC). Elle était de 10 % plus élevée pour l'indice de récolte ajusté (HI ajusté). Pour le rapport racines sur partie aérienne (R/S), dans les parcelles chaulées, la moyenne du rapport R/S dans les parcelles chaulées (PC) représentait était 67 % de celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC).

De manière générale, nous remarquons que, pour la large majorité des paramètres évalués, les parcelles chaulées (PC) sont plus performantes que les parcelles non chaulées (PNC), démontrant encore une fois que la pratique de chaulage améliore la croissance et la productivité de la culture de haricot nain comme pour le haricot volubile dans la zone d'action du projet PAGRIS. Une analyse basée sur le t test montre le niveau de signification de l'effet de chaulage par rapport au non chaulage.

Les différences entre les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC) ne sont pas significatives ($p > 0,05$) pour les paramètres poids de 1000 graines, biomasse racinaire sèche, rapport R/S et leurs valeurs de HI, ajusté et non ajusté. En outre, l'effet de l'opération de chaulage est simplement significatif ($p < 0,05$) sur la longueur des racines, le nombre de graines par plant de haricot et le nombre de graines par gousse. Il est hautement significatif ($p < 0,01$) pour le paramètre hauteur moyenne des plants de haricot nain et le rendement en grains. Un effet hautement significatif ($p < 0,001$) du chaulage par rapport au non chaulage est observé pour trois paramètres : biomasse totale sèche, biomasse aérienne sèche, ainsi que le nombre de gousses par plant de haricot nain.

Tout compte fait, nous nous observons que, sur la culture de haricot nain, l'effet du chaulage est positif sur les paramètres suivants : le rendement, la longueur racinaire, la hauteur de la plante, la biomasse totale, la biomasse aérienne, le nombre de gousses par plant, le nombre de graines par plant et le nombre graine par gousse. Par contre, cet effet est inexistant pour le poids de mille graines, la biomasse racinaire sèche, le HI, le HI ajusté et le rapport R/S.

3.1. 4. Efficience économique

En plus de l'analyse de l'efficience de l'opération de chaulage, la présente étude s'est penchée sur celle de l'efficience économique.

3.1.4.1. Comparaison des coûts de production sur les haricots volubiles dans les parcelles chaulées(PC) et dans les parcelles non chaulées(PNC)

Le tableau 11 ci-après décrit les coûts engagés (par ha) dans la production du haricot volubile tels que collectés auprès des agri-chercheurs associés au projet PAGRIS.

Tableau 11. Statistiques descriptives des coûts de production du haricot volubile

	Moyenne	N	E.T	Erreur standard moyenne
CT PC	28285,00	6	3822,291	1560,444
CT PNC	25885,00	6	3821,820	1560,252

L'analyse de ce tableau montre que le coût moyen de production du haricot volubile dans les parcelles est de 28285 BIF (par ha). Dans les parcelles non chaulées le coût moyen est 25885 BIF, soit une différence de 2400 BIF.

A travers le tableau 12, le test de Student montre que le coût moyen de production du haricot volubile dans les parcelles chaulées (PC) dépasse de 2400 BIF celui des parcelles non chaulées (PNC). Cette différence est très hautement significative ($p < 0,001$). Autrement dit, l'opération de chaulage génère un supplément de coût équivalent à seulement 9,3 %. Ce qui est insignifiant par rapport aux gains de production générés par l'application de la dolomie.

Tableau 12. Différence de coûts de production du haricot volubile entre parcelles chaulées (PC) et non chaulées (PNC)

	Différences appariées					DDL	Signif.
	Moyenne	E.T	Erreur standard moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence			
				Inférieure	Supérieure		
CT PC - CT PNC	2400	154,92	63,25	2237,42	2562,58	5	0,000***

3.1.4.2. Comparaison des coûts de production sur les haricots nains dans les parcelles chaulées (PC) et dans les parcelles non chaulées (PNC)

Le tableau 13 suivant décrit les coûts utilisés dans la production du haricot nain.

Tableau 13. Statistiques descriptives des coûts de production du haricot nain

	Moyenne	N	Ecart-type	Erreur standard moyenne
CT PC	28355,00	6	3470,78	1416,94
CT PNC	26021,67	6	3362,88	1372,89

L'analyse de ce tableau 13 montre que le coût moyen de production du haricot nain dans les parcelles chaulées (PC) est de 28355 BIF. Celui associé aux parcelles non chaulées (PNC) est 26021,67 BIF. La différence entre les deux types de parcelles est de 2333,33 BIF. Exprimée en valeur relative, cela représente un coût supplémentaire 9 % associé à l'application de la dolomie pour corriger l'acidité des sols. Comparé aux avantages en termes de production du haricot nain consécutifs au chaulage, ce coût est pratiquement insignifiant.

Le tableau 14 suivant vérifie que ces deux moyennes sont statistiquement différentes par application du test de Student sur la différence de coûts entre le chaulage et le non chaulage.

A travers le tableau 14, le test de Student montre que le coût moyen de production du haricot nain dans les parcelles chaulées (PC) dépasse de 2333,33 BIF (presque autant que pour le haricot volubile) celui des parcelles non chaulées (PNC). Cette différence est très hautement significative (($p < 0,001$). Autrement dit, l'opération de chaulage génère un supplément de coût équivalent à seulement 9,3 %. Ce qui est insignifiant par rapport aux gains de production générés par l'application de la dolomie.

Tableau 14. Différence des coûts de production du haricot nain entre parcelles chaulées (PC) et non chaulées (PNC)

	Différences appariées					T	DDL	Signif.
	Moyenne	E.T	Erreur standard moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence				
				Inférieure	Supérieure			
CT PC – CT PNC	2333,33	258,20	105,41	2062,37	2604,30	22,14	5	0,000***

3.1.4.3. Corrélation entre coûts de production et rendement en parcelles chaulées (PC) sur le haricot volubile

Le tableau 15 suivant montre la corrélation entre le coût de production du haricot volubile et le rendement dans les parcelles chaulées.

Tableau 15. Corrélation entre coût de production et le rendement du haricot volubile dans les parcelles chaulées (PC).

		CT/P chaulé	Rdt (kg/ha) PC
CT PC	Corrélation de Pearson	1	0,715
	Signif. (bilatérale)		0,110
	N	6	6
Rdt (kg/ha) PC	Corrélation de Pearson	0,715	1
	Signif. (bilatérale)	0,110	
	N	6	6

Le tableau 15 ci-dessus montre que le coefficient de corrélation (r) entre le coût de production du haricot volubile et le rendement est 0,715. Ce coefficient indique qu'il existe une forte corrélation positive quoi qu'elle ne soit pas significative ($p > 0,05$), indiquant que, même si ces coûts sont élevés, ils induisent un rendement élevé en haricot volubile.

3.1.4.4. Corrélation entre coûts de production et rendement en parcelles chaulées (PC) sur le haricot nain

Le tableau 16 suivant montre la corrélation entre le coût de production du haricot nain et le rendement dans les parcelles chaulées.

Tableau 16. Corrélation entre le coût de production et le rendement du haricot nain dans les parcelles chaulées (PC)

		CT PC	Rdt (kg/ha) PC
CT PC	Corrélation de Pearson	1	0,471
	Signif. (bilatérale)		0,346
	N	6	6
Rdt (kg/ha) PC	Corrélation de Pearson	0,471	1
	Signif. (bilatérale)	0,346	
	N	6	6

Le tableau 16 ci-dessus montre que le coefficient de corrélation (r) entre le coût de production et le rendement du haricot nain est de 0,471, plus faible que celui observé avec le haricot volubile. Ce coefficient indique qu'il existe une corrélation moyenne positive quoi qu'elle ne soit pas significative ($p > 0,05$). C'est-à-dire que, même si ces coûts sont élevés, ils induisent un rendement relativement élevé en haricot nain.

3.1.4.5. Corrélation entre le coût de production et rendement en parcelles non chaulées sur le haricot volubile.

Le tableau 17 suivant montre la corrélation entre le coût de production du haricot volubile et le rendement dans les parcelles non chaulées (PNC).

Tableau 17. Corrélation entre le coût de production et le rendement du haricot volubile dans les parcelles non chaulées (PNC).

		CT PNC	Rdt (kg/ha) PNC
CT PC	Corrélation de Pearson	1	0,543
	Signif. (bilatérale)		0,265
	N	6	6
Rdt (kg/ha) PNC	Corrélation de Pearson	0,543	1
	Signif. (bilatérale)	0,265	
	N	6	6

Le tableau 17 ci-dessus montre que le coefficient de corrélation (r) entre le coût de production du haricot volubile et le rendement en parcelles non chaulées est 0,543, inférieur à celui enregistré dans les parcelles chaulées, malgré un coût supplémentaire associé à l'opération de chaulage. Ce coefficient indique qu'il existe une corrélation moyenne positive quoi qu'elle ne soit pas significative ($p > 0,05$). C'est-à-dire que, même si ces coûts sont élevés, ils induisent un rendement élevé.

3.1.4.6. Corrélation entre coûts de production et rendement en parcelles non chaulées (PNC) sur le haricot nain

Le tableau 18 suivant montre la corrélation entre le coût de production des haricots nains et le rendement dans les parcelles chaulées.

Tableau 18. Corrélation entre le coût de production et le rendement du haricot nain dans les parcelles non chaulées (PNC)

		CT PNC	Rdt (kg/ha) PNC
CT PNC	Corrélation de Pearson	1	0,276
	Signif. (bilatérale)		0,596
	N	6	6
Rdt (kg/ha) PNC	Corrélation de Pearson	0,276	1
	Signif. (bilatérale)	0,596	
	N	6	6

Le tableau 18 ci-dessus montre que le coefficient de corrélation (r) entre le coût de production du haricot nain et le rendement en parcelle non chaulée est 0,276, encore une fois inférieure à celui enregistré dans les parcelles chaulées, malgré un coût supplémentaire associé à l'opération de chaulage.

Somme toute, à travers ces études corrélatives, nous remarquons que, d'une part, la corrélation entre les coûts de production du haricot volubile est positive et élevée dans les parcelles chaulées (PC), alors qu'elle est positive mais moyenne dans les parcelles non chaulées (PNC). D'autre part, la corrélation entre les coûts de production du haricot nain est positive mais moyenne dans les parcelles chaulées (PC), alors qu'elle est positive et faible dans les parcelles non chaulées (PNC). Ceci est bien une indication de l'effet positif sur l'efficacité économique de l'application de la dolomie sur la culture du haricot dans les sols acides.

3.2. DISCUSSION DES RESULTATS

Le présent travail a été conduit sur le haricot nain et le haricot volubile. L'expérimentation a été effectuée dans les parcelles de démonstration à Kiremba, Tangara en province de Ngozi, à Muruta, Matongo en province de Kanyanza et à Mabayi en province de Cibitoke. Cette étude a été réalisée dans le but de dégager l'efficacité agronomique du chaulage d'une part et son efficacité économique d'autre part.

L'analyse des résultats révèle des différences marquées entre les parcelles chaulées et non chaulées, soulignant l'impact positif du chaulage sur la performance agronomique du haricot volubile. En effet, le rendement des parcelles chaulées est 2,1 fois plus élevé que celui des parcelles non chaulées, ce qui est corroboré par une biomasse totale 80 % plus élevée dans les parcelles chaulées. Cette augmentation significative du rendement suggère que le chaulage améliore non seulement le développement des plants, mais également leur capacité à produire des récoltes abondantes. Cela peut être attribué à une meilleure disponibilité des nutriments et à une amélioration de la structure du sol, favorisant ainsi la croissance des racines et la productivité.

De plus, la longueur racinaire moyenne est 33 % plus élevée dans les parcelles chaulées, indiquant que le chaulage favorise un meilleur développement racinaire. Une longueur de racine accrue permet aux plantes d'explorer un plus grand volume de sol, augmentant ainsi leur accès à l'eau et aux nutriments. Parallèlement, la hauteur moyenne des plants est supérieure de 35 % dans les parcelles chaulées, ce qui contribue également à un meilleur rendement, car des plants plus grands peuvent capter davantage de lumière.

En ce qui concerne la production de gousses et de graines, le nombre de gousses par plant est 90 % plus élevé dans les parcelles chaulées, tandis que le nombre de graines par plant est plus que doublé. Ces résultats montrent

que le chaulage non seulement augmente la quantité de gousses produites, mais aussi la capacité de chaque plant à produire des graines. Cela pourrait être lié à une meilleure pollinisation et à une meilleure santé générale des plantes dans les conditions améliorées offertes par le chaulage.

Il est intéressant de noter que le poids de mille graines est 5 % inférieur dans les parcelles chaulées par rapport aux parcelles non chaulées. Bien que cette différence ne soit pas significative, elle soulève des questions sur la qualité des graines produites dans ces conditions. Cela pourrait indiquer un compromis potentiel entre la quantité et la qualité, nécessitant des études supplémentaires pour comprendre les implications agronomiques.

Par ailleurs, l'indice de récolte montre une légère augmentation de 7 % dans les parcelles chaulées, tandis que l'indice ajusté est supérieur de 11 %. Cela indique que le chaulage améliore non seulement la production totale, mais également l'efficacité avec laquelle les ressources sont converties en rendement. Cependant, il convient de noter que le rapport R/S est 70 % de celui observé dans les parcelles non chaulées, ce qui pourrait suggérer une allocation différente des ressources entre la croissance aérienne et racinaire sous l'effet du chaulage.

Par ailleurs, les tests de comparaison montrent que les différences entre les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC) ne sont pas significatives ($p > 0,05$) pour certains paramètres, tels que le nombre de graines par gousse, le rapport R/S, la biomasse racinaire sèche et le poids de 1000 graines du haricot volubile utilisé. Cependant, il est important de noter que l'effet de l'opération de chaulage se révèle simplement significatif ($p < 0,05$) sur certains indicateurs, notamment la longueur des racines, l'indice de récolte (Harvest Index, HI) et sa forme ajustée (HI ajusté). De plus, il apparaît que le chaulage a un impact hautement significatif ($p < 0,01$) sur d'autres paramètres tels que le rendement en graines, la biomasse totale sèche, la biomasse aérienne sèche, le nombre de gousses par plant et le nombre de graines par plant de haricot volubile.

Enfin, le seul effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du chaulage par rapport au non-chaulage est observé pour la hauteur moyenne des plants de haricot. Cela souligne l'importance du chaulage dans l'amélioration de certains aspects de la croissance des plants, notamment leur hauteur, ce qui peut avoir des implications positives sur le rendement global des cultures.

Bien que certaines différences ne soient pas significatives, les résultats indiquent clairement que le chaulage joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances agronomiques du haricot volubile. Quant à la culture de haricot nain, l'analyse des résultats met en évidence l'impact significatif du chaulage sur divers paramètres agronomiques. En effet, le rendement des parcelles chaulées est 2,6 fois plus élevé que celui des parcelles non chaulées. Cette différence souligne l'importance du chaulage pour améliorer la productivité des cultures, probablement en raison d'une meilleure disponibilité des nutriments et d'une structure de sol améliorée.

De plus, bien que le poids de mille graines ne montre pas de différence significative entre les parcelles chaulées et non chaulées, la longueur racinaire moyenne dans les parcelles chaulées est 40 % plus élevée. Cela suggère que le chaulage favorise un développement racinaire plus important, ce qui pourrait permettre aux plantes d'accéder à une plus grande quantité d'eau et de nutriments, renforçant ainsi leur croissance.

En parallèle, le nombre de gousses par plant est deux fois plus élevé dans les parcelles chaulées, ce qui témoigne d'une meilleure productivité florale. De même, le nombre de graines par plant est 2,5 fois supérieur dans les parcelles chaulées, indiquant que le chaulage contribue non seulement à augmenter le nombre de gousses, mais également à améliorer la fertilité des fleurs. En outre, le nombre moyen de graines par gousse est 13 % plus élevé dans les parcelles chaulées, ce qui renforce l'idée que le chaulage a un effet positif sur la pollinisation et la formation des fruits.

La hauteur moyenne des plants dans les parcelles chaulées est 88 % supérieure à celle observée dans les parcelles non chaulées. Cette augmentation significative de la hauteur pourrait être liée à un meilleur accès à la lumière et à une meilleure photosynthèse, ce qui contribue également à l'augmentation du rendement global. En ce qui concerne la biomasse totale, celle des parcelles chaulées est 2,2 fois plus élevée que celle des parcelles non chaulées, avec des augmentations respectives de 230 % pour la biomasse aérienne et de 64 % pour la biomasse racinaire. Ces résultats montrent clairement que le chaulage favorise non seulement la croissance aérienne mais aussi celle des racines, ce qui est essentiel pour une meilleure absorption des ressources.

En outre, l'indice de récolte dans les parcelles chaulées est 5 % supérieur à celui des parcelles non chaulées, tandis que l'indice ajusté montre une augmentation de 10 %. Cela indique que le chaulage améliore l'efficacité avec laquelle les ressources sont converties en rendement. Cependant, il est intéressant de noter que le rapport R/S est 67 % de celui observé dans les parcelles non chaulées. Cela pourrait suggérer une allocation différente des ressources entre les parties aériennes et racinaires sous l'effet du chaulage.

De l'autre côté, les tests de comparaison montre que les différences entre les parcelles chaulées (PC) et les parcelles non chaulées (PNC) ne sont pas significatives ($p > 0,05$) pour plusieurs paramètres, notamment le poids de 1000 graines, la biomasse racinaire sèche, le rapport R/S, ainsi que les valeurs d'indice de récolte (HI), qu'elles soient ajustées ou non. Cependant, l'effet de l'opération de chaulage se révèle significatif pour certains indicateurs. De fait, l'effet du chaulage est simplement significatif ($p < 0,05$) sur des paramètres tels que la longueur des racines, le nombre de graines par plant de haricot et le nombre de graines par gousse. De plus, il est hautement significatif ($p < 0,01$) pour la hauteur moyenne des plants de haricot nain et le rendement en grains. Par ailleurs, un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du chaulage par rapport au non-chaulage est observé pour trois paramètres clés : la biomasse totale sèche, la biomasse aérienne sèche, ainsi que le nombre de gousses par plant de haricot nain.

Bien que certaines différences ne soient pas significatives, les résultats montrent clairement que le chaulage a un impact positif sur plusieurs aspects de la croissance et du rendement du haricot nain, soulignant ainsi son importance dans l'optimisation des performances agronomiques. Ces résultats corroborent ceux de Buni (2014) qui a mené une étude sur un sol limoneux Nitisol avec une propriété inhérente de fixation du Pe et d'acidité élevées pour étudier l'influence du chaulage sur la réduction de l'acidité du sol et l'amélioration des caractéristiques souhaitables du sol et du rendement en grains de haricots. Les traitements comprenaient quatre niveaux de chaux (0, 1250, 2500 et 3750 kg ha⁻¹). Les résultats ont montré que le pH du sol est passé de 5,03 à 6,72 en appliquant 3750 kg ha⁻¹ de chaux et que l'acidité échangeable a été considérablement réduite. De plus, le chaulage a augmenté de manière significative ($p < 0,05$) la capacité d'échange cationique (CEC), le P disponible et les micronutriments disponibles ont diminué, à l'exception du Cu. Le rendement en grains a montré une légère augmentation avec une augmentation de l'ajout de chaux. Le rendement du haricot était positivement corrélé au pH du sol ($r=0,23$), à la CEC ($r=0,28$) et au P disponible ($r=0,27$), mais négativement corrélé à l'acidité échangeable ($r=-0,37$). Cette étude souligne l'importance des expériences de chaux à long terme sur les principales cultures afin d'étudier les effets résiduels et de réduire les coûts de chaux.

L'effet positif du chaulage a été souligné par plusieurs autres auteurs. Fuentes et al. (2006) et Weisz et al. (2003) ont également montré une augmentation statistique du rendement en grains lorsque l'excès d'acidité était neutralisé au fil du temps.

Les rôles des amendements calcaires dans la restauration du complexe absorbant des sols acides en bases et dans l'élimination de la toxicité aluminique des sols (Gillet et al., 1992), dans l'amélioration de la structure du sol et dans la disponibilité des éléments calcium et magnésium aux plantes sont bien connus (Hicintuka & Masilya, 2013).

Les résultats sur l'étude de l'efficacité économique du chaulage montrent que les coûts sont élevés dans les parcelles chaulées par rapport aux parcelles non chaulées que ça soit pour les volubiles et les nains. Cependant, dans les parcelles chaulées, l'augmentation des coûts de production engendre une augmentation des rendements. Le coefficient de corrélation entre le coût de production des haricots volubiles et le rendement est 0,715 et le coefficient de corrélation entre le coût de production des haricots nains et le rendement est 0,471. Dans les parcelles non chaulées, l'augmentation des coûts n'implique pas nécessairement une augmentation des rendements. Cela est justifié par le coefficient de corrélation entre le coût de production des haricots nain et le rendement qui est de 0,276. Ces résultats vont à l'encontre de ceux d'Ouimet et al. (2017). En effet, ces auteurs ont réalisé une étude de cas afin de déterminer si un traitement de chaulage dans les érablières de faible vigueur de la région de Québec est justifié d'un point de vue financier pour un producteur privé de bois d'œuvre ou de sirop d'érable. À cet effet, ils ont utilisé le modèle de croissance SAMARE pour simuler l'effet bénéfique d'un traitement de chaulage appliqué à 0 et à 50 ans dans une érablière de faible vigueur, et comparé son évolution théorique sur 100 ans à celle du même peuplement en l'absence de chaulage (témoin). Ils ont évalué deux scénarios d'aménagement (sylvicole : production de bois, et acéricole : production de sirop d'érable), en utilisant la différence de valeur actuelle nette (dollars constants de 2016) entre le peuplement témoin et le peuplement chaulé comme critère d'évaluation de la rentabilité du traitement de chaulage dans chaque scénario. En production sylvicole, le traitement de chaulage est déficitaire sur 100 ans, sauf lorsque le taux d'actualisation est nul. À un taux d'actualisation de 4 %, le déficit sur 100 ans varie de (391) à (451) \$·ha⁻¹ selon le prix des bois. En production acéricole, le traitement de chaulage est rentable tant à court (20 ans) qu'à long terme : au taux d'actualisation de 4 %, le bénéfice net sur 100 ans varie de 837 à 1813 \$·ha⁻¹ (moyenne : 1325 \$·ha⁻¹) selon le prix du sirop d'érable.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude expérimentale a été réalisée dans les parcelles de démonstration avec l'objectif d'évaluer l'efficacité agronomique et l'efficacité économique du chaulage sur le haricot volubile et le haricot nain en milieu réel.

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré une influence significative de l'application de la dolomie sur le haricot volubile et le haricot nain. En effet, l'application de la dolomie a un effet positif sur la hauteur, la longueur des racines, la biomasse racinaire, la biomasse aérienne, la biomasse totale, le rendement en graines, mais une différence non significative sur le poids de mille graines. Les résultats montrent un effet positif et significatif du chaulage sur ces paramètres considérés sauf sur le poids de 1000 graines. Rien qu'en considérant le paramètre intégrateur qui est le rendement, l'on relève que pour le haricot volubile, la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,1 fois plus élevée que celle obtenues dans les parcelles non chaulées (PNC). La même comparaison analytique appliquée au haricot nain montre que la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,6 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC).

Plus particulièrement, les résultats obtenus pour les deux types de haricot montrent que les parcelles chaulées sont plus rentables que les parcelles non chaulées. En d'autres termes, les rendements obtenus avec chaulage sont supérieurs à ceux obtenus avec le témoin non amendé. Ceci dénote l'importance du chaulage dans l'augmentation de la production de la culture de haricot. De la sorte, ces résultats nous permettent de confirmer notre première hypothèse de travail. En outre, les tests corrélatifs ont démontré que le chaulage présente un grand potentiel pour l'amélioration de la performance de la culture de haricot ainsi que l'efficacité économique.

Tout compte fait, la recherche est un travail continu et qui nécessite une attention particulière. Pour une meilleure contribution de ce travail les observations et perspectives se résument ainsi :

1. Du fait que la réalisation de ce travail était limitée dans le temps, nous suggérons une autre étude sur le même sujet et cela sur trois saisons culturales au moins pour la solubilisation maximale de la dolomie et valoriser l'effet résiduel de la dolomie.
2. Les résultats obtenus ont révélé que le chaulage s'avère efficace dans l'amélioration de la productivité des cultures en particulier la culture du haricot. La population burundaise, à majorité cultivatrice, devrait être largement sensibilisée sur l'importance de chauler leurs exploitations afin de réduire l'acidité des sols et augmenter la production agricole.
3. Sur base des données de la cartographie des sols du Burundi, faire des expériences partout dans le pays dans les zones ayant des conditions pédoclimatiques différentes afin d'adopter le chaulage selon la nature du sol et vulgariser l'utilisation de celle-ci aux agriculteurs.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi. Nos remerciements s'adressent de manière particulière aux agro-chercheurs qui ont accepté de mettre à notre disposition leurs parcelles pour la conduite des expérimentations et aux techniciens de terrain du MINEAGRIE et des partenaires de terrain du projet PAGRIS/IFDC qui en ont efficacement assuré leur suivi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Abga P. T., 2013. Détermination des options de fertilisation organo-minérale et de densité de semis pour une intensification de la production du maïs dans la région de l'Est du Burkina Faso. Université polytechnique de bobo-dioulasso institut du développement rural. 37P
2. Allorent D., 2005. Analyse et modélisation épidémiologique de la tache angulaire du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) [PhD Thesis, Université Montpellier 2].P7 https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2022-07/010039793.pdf
3. Angui K. T. P, Gone D. L. & Djebre S. L., (2009). 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://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/49805>
4. Assemien E. F. L., 2018. Impact de pratiques agricoles conventionnelles et innovantes sur la fertilité des sols et les acteurs microbiens impliqués dans la zone de savanes humides de Côte d'Ivoire [PhD Thesis, Université de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-01896147/>
5. Attouche H. & Djaroun, D. 2017. Activité insecticide des poudres des feuilles du Faux Poivrier (*Schinus molle* L.) et du Lentisque (*Pistacia lentiscus* L.) sur la bruche du haricot commun *Acanthoscelides obtectus* Say. (Coleoptera : Chrysomelidae). [PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri].
6. Bacanamwo M. & Ruyikiri E., (1987). Étude des amendements calco-magnésiens dans la fertilisation des sols acides. Mémoire de licence. Faculté des Sciences agronomiques. Université de Burundi. Bujumbura.149 P.
7. Bado B. V., (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. <https://www.academia.edu/download/87613759/20487.pdf>
8. Bado B. V., Sédogo M. P, Cescas M. P, Lompo F. & Bationo A., 1997. Effet à long terme des fumures sur le sol et les rendements du maïs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 6(6): 571-575. <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30055>
9. Bezziou Aya C. B., 2022. Effet de la salinité sur la germination et la croissance de deux variétés de l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/13375>
10. Biau O. D. B., Saidou A., Bachabi F. X., Padonou G. E. & Balogoun I., 2017. Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota* L.) sur sol ferrallitique au sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5) : 2315-2326. <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/164773>
11. Bizimana S., 2003. Effet comparative des amendements organiques et calcaires sur la réduction de l'Aluminium échangeable³³ dans deux sols d'altitude du Burundi. *Memoire, U.B., FACAGRO*. Bujumbura.136 P
12. Bizimana S., Nijimbere S. & Nahayo F. 2021. Appliqués seuls, les engrais minéraux azotés et phosphatés accélèrent la dégradation de la matière organique d'un sol acide d'altitude du Mugamba sud (Burundi). *Journal of the University of Burundi*, 31(1), 8-14.
13. Bolan N. S., Adriano D. C., Duraisamy P, Mani A. & Arulmozhiselvan K., (2003). Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. Effect of phosphate addition. *Plant and Soil*, 250: 83-94.
14. Bosch C., Ruraduma C., Barikore C., Lindiro R., Kamale J. K. & Simbashizubwoba C., 2015. Manuel-La production des semences de haricots. Centre for Development Innovation. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/363478>

15. Bravin M., Versini A., Feder F. & Le Mezo L., 2018. Mieux connaître ses sols. <https://agritrop.cirad.fr/589026/1/CTCaroCanne45.pdf>
16. Buni, A. 2014. Effects of liming acidic soils on improving soil properties and yield of haricot bean. *J. Environ. Anal. Toxicol*, 5(1), 1-4. <https://www.researchgate.net/profile/Adane-Irkiso/publication/346393200>
17. Busson S., Chabalière P., De Laburthe B., Fournier P., Leroux K., Van de Kerchove V. & Salgado P., 2010. Amendements et engrais. https://agritrop.cirad.fr/561742/1/document_561742.pdf
18. Caulus A., 2018. Effets des pratiques de chaulage sur le fonctionnement des prairies. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/647471c22d3f560f80aa74fa>
19. Chekkal Karima D. S., 2015. Evaluation de l'effet insecticide de deux huiles essentielles formulées (Thymus Vulgaris et eucalyptus globulus) en combinaison avec un bioadjuvant silva fuscata sur aphid fabae homoptera : Aphididae sur haricot en comparaison avec un produit chimique [PhD Thesis]. <https://dspace.univ-bba.dz/bitstream/handle/123456789/82/M56.pdf>
20. Crémer S., Knoden D. & Luxen P., 2008. Les amendements basiques ou chaulage des prairies. Fourrages Mieux, janvier. <https://www.ficow.be/ficow.site/wp-content/uploads/Ame26.pdf>
21. Debougnoux D., 2023. Etude de la mobilité et de la biodisponibilité du cadmium et du plomb dans des sols contaminés soumis à des apports d'amendements. https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/18107/4/TFE_DEBOUGNOUX_s180222.pdf
22. De Saint Pol T., Deney A. & Monso O., 2004. Ménage et chef de ménage : Deux notions bien ancrées. *Travail, genre et sociétés*, 11(1), 63-78. <https://www.cairn.info/revue-travail-genre-et-societes-2004-1-page-63.htm>
23. Dieng M., 2021. Effets de différentes doses de fertilisation organo-minérale sur les propriétés chimiques du sol, sur la croissance et le rendement du riz (*Oryza sativa* L.) à Balmadou (Casamance-Sénégal). <https://rivieresdusud.ias.sn/handle/123456789/1430>
24. Dupre L. C. R., 2021. Calibration par intelligence artificielle de la détermination des besoins en chaux des sols acides. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/0ffb1d19-64d8-4c4e-8430-eb3f77094c12>
25. Félix K. A., Antoine B., Pascal H., Michée F. M., Fustelle G. C. J.-B. & Jacob S. D., 2012. Impact du travail du sol et de la fertilisation minérale sur la productivité de *Macrotyloma geocarpum* (Harms) Maréchal & Baudet au centre du Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 51, 3625-3632. <https://www.m.elewa.org/JABS/2012/51/9.pdf>
26. Fuentes, A., Martin, B., Dupont, C. 2006. L'impact du chaulage sur la production agricole. Éditions Agronomiques.
27. Gillet, J.-F., Martin, A., Dupont, B. 1992. Les rôles des amendements calcaires dans la restauration du complexe absorbant des sols acides en bases et dans l'élimination de la toxicité aluminique des sols. *Revue des Sciences du Sol*, 45(3), 123-135.
28. Godderis W., 1995. Ibiharage.la culture du haricot au Burundi. AGCD.Publication agricole N° 32. ISABU.163P.
29. Goudjo É. C., Soura H. B., Gnacadja C. K., Iacomini B. M., Baba-Moussa F. A.-K. & Gnacadja A. S. L., 2023. *Revue Analytique des Maladies Fongiques Affectant la Production du Haricot Vert (Phaseolus vulgaris L.)*. <https://www.academia.edu/download/110357106/6.pdf>
30. Goulding K. W. T., 2016. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390-399. <https://doi.org/10.1111/sum.1227>

31. Hamdani D., 2012. Action des poudres et des huiles de quelques plantes aromatiques sur les paramètres biologiques du bruche du Haricot, *Acanthoscelides obtectus* Say. (Coleoptera : Bruchidae) [PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri]. <https://dspace.ummo.dz/items/2c9,047fe-6893-4ca8-8f47-4e909205e697>
32. Hassett J.J. & Banwart W.L., 1992. Soils and their environment. Prentice Hall. New Jersey. 424 p. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19931973535>
33. 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*. <https://journals.openedition.org/vertigo/13898>
34. Holland J. E., Bennett A. E., Newton A. C., White P. J., McKenzie B. M., George T. S., Pakeman R. J., Bailey J. S., Fornara D. A. & Hayes R. C., 2018. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK : A review. *Science of the Total Environment*, 610, 316-332. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717320181>
35. Hue N. V., (1992). Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(3-4), 241-264. <https://doi.org/10.1080/00103629209368586>
36. Hue N. V., Craddock G. R. & Adams F., 1986. Effect of Organic Acids on Aluminum Toxicity in Subsoils. *Soil Science Society of America Journal*, 50(1), 28-34. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010006x>
37. ISABU & IFDC - PAGRIS., 2021. Cartographie de la Fertilité des Sols du Burundi et des Besoins des Principales Cultures Vivrières en Elements Nutritifs. <https://hub.ifdc.org/handle/20.500.14297/2598>
38. Jean W. M., Daniel M. I., Patrick B. S., Miderho C., Christus L. M. J., Sebakara S. E., & Mvula H., 2019. Comportement de 7 variétés de haricot volubile dans trois territoires de la province du Sud Kivu en RD Congo et recherche de la meilleure saison de culture.
39. Junior E. C., Gonçalves Jr A. C., Seidel E. P., Ziemer G. L., Zimmermann J., Oliveira V. H. D. de Schwantes D. & Zeni C. D., 2020. Effects of liming on soil physical attributes : A review. *Journal of Agricultural Science*, 12(10), 278.
40. 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. <https://revue.ub.edu.bi/index.php/JUB/article/view/249>
41. Kaboneka S., Ntukamazina N., Gacoreke S. & Butoki N., 2020. Analyse biologique, nutritionnelle et économique de l'association maïs-haricot. *Journal of the University of Burundi*, 29(1), 23-33. <https://www.researchgate.net/profile/Salvator-Kaboneka/publication/348541625>
42. Kaboneka S., Ong'or B. I., Kwizera C., Nsavyimana G., Buzoya D., & Ntukamazina N., 2019. Effects of urea and Di-Ammonium Phosphate on acidification of three Burundi representative soils. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*, 5(8).
43. Kajura D., Ibingira G. & Eriyo I., (2019). Evaluation of staking in a climbing bean production system as practiced by smallholder farmers in Uganda. <https://nru.uncst.go.ug/handle/123456789/1712>
44. Karaboneye F., 2013. Caractérisation de l'efficacité symbiotique de lignées africaines de soya à haute promiscuité [PhD Thesis, Université Laval]. <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/QQLA/TC-QQLA-30121.pdf>
45. Kataliko R. K., Mbahingana G. K., Muhongya E. F., Muyandula J. M., Ndaliko T. M., Wasukundi M., Kimani, P. M., & Ofori, K., 2023. Caractérisation de variétés biofortifiées en fer et zinc et variétés locales de haricot commun. *African Crop Science Journal*, 31(2), 133-149. <https://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/246822>

46. Kibiriti C., Ndayiragije S., Gourdin J. & Hollebosch P., (1986a). Analyse des bases échangeables, de la CEC et de l'acidité échangeable. ISABU.33P.
47. Kibiriti C., Ndayiragije S., Gourdin J. & Hollebosch P., 1986b. Détermination du pH, la conductivité et l'analyse de la matière organique. ISABU.35P.
48. Laguesse M., 2017. Etude de l'impact du chaulage sur les propriétés physico-chimiques du sol et les cycles biogéochimiques en écosystème forestier. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/3089>
49. Landa C., 1983. Vingt ans d'essais de fumure sur cultures vivrières au Burundi (1963-1983) : Synthèse des résultats et recommandations. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/64736416e17b74d222542018>
50. Latati M., 2015. Modélisation de la dynamique du carbone et de l'azote dans le système d'association légumineuses-céréales : Rôle fonctionnel de la symbiose rhizobienne dans le contrôle de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère [PhD Thesis, ENSA]. <http://dspace.ensa.dz:8080/jspui/handle/123456789/1865>
51. Li Y., Cui S., Chang S. X. & Zhang Q., 2019. Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species : A global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3), 1393-1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
52. Materechera S. A. & Mkhabela T. S., 2002. The effectiveness of lime, chicken manure and leaf litter ash in ameliorating acidity in a soil previously under black wattle (*Acacia mearnsii*) plantation. *Bioresource technology*, 85(1), 9-16.
53. Mbeugang D. L., Suh C. H., Mbong G. A. & Ngueguim M., 2017. Effet de la maladie des taches angulaires sur le rendement des variétés de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) à Fombot dans l'ouest Cameroun. *Agronomie Africaine*, 29(2), 197-206. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/164708>
54. Merkane Fatiha B. D. S., 2019. Etude morphologique et physiologique d'une collection de variétés de lentille (*Lens culinaris*) dans la zone de haut Chélib. <http://dspace.univ-km.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/3891/FATIHA%20AGRONOMIE%20.pdf?sequence>
55. Ndayishimiye, 2007. Effet comparative de trois amendements calco-magnésiens sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du mugamba(Gisozi). *Série: Sciences Exactes et Naturelles*, 1(28), 87.
56. Ndiaye A., 2018. Effets de la fertilisation organo-minérale sur la croissance et le rendement du mil sanio (*Pennisetum glaucum* LR Br) en Haute Casamance (Sénégal). <https://rivieresdusud.uzs.sn/handle/123456789/867>
57. Nduwimana O., Nzohabonayo Z., Hicintuka C. & Nibasumba M., 2020. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. <https://hub.ifdc.org/handle/20.500.14297/2598>
58. Ngoy G. Y., Yalombe Y. Y., John T. M., Jonathan O. N. & Binem M. K., 2017. Évaluation de l'effet combiné du chaulage et du *Tithonia diversifolia* dans la mobilisation du phosphore sur la culture du niébé dans les conditions édapho-climatiques de MbujiMayi en RDC. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 33(3), 5345-5353. <https://www.m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2017/08/3.Yalombe.pdf>
59. Niang N., 2022. Effet de l'incorporation de la biomasse de *Piliostigma reticulatum* (DC) Hochst sur le rendement du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) dans le terroir villageois de Keur Ndary (Région de Kaolack). <https://rivieresdusud.uzs.sn/handle/123456789/1624>
60. Nimubona., 2005. Effet de l'application de différents fumiers et du calcaire sur la dynamique l'Aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. *Mémoire, U.B., FACAGRO. Bujumbura*.168P.

61. Nyabyenda P., 2005. Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique : Généralités, Légumineuses alimentaires, Plantes à tubercules et racines, Céréales (Vol. 1). Presses agronomiques de Gembloux. <https://books.google.com/books?hl>
62. Opdecamp L., 1988. Etude de la toxicité aluminomanganique des sols d'altitude du Burundi. ISABU.
63. Poozesh V., 2007. Réponse des graminées des prairies permanentes à l'acidité, à l'aluminium et à la fertilisation (N, P) : Relations avec les traits fonctionnels [PhD Thesis]. <https://oatao.univ-toulouse.fr/7589>
64. Razafintsalama H., 2018. La culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans le moyen ouest du vakinankaratra : Effets d'apports de phosphore et de l'inoculation par des rhizobia [PhD Thesis, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO]. https://www.dp-spad.org/content/download/4759/35174/version/1/file/Th%C3%A8se_Harimenja_Razafintsalama_Final.pdf
65. Rengel Z., 2003. Handbook of soil acidity (Vol. 94). CRC press. <https://books.google.com/books?hl>
66. Roose E., 1990. Un programme national de gestion conservatoire de l'Eau et de la fertilité des sols (GCES) au Burundi. Rapport de mission au Burundi du, 26(2). <https://core.ac.uk/download/pdf/39863720.pdf>
67. Rosy C. & Biolders C., 2019. Identification des facteurs environnementaux et agronomiques affectant la réponse à la fertilisation microdose dans le sud du Burkina Faso [PhD Thesis]. Faculté des Bioingénieurs Université Catholique de Louvain, Ottignies
68. Roudane W., 2018. Activité insecticide de l'huile essentielle du Bigaradier (*Citrus aurantium* L.) à l'égard de la bruche du haricot *Acanthoscelides obtectus* Say (Coleoptera : Chrysomelidae: Bruchinae). [PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri]. <https://www.ummo.dz/dspace/bitstream/ummo/4574/1/Roudane%20Wassila.pdf>
69. Ruraduma C., Ntukamazina N., Ntibashirwa S. & Niko N., 2012. Conduite de la culture haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) au Burundi. Publication de l'ISABU.55P.
70. Sall P. M., 2018. Phyto-aménagement de tourbières résiduelles : Effet du chaulage et de la fertilisation sur la croissance du saule et de l'alpiste roseau et sur la répartition chimique de métaux lourds dans les sols et les plantes. <https://library-archives.canada.ca/eng/services/services-libraries/theses/Pages/item.aspx?idNumber=1132092361>
71. Schalbrock J. J. & Opdecamp L., 1987. Sensibilités différentielles du ble et du triticales à l'acidité des terres dans le Mugamba (Burundi). Publications Agricoles (Belgium). Administration Generale de la Cooperation au Developpement. no. 10. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/64735e1c2c1d629bc97d4b23>
72. Sow C. A. T., 2022. Effet de différents niveaux de fertilisation sur les propriétés chimiques du sol et sur les performances agronomiques du mil (*Thalack 2*) [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br] en station en Moyenne Casamance. <https://rivieresdusud.uasz.sn/handle/123456789/1797>
73. Van den Berghe C. H. & Hue N. V., 1999. Liming Potential of Composts Applied To an Acid Oxisol in Burundi. *Compost Science & Utilization*, 7(2), 40-46. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1999.10701962>
74. van Schöll L., 2021. Manage soil fertility. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20219819217>
75. Wakana M., 1984. Contribution à la définition de la toxicité aluminique des sols humifères d'altitude au Burundi. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/6473594808fd68d54601b684>
76. Wang Y., Yao Z., Zhan Y., Zheng X., Zhou M., Yan G., Wang L., Werner C. & Butterbach-Bahl K., 2021. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27(12), 2807-2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>

77. Weisz, J. R., Martin, B., Dupont, C. 2003. Neutralisation de l'acidité du sol et rendement des cultures. Revue de l'Agriculture Durable.
78. Wilfried S., 2016. Effets de la fertilisation organo-minerale sur le rendement du niébe (*Vigna unguiculata* L. Walp.) et les paramètres chimiques du sol en situation réelle de culture à l'ouest du burkina faso.
79. Wouters J.F.R, Wakana M. & Opdecamp L., 1985. Sensibilité du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) à la concentration en Aluminium des sols de la région des Grands-Lacs. *Tropicultura*. Vol 4(1) : 20-26.
80. Yamoah C. F., Burleigh J. R. & Malcolm M. R., 1990. Application of expert systems to study of acid soils in Rwanda. *Agriculture, ecosystems & environment*, 30(3-4), 203-218.
81. Zeinabou H., Mahamane S., Bismarck N. H., Bado B. V., Lompo F. & Bationo A., (2014). Effet de la combinaison des fumures organo-minérales et de la rotation niébé-mil sur la nutrition azotée et les rendements du mil au sahel. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(4), 1620-1632.
<https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/111391>

Dynamique de l'acidité du sol et détermination de la dose optimale de la dolomie à recommander pour la culture de haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides représentatifs des Plateaux Centraux du Burundi

Bukeyeneza Yves², Salvator Kaboneka^{1*}, Séverin Nijimbere¹, Oscar Nduwimana² et Micael Beun²

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie. Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. BP 2700 Bujumbura, Burundi. BP 2700 Bujumbura, Burundi.

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: salvator.kaboneka@gmail.com

Résumé

Cette étude vise à déterminer la dose optimale de chaux dolomitique nécessaire pour corriger l'acidité des sols d'altitude au Burundi et son impact sur le rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). A travers une série d'expérimentations en pots, nous avons testé plusieurs combinaisons de substrats, incluant 3 kg de sol et le fumier de bovin, le fertilisants organo-minéral FOMI-Imbura et la chaux dolomitique, en variant la quantité de dolomie appliquée. Les sols, prélevés dans les parcelles paysannes de la commune Gashikanwa (pH = 5,3) et Muruta (pH = 4,6) et à la ferme didactique de Zege (pH = 4,9), ont fait l'objet d'expérimentation. Les résultats obtenus ont montré que l'acidité du sol a un effet significatif sur la productivité de la culture test de haricot. Pour le sol de Gashikanwa, une dose de 750 kg/ha de dolomie a été identifiée comme optimale, tandis que pour Zege et Muruta, les doses optimales étaient respectivement de 2.000 kg/ha et 2.500 kg/ha. Cette recherche souligne l'importance d'adapter les pratiques de chaulage en fonction des caractéristiques spécifiques des sols, afin d'améliorer la fertilité et d'augmenter les rendements agricoles. Les résultats de cette étude devraient servir de guide pour les agriculteurs et les décideurs, favorisant ainsi une agriculture plus durable au Burundi.

Mots clés : Haricot, acidité du sol, fertilité du sol, chaux dolomitique, rendement agricole

Abstract

This study aims to determine the optimal dose of dolomitic lime needed to correct soil acidity in high-altitude areas of Burundi and its impact on the yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Through a series of pot experiments, we tested several substrate combinations, including 3 kg of soil, cattle manure, the organo-mineral fertilizer FOMI-Imbura, and dolomitic lime, varying the amount of dolomite applied. The soils, collected from farmers' fields in the Gashikanwa commune (pH = 5.3) and Muruta (pH = 4.6), as well as from the Zege teaching farm (pH = 4.9), were the subject of experimentation. The results showed that soil acidity has a significant effect on the productivity of the tested bean crop. For the Gashikanwa soil, a dose of 750 kg/ha of dolomite was identified as optimal, whereas for Zege and Muruta, the optimal doses were 2,000 kg/ha and 2,500 kg/ha, respectively. This research underscores the importance of adapting liming practices based on the specific characteristics of soils to improve fertility and increase agricultural yields. The findings of this study should serve as a guide for farmers and policymakers, thus promoting more sustainable agriculture in Burundi.

Keywords: Bean, soil acidity, soil fertility, dolomitic lime, agricultural yield

1. INTRODUCTION

L'acidification des sols est aujourd'hui un défi majeur pour les agriculteurs. L'agriculture actuelle est marquée par des perturbations pédologiques, se manifestant dans les régions tropicales par les pluies extrêmes, l'érosion,... difficiles à éviter, nécessitant ainsi des pratiques agricoles considérables. Au Burundi, les provinces des hauts plateaux subissent particulièrement les effets d'érosion, entraînant les pertes en terre et la destruction totale des cultures annuelles qui constituent la base alimentaire des ménages ruraux. En raison de cette acidification accrue des sols d'altitude du Burundi, nous avons décidé de mener une étude scientifique sur la dolomie face à l'acidité du sol qui s'accroît avec le temps.

Ce travail vise à déterminer la dose optimale de la dolomie à recommander pour la culture du haricot. L'objectif est de Formuler la méthode efficace de correction de l'extrême acidité des sols d'altitude du Burundi tout en démontrant l'efficacité agronomique du chaulage des sols acides sous culture et en évaluant l'effet interactif de la chaux dolomitique et d'amendement organique, constitué de fumier de vache sur les propriétés agronomiques et physicochimiques des sols d'altitude du Burundi, sur la productivité du haricot. Ce mémoire de recherche déterminera la meilleure méthode la plus rapide et la plus précise pour estimer les besoins en chaux d'un sol acide.

En fin, des solutions ont été proposées par différents intervenants dans le domaine de l'acidité des sols. La promotion de la dolomie, apport de la matière organique, cendres, sciures de bois ; L'utilisation de ces ressources naturelles de manière durable et en évitant l'utilisation excessive de produits chimiques (engrais), ... Contribuent à la préservation de la fertilité des sols et la correction de l'acidité du sol. Ces pratiques renforcent également la résilience des écosystèmes en favorisant la diversité des cultures et l'augmentation du rendement.

L'acidification du sol est un processus naturel ayant d'importants effets sur la croissance des plantes. À mesure que le sol devient de plus en plus acide, particulièrement lorsque le pH descend en-dessous de 4,5, il devient difficile de produire des cultures vivrières (Harter, 2007).

L'acidification du sol est né de la pédogenèse dans les climats tropicaux les plus humides, qu'un phénomène provoqué par la mise en culture et la dégradation progressive, dans toutes les régions à climat alterné (Dabin, 1985).

L'étude des sols tropicaux acides comme ceux du Burundi se limite aux sols normalement drainés des régions intertropicales, principalement les Acrisols, les Ferralsols et les Nitisols (Jones et al., 2013).

Au Burundi, on distingue plusieurs types des sols. Dans la plaine de l'Imbo, les sols sont récents, établis sur des sédiments lacustres ou des alluvions fluviales. Sur les contreforts des Mimirwa, les sols sont relativement fertiles mais facilement érodibles, compte tenu de la topographie de la région. Sur la crête, les sols sont conservés sous le couvert végétal et fortement lessivés dans les zones longtemps déforestées. Aux plateaux centraux, les sommets des collines sont fréquemment occupés par des sols pauvres et peu épais et dans les vallées, s'accumule un sol sableux humifère. Dans le Bugesera, les sols sont des substrats très érodibles, particulièrement inertes, avec une couche humifère très mince. Les sols de marais sont pour la plupart riches en matières organique (MEEATU, 2011).

Une des caractéristiques des sols dits tropicaux est qu'ils sont généralement acides. Selon la cartographie récente de la fertilité de sols (ISABU et IFDC – PAGRIS, 2021), la grande superficie des sols du Burundi (50,6%) présente un pH compris entre 5,1 et 5,5, alors que 22,3% d'entre eux sont considérés très fortement acides avec un pH < 5. Plus le sol est acide, plus la proportion des cations nutritifs échangeables est faible, contrairement aux cations acides tels que l' Al^{3+} . Cette diminution est d'autant plus rapide que la capacité du sol à neutraliser les acides est faible. Notons ici aussi, qu'en plus de constituer un facteur limitant à l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes, ainsi qu'à l'activité microbologique des sols essentielles au bon développement des plantes, l'acidité des sols favorise la toxicité aluminique, voire ferreuse, qui affectent davantage la production agricole des principales cultures (IFDC/PAGRIS, 2022).

Dans un sol a pH entre 5 et 5.5, on estime qu'environ 35 à 43% des éléments nutritifs ne sont pas assimilés par les plantes. Cela signifie que même en appliquant une fertilisation optimale aux plantes, environ 35 à 43% de ces investissements ne sont pas rentabilisés sur le court terme par les agriculteurs burundais (IFDC/PAGRIS, 2022). Avec 73 % des terres cultivables à $pH \leq 5,5$, l'acidité des sols est un des principaux facteurs limitants à la

production agricole au Burundi et à la dégradation générale de la fertilité des sols (IFDC/PAGRIS, 2022).

Il s'agit d'une véritable cause nationale mise encore une fois en évidence avec la mise à jour récente (édition 2021) des cartes de fertilité des sols réalisée par l'ISABU, la Faculté de l'Université du Burundi, et le MINEAGRIE, avec l'appui du projet PAGRIS de IFDC.

En marge de la protection des sols et de l'application de la matière organique, il est recommandé de compléter la fumure organique avec un amendement calcaire. Selon l'acidité des sols, cet amendement calcaire permet de remonter le pH vers des taux d'acidité plus raisonnables et favorables au développement des plantes, soit de compenser l'effet naturel d'acidification des sols. Au Burundi, un pH entre 6 et 6,5 garantirait déjà une assimilation satisfaisante des principaux éléments nutritifs, soit entre 80 et 92%, sachant que le pH idéal serait entre 6,5 et 7, avec un taux d'assimilation des éléments nutritifs proches de 100% (IFDC/PAGRIS, 2022).

Cependant, à ce jour, peu d'agriculteurs burundais procèdent à l'analyse de leurs sols. Dans les pratiques de fertilisation des cultures, ils se fient aux recommandations de gestion qui tiennent compte des propriétés régionales des sols. C'est ainsi que les formules de fertilisation et de chaulage en vigueur, établies par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), sont souvent nationales et ne tiennent pas compte des particularités des exploitations agricoles.

Les sols sont en général très désaturés en bases (Ca, Mg, K) et par conséquent sont acides et alumino-toxifiés. Leur restauration demande un apport important d'amendements calciques, de matière organique, et de fertilisants chimiques azotés et potassique de manière fractionnée (Nijimbere et al., 2021).

Une augmentation significative des rendements de cultures doit passer par l'apport suffisant de la matière organique, la biomasse fermentée nécessaire pour la vivifier (fumier ou compost), l'intégration des cultures améliorantes, l'application des engrais et des amendements efficaces pour améliorer la fertilité des sols et renforcer la structure et améliorer le pH (Hicintuka & Masilya, 2013).

Les fumiers organiques stimulent en quantité et en activité la biomasse du sol et augmentent la minéralisation des formes organiques des éléments nutritifs (azote, phosphore, soufre). En effet, l'activité des micro-organismes (mesure de l'activité enzymatique) et le niveau de minéralisation de l'azote, du phosphore et du soufre organique sont favorisés. Les effets s'expriment sur une courte durée (1 année culturale). Dans ce cas ces derniers influent moins sur le stock en carbone organique du sol (Thuriès, 2012).

Le besoin en chaux des sols acides dépend de différentes propriétés et de leur interaction : parmi d'autres, ces propriétés incluent le pH du sol, son pouvoir tampon, la capacité d'échange cationique, la matière organique, l'aluminium échangeable et la teneur en argile (Rossel et al., 2002). Les méthodes de solution-tampon ont été évaluées par de nombreux auteurs et sont considérées comme étant les plus rapides et les plus précises pour estimer les besoins en chaux d'un sol acide (Rossel et al., 2002).

Au Burundi, aucune étude n'a été faite sur la détermination de la dose optimale de la chaux dolomitique pour les cultures, raison pour laquelle nous avons voulu donner notre contribution en menant cette étude intitulée « Détermination de la dose optimale de la chaux dolomitique sur quelques sols représentatifs des plateaux et hautes collines du Burundi ».

L'objectif général de la présente étude est de déterminer la dose optimale de chaux dolomitique pour la correction de l'acidité des sols d'altitude du Burundi.

Pour atteindre l'objectif général, des objectifs spécifiques sont explorés :

1. Déterminer la dose optimale de chaux dolomitique à recommander à court et à long terme pour la correction de l'acidité observée dans les sols d'altitude du Burundi ;
2. Déterminer l'effet combiné du fumier de vache et de l'engrais organo-minéral FOMI sur l'acidité du sol et sur la croissance et le rendement du haricot

L'étude est fondée sur la double hypothèse suivante:

1. La dose théorique calculée avec la formule de Yamoah (1990) permet de corriger à court terme l'acidité des sols du Burundi ;
2. L'application du fumier de vache diminue significativement l'acidité du sol et augmente significativement le rendement du haricot.

L'acidité que l'on mesure globalement par le pH du sol dans l'eau (acidité actuelle) que l'on accompagne généralement d'une mesure de pH dans KCl (acidité potentielle), est liée au déficit de saturation, du complexe absorbant des sols par des cations alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et des cations alcalins (Na^+ et K^+). Dans les conditions alcalines, le Ca^{2+} occupe à lui seul 70 % de la somme des cations échangeables. Le complexe absorbant est mesuré par la capacité d'échange, qui outre les cations basiques fixe également les ions H^+ et Al^{3+} échangeables. La somme de tous ces cations qui représente la CEC n'est pas constante pour un sol donné, mais varie elle-même en fonction du pH. Parmi les constituants du complexe absorbant, les minéraux argileux possèdent des charges permanentes. Cependant, les groupes $-\text{SiOH}$ et $-\text{AlOH}$ des angles des cristaux, et aussi les groupes $-\text{COOH}$ et $-\text{OH}$ des matières organiques associées, libèrent des charges négatives supplémentaires ($-\text{COO}^-$, $-\text{SiO}^-$, $-\text{AlO}^-$), lorsque le pH augmente de l'acidité vers l'alcalinité (Dabin, 1985). Par convention on mesure généralement la CEC à $\text{pH} = 7$, mais il est nécessaire également de connaître ses variations aux différents pH. La perte progressive des cations basiques du complexe absorbant s'accompagne d'une baisse du pH et d'un accroissement progressif d'Al échangeable. Cet accroissement qui est lent entre pH 7 et 5,4 devient rapide entre 5,4 et 4 (Dabin, 1985).

Les pH acides du sol sont associés à de nombreux effets négatifs sur les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques, la croissance des plantes et l'environnement. Une série de ces effets négatifs est listée ci-après :

1. Déficiences des plantes en nombreux éléments essentiels à sa croissance (N, P, K, S, Ca, Mg, Mo, B).
2. Toxicité aluminique, manganique et ferreuse
3. Faible activité microbienne et faible décomposition de la matière organique
4. Faible capacité d'échange cationique (CEC)
5. Faible fixation biologique de N (déficiency en Mo, besoin très élevé en Ca)
6. Faible formation des agrégats et structuration du sol qui impacte négativement la porosité, l'infiltration et la perméabilité du sol, de même que la rétention en eau du sol
7. Faible valorisation des apports en éléments nutritifs, en particulier les engrais
8. Inhibition de la croissance racinaire et la formation des poils absorbants
9. Réduction de la profondeur d'enracinement et du volume d'exploration racinaire
10. Risques élevés des pertes de lessivage des nutriments
11. Risque de stress hydrique pendant les périodes de faible pluviométrie.
12. Faible production quantitative et qualitative (sécurité alimentaire et nutritionnelle), valeur nutritive des aliments, du lait et même la valeur fertilisante du fumier
13. Pertes de la biodiversité et mutation végétale au bénéfice de plantes indicatrices d'acidité (e.g. Eragrostis - Ishinge, plantes indicatrices, fougère - Igishurushuru)

Dans les régions tempérées, il y a peu de risques d'amender le sol avec trop de chaux, mais ce n'est pas le cas des sols tropicaux. En fait, mieux vaut considérer le chaulage de la plupart des sols tropicaux comme une fertilisation en calcium plutôt qu'une modification du pH, et le pH cible ne devrait probablement jamais dépasser environ 6,0, avec une cible idéale entre 5,0 et 5,5. Dans cette plage de pH, les concentrations d'aluminium et de manganèse dans la solution du sol sont substantiellement réduites et ces ions ne sont plus toxiques pour les plantes. Par contre, une augmentation plus importante du pH peut rendre le molybdène toxique. De plus, les plantes peuvent devenir déficientes en nutriments comme le cuivre, le zinc, le bore et le manganèse. Cela résulte de la solubilité réduite de ces nutriments lorsque le pH est élevé et à l'usure acide réduite des rares nutriments contenant des minéraux encore présents dans le sol (Harter, 2007).

Selon les fiches techniques de vulgarisation agricole de 2022 au Burundi (MINEAGRIE, 2022), on distingue quatre types de chaux suivants :

- i) la chaux vive : oxyde de calcium anhydre, CaO ;
- ii) la dolomite : roche constituée essentiellement de carbonate de calcium et de magnésium ;
- iii) le travertin : constitué essentiellement de carbonate de calcium, avec peu ou pas de Magnésium ;
- iv) la chaux éteinte qu'on obtient en ajoutant de l'eau à la chaux vive.

La méthodologie de calcul des besoins en dolomie basée sur la carte actualisée de l'acidité des sols et des superficies concernées repose sur la combinaison de la formule de Yamoah et al. (1990) qui peut à la fois être utilisée avec la moyenne de pH des classes I et II de l'abaque $[(4,7 + 5,2)] / 2 = 4,9 \approx 5$. Dès lors, la formule de Yamoah et al. (1990) peut raisonnablement être utilisée pour estimer les besoins en dolomie pour la correction des sols très fortement acides (2 T/ha sur 2 ans), l'abaque pouvant être utilisé pour estimer les besoins en dolomie pour l'entretien des sols très fortement acides (0,6 T/ha/an) après correction, ainsi que les besoins de correction (0,7 T/ha sur 2 ans) et d'entretien (0,5 T/ha/an) des sols fortement acides.

La lecture de la carte d'acidité des sols récemment produite par ISABU/IFDC à laquelle est superposée la carte administrative indique que 31 communes sont les plus affectées par l'acidité des sols au Burundi. Elles sont réparties sur 9 provinces du pays et sont listées (par ordre alphabétique) dans le Tableau 1. A notre avis, ce sont ces communes qui devraient bénéficier en priorité des opérations de correction de l'acidité par l'application de la dolomie.

Tableau 1. Communes les plus affectées par l'acidité des sols au Burundi

Province	Communes les plus affectées par l'acidité des sols
Bubanza (1)	Rugazi
Bujumbura (3)	Nyabiraba, Mukike, Mugongo Manga
Bururi (4)	Mugamba, Matana, Songa, Rutovu
Cankuzo (2)	Cankuzo, Kigamba
Cibitoke (3)	Bukinanyana, Mabayi, Mugina
Gitega (6)	Buraza, Gishubi, Itaba, Mutaho, Nyarusange, Ryansoro
Kayanza (4)	Kabarore, Muruta, Matongo, Rango
Karuzi (4)	Bugenyuzi, Gihogazi, Mutumba, Nyabikere
Ngozi (4)	Gashikanwa, Kiremba, Ruhororo, Tangara

La matière organique joue des rôles variables vis-à-vis de l'aluminium échangeable. Lorsque l'humification donne naissance à des acides humiques et de l'humine, dans des sols contenant quelques réserves minérales, l'enrichissement en cations est corrélié à l'enrichissement en humus, d'où un effet de blocage de Al échangeable avec relèvement du pH (Dabin, 1985).

En revanche en climat longuement humide et sol à fort drainage, l'humus contient des proportions très élevées d'acides fulviques libres (ou mobiles) ; il s'ensuit une aggravation du lessivage, et l'aluminium est alors corrélié directement à la teneur en acides fulviques libres, donc au taux de matière organique. Dans les sols à teneurs élevées en Al échangeable, la nature de la plante intervient prioritairement dans la sensibilité au phénomène de toxicité, la correction ne peut se faire uniquement par l'apport de matière organique.

Si le sol ne contient pas de réserves de bases, et est riche en acides fulviques libres l'amendement calco-magnésien devient alors indispensable. Il y a lieu de ne pas limiter cet amendement uniquement à la couche supérieure, car les racines profondes absorbent beaucoup d'Aluminium (Dabin, 1985). Dans la bonne gestion des sols acides, l'augmentation du pourcentage en matière organique paraît être une solution incontournable à la plupart de ce problème. En effet, la matière organique permet d'augmenter la CEC et de diminuer le point de charge nette zéro (PCNZ), de libérer l'azote et le phosphore par minéralisation mais aussi de bloquer les sites d'absorption anionique qui peuvent retenir trop fortement le phosphore pour qu'il puisse être prélevé par les plantes (Wambeke, 1992), Van Ranst, 1995). On peut affirmer que l'apport de fumier améliore quelque peu les propriétés physiques du sol mais surtout réduit les carences en N-P-K. L'apport brutal de calcium et magnésium déséquilibre le complexe échangeable, très peu saturé, et bloque la disponibilité de certains éléments (P et oligo-éléments) (Rishirumuhirwa & Roose, 1997). L'effet du fumier de vache sur la réduction de l'acidité du sol est contrôlé par la neutralisation par chélation de l'Al échangeable par un certain nombre d'acides organiques. Les acides les plus efficaces sont les acides aliphatiques du groupe des acides oxaliques, maliques et citriques (Hue, 1986).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Sols, traitements

Les sols de départ ont été caractérisés au laboratoire LASPA de l'ISABU suivant les méthodes analytiques standards (Kibiriti et al, 1986a, 1986b). A la conclusion (récolte) des expérimentations en pot, les analyses de sols ont été effectuées. Elles ont porté sur les paramètres suivants : le pH (pH H₂O), P assimilable et acidité d'échange (Al³⁺, H⁺). Les analyses ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), suivant les méthodes standards (Kibiriti et al. 1986a, 1986b). Dans chacun des pots, sauf ceux des traitements témoins, du fumier de vache et de l'engrais organo-minéral FOMI-Imbura ont été appliqués à raison de 10 T/ha et 200 kg/ha respectivement en ajustant cette quantité au poids du sol du pot (3 kg) tout en tenant compte du poids du sol par ha de 2000 T. Les traitements testés sont indiqués dans les tableaux 2 à 4.

Tableau 2. Traitements sous expérimentation (sol de Gashikanwa)

Traitement	Dolomie T/ha	Fomi imbura (kg/ha)	Fumier de vache (T/ha)
T0 (Témoin)	0	0	0
T1	0	200	10
T2	0,25	200	10
T3	0,5	200	10
T4	0,75	200	10
T5	1	200	10
T6	1,25	200	10

Tableau 3. Traitements sous expérimentation (sol de Muruta)

Traitement	Dolomie T/ha	Fomi imbura (kg/ha)	Fumier de vache (T/ha)
T0 (Témoin)	0	0	0
T1	0	200	10
T2	0,5	200	10
T3	1	200	10
T4	1,5	200	10
T5	2	200	10
T6	2,5	200	10

Tableau 4. Traitements sous expérimentation (sol de Zege)

Traitement	Dolomie T/ha	Fomi imbura (kg/ha)	Fumier de vache (T/ha)
T0	0	0	0
T1	0	200	10
T2	1	200	10
T3	2	200	10
T4	3	200	10
T5	4	200	10
T6	5	200	10

Le fumier utilisé pendant l'étude provenait de la Commune de Gihanga et l'engrais utilisé était FOMI Imbura de formule suivante : 9% N, 22% P₂O₅, 4% K₂O, 13% CaO, 2% MgO. La chaux dolomitique utilisée avait comme composition 29% CaO et 21% MgO.

2.2. Culture test

La culture test utilisée dans cette étude menée en pot était celle du haricot nain (*Phaseolus vulgaris* L.), variété Rufutamadeni, diffusée au Burundi. Le choix de la culture de haricot a été motivé par sa sensibilité à l'acidité et la toxicité Al du sol (Wouters et al., 1985). Les premiers symptômes de toxicité Al s'expriment sur les parties végétatives du plant en croissance, sur les racines comme sur les parties aériennes (Wouters et al., 1985).

2.3. Dispositif expérimental

Ce travail expérimental a été conduit dans des pots en plastique de 4,8 L et contenant chacun 3 kg de sol provenant des sites de Gashikanwa, Zege et Muruta. L'expérimentation a eu lieu en milieu contrôlé à Bujumbura du 4 mai 2023 au 22 février 2024. Au départ, l'étude visait l'usage de trois sols de 3 catégories de pH (<4,5 ; 4,5-5,0, 5,0-5,5). Ces sols étaient supposés provenir des sites de Zege (pH < 4,5), Muruta (4,5 < pH < 5) et Gashikanwa (5,0 < pH < 5,5). Selon Yamoah, les doses de chaux à appliquer sur ces sols sont respectivement de 3,82 ; 2,2 et 1 T/ha. Nous pouvons nous permettre d'arrondir les deux premières doses d'application à 4 et 2 T/ha.

Les traitements testés sur base d'équivalents par ha sont illustrés dans les tableaux 2 à 4, suivant les sols utilisés dans l'expérimentation. Ils correspondent à des doses croissantes de dolomie appliquée dans chaque cas, suivant des progressions géométriques de 0,25, 0,5 et 1 autour des doses calculées avec la formule de Yamoah et al. (1990), respectivement pour les sols de Gashikanwa, Muruta et Zege. Les applications des différents intrants ont été estimées sur base sur la masse d'un sol moyen (2.000.000 kg/ha).

Cette étude a été conduite dans un milieu contrôlé en pots dans l'une des serres de la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). Les traitements testés pour les trois sols utilisés dans l'expérimentation ont été décrits dans les tableaux 2 à 4. Le dispositif utilisé était en randomisation totale avec 3 répétitions, donnant lieu à 21 unités expérimentales (Figure 1).

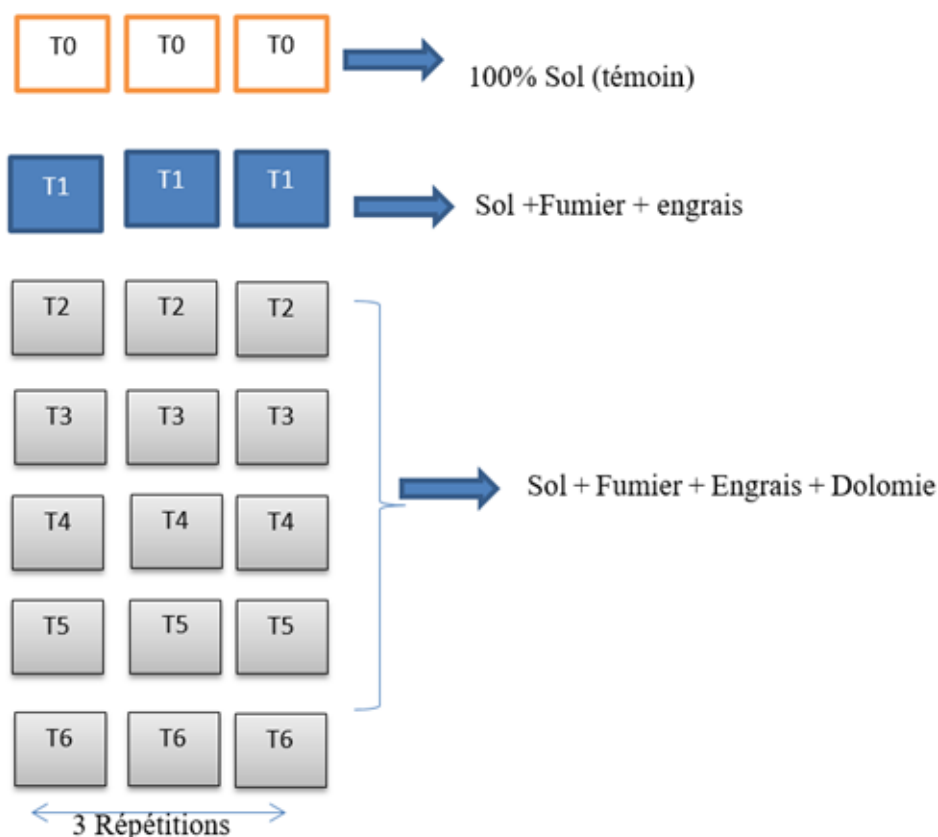


Figure 1. Présentation du dispositif expérimental

Chaque pot utilisé dans l'expérimentation était préalablement percé pour faciliter le drainage. La fréquence de l'arrosage était de trois fois par semaine, pendant tout le cycle de l'expérimentation (huit mois), de manière à maintenir l'humidité à un taux optimum pour l'humification.

2.4. Fertilisation chimique et semi du haricot

Cette expérimentation a été conduite en trois cycles culturaux du haricot rufutamadeni. Ces trois cycles ont duré 8 mois. Le calendrier de semis et de récolte est montré dans le tableau 5. Chaque cycle cultural comprenait es opérations de fertilisation organique et minérale des sols, semis du haricot, entretien et récolte.

La fertilisation chimique pendant l'étude a été assurée par l'application de FOMI Imbura de formule : 9% N, 22% P₂O₅, 4% K₂O, 13% CaO, 2% MgO. La dose appliquée a été calculée à partir de la quantité nécessaire par ha (200 kg/ha), tenant compte d'une masse d'un sol moyen qui est de 2.000.000 kg/ha.

Une semaine après la préparation et le remplissage des pots, des semences de haricot de la variété Rufutamadeni ou Mutwenzi ont été semées à raison de 6 graines par pot. Dix jours après, un démariage a été effectué en laissant 3 plants les plus vigoureux.

Tableau 5. Calendrier de plantation et de récolte

Plantation	Récolte	Cycle végétatif
4/5/2023	15/7/2023	2 mois 11 jours
2/9/2023	24/11/2023	2 mois 22 jours
1/12/2023	22/2/2024	2 mois 21 jours

2.5. Collecte des données

A chaque date de récolte, les paramètres de croissance et de rendement du haricot ont été évalués. Il s'agit de la hauteur des plants, la longueur racinaire, la biomasse (racinaire et aérienne), nombre de gousses par plant, nombre de graines par gousse, poids de graines.

La récolte a été effectuée à la main. Les graines et les autres parties racinaires et aériennes ont été séchées à l'air libre pendant deux semaines puis conservées dans les sacs dans un endroit frais et aéré. Les poids des racines, des parties aériennes et des graines ont été ensuite mesurées séparément avec une balance analytique de type Sartorius avec une précision de 0,01 près.

Les données collectées sur les indicateurs de croissance et du rendement ont été enregistrées dans des fichiers Excel. Elles ont été classées par traitement avant d'être soumises à une analyse de la variance (ANOVA) pour tester la significativité des différences observées entre les traitements. Les données ont été traitées avec Microsoft Excel et les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel d'analyse SPSS.

3. PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyses de sols, de fertilisants et de dolomie

Les analyses de sols et de fumier de vache utilisés ont donné les résultats consignés dans les tableaux 6 et 7 respectivement.

Tableau 6. Caractéristiques chimiques des sols de Zege, Muruta et Gashikanwa

Paramètre	Zege	Muruta	Gashikanwa
pH H ₂ O	4,90	4,60	5,3
pH KCl	4,11	4,67	4,37
CE (μS/Cm)	70,5	100	126,2
% C organique	1,69	1,44	2,10
% N total	0,10	0,21	0,29

C/N	16,9	6,90	7,20
P assimilable (mg/kg)	3,64	3,80	5,53
Ca échangeable (mécq/100 g)	0,87	1,72	4,50
Mg échangeable (mécq/100 g)	0,39	0,67	2,00
K échangeable (mécq/100 g)	0,20	0,18	0,68
Na échangeable (mécq/100 g)	0,05	0,05	0,08
CEC (mécq/100 g)	8,21	8,66	8,24
Acidité totale (mécq/100 g)	0,50	0,37	0,52

Sur base des normes d'analyses des sols proposés par l'ISABU (Tessens et Gourdin, 1993), les trois sols de Zege, Muruta et Gashikanwa sont acides avec des risques de toxicité Al, sans risques de salinité, moyennement riches en matière organique, très pauvres en P assimilable. Les sols de Zege et de Muruta sont très pauvres en Ca, Mg et K échangeables. Au contraire, celui de Gashikanwa a des contenus élevés en ces trois cations échangeables.

Contre toute attente, le pH du sol de Zege n'est pas dans la tranche des pH inférieur à 4,5. Cela a été causé par une erreur technique de prélèvement de l'échantillon à utiliser. Il a été prélevé sur un champ qui avait été chaulé l'année précédente : ce qui a remonté son pH à une valeur inattendue.

De l'autre côté, l'analyse du fumier de vache utilisé (Tableau 7) relève qu'il est dans la marge de pH alcalin des matières organiques animales, mais pauvres en N et en K, avec des contenus moyens et élevé, respectivement en Ca et en Mg (Motsara & Roy 2008)

Tableau 7. Composition chimique du fumier de vache

Paramètre	Valeur
pH	8,6
CE ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	995
% C organique	7,77
% N total	0,82
C/N	9,5
% Ca total	0,68
% Mg total	0,71
% K total	0,59
% Na total	0,15

La composition chimique de la chaux dolomitique utilisée était la suivante : pH = 9,1, % CaO = 29 % MgO = 21 %. Le pH de FOMI Imbura était de 6,9 et un pourcentage en C organique de 4 %. La composition élémentaire de ce fertilisant organo-minéral a été donnée dans les paragraphes précédents.

3.2. Effets de la dolomie et du fumier de vache sur les paramètres de croissance et de rendement du haricot

Les résultats analytiques obtenus sont illustrés dans les tableaux qui indiquent le classement des groupes de moyennes homogènes obtenus. Dans les différents tableaux, les moyennes suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

3.2.1 Paramètres de croissance et de rendement du haricot cultivé en pots sur le sol de Gashikanwa (pH = 5,33)

3.2.1.1 Hauteur moyenne (cm) des tiges

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la première et la deuxième récolte quant à la hauteur moyenne des plants de haricot (Tableau 8). Le classement des hauteurs moyennes des tiges de haricot pour la deuxième récolte montre deux groupes de moyennes chevauchants, avec à la tête les traitements T6 (1.250 kg/ha de dolomie), suivi des traitements T4 (750 kg/ha de dolomie) et T5 (1.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 8. Hauteur moyenne (cm) des tiges

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	23,00±3,61a	28,43±5,06b	17,67±0,58a
T1 (0 kg de dolomie)	21,53±3,61a	26,33±2,52b	19,87±2,20a
T2 (250 kg de dolomie)	22,27±1,25a	32,2±2,82ab	19,40±2,31a
T3 (500 kg de dolomie)	24,00±5,00a	32,3±1,48ab	21,53±3,66a
T4 (750 kg de dolomie)	20,63±1,19a	38,87±4,37a	23,30±2,70a
T5 (1000 kg de dolomie)	24,30±2,00a	38,30±4,29a	22,97±5,82a
T6 (1250 kg de dolomie)	20,53±0,92a	40,67±2,08a	25,40±4,15a

Malgré l'absence de différences statistiques ($p > 0,05$), ce sont les traitements T5 (1.000 kg/ha de dolomie) et T3 (500 kg/ha de dolomie) qui enregistrent les plus grandes hauteurs des tiges pour la première récolte. Pour la troisième récolte, ce sont, dans l'ordre décroissant, les traitements T6 (1.250 kg/ha de dolomie), T4 (750 kg/ha de dolomie) et T5 (1.000 kg/ha de dolomie) qui se démarquent pour la hauteur des tiges de haricot.

3.2.1.2 Longueur (cm) des racines

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la première et la troisième récolte. C'est ainsi que les des longueurs des racines de haricot sont classées dans un seul groupe de moyennes homogènes (Tableau 9). Cependant, en valeurs absolues et au-delà des statistiques, les longueurs racinaires les plus élevées sont obtenues avec le traitement T1 (Fumier de vache + FOMI Imbura) pour la première récolte et les traitements T5 (1.000 kg/ha de dolomie) et T6 (1.250 kg/ha de dolomie) pour la deuxième récolte.

L'analyse de la variance appliquée à la longueur des racines pour la deuxième récolte relève deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. A la tête se retrouvent le traitement T4 (750 kg/ha de dolomie) suivi du traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 9. Longueur (cm) des racines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	6,10±0,69a	15,97±5,34ab	9,87±0,23a
T1 (0 kg de dolomie)	9,30±2,16a	14,67±2,08ab	9,97±1,88a
T2 (250 kg de dolomie)	6,83±2,75a	19,87±5,08ab	11,43±1,25a
T3 (500 kg de dolomie)	6,17±0,29a	14,20±1,15b	11,30±1,00a
T4 (750 kg de dolomie)	6,63±1,53a	25,40±3,73a	11,30±0,89a
T5 (1000 kg de dolomie)	6,20±0,85a	23,43±5,66ab	13,20±1,01a
T6 (1250 kg de dolomie)	5,93±0,40a	20,87±2,14ab	12,10±2,01a

3.2.1.3 Nombre de gousses par pot

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % (Tableau 10). Ainsi, aussi bien pour la première, la deuxième ou la troisième récolte, les moyennes du nombre de gousses de haricot par pot sont classées dans un seul et même groupe.

Tableau 10. Nombre de gousses par pot et par récolte

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	3,33±0,57a	8,67±3,52a	1,67±0,57a
T1 (0 kg de dolomie)	4,67±1,53a	6,67±1,53a	4,00±1,00a
T2 (250 kg de dolomie)	6,00±2,64a	8,33±1,53a	3,67±1,53a
T3 (500 kg de dolomie)	4,33±1,15a	7,00±1,00a	4,33±1,53a
T4 (750 kg de dolomie)	5,00±1,00a	10,67±1,53a	4,33±1,53a
T5 (1000 kg de dolomie)	7,00±1,73a	10,00±2,64a	4,67±1,53a
T6 (1250 kg de dolomie)	5,33±1,53a	8,67±1,15a	3,33±1,53a

Mais au-delà des statistiques, et en considérant les valeurs absolues, le traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomie) se démarque des autres traitements pour la première récolte.

Les traitements T4 (750 kg/ha de dolomie) et T5 (1.000 kg/ha de dolomie) sont dans la même situation pour la deuxième récolte, tandis que dans la troisième récolte, un trio de traitements T5, T4 et T3 (1.250 kg/ha de dolomie) sont en tête. Les mêmes résultats montrent une tendance croissante entre la première et la deuxième récolte, suivie d'une tendance décroissante entre la deuxième et la troisième récolte. Ceci est une indication d'un court effet résiduel des traitements, seulement visible entre la première et la deuxième récolte.

3.2.1.4 Nombre de gousses par plant

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour aucune des trois récoltes quant au nombre de gousses par plant (Tableau 11).

Tableau 11. Nombre de gousse par plant

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	1,50±0,50a	2,89±1,17a	0,78±0,19a
T1 (0 kg de dolomie)	1,89±1,02a	2,22±0,50a	1,33±0,33a
T2 (250 kg de dolomie)	2,61±1,27a	2,78±0,51a	1,22±0,51a
T3 (500 kg de dolomie)	2,17±0,58a	2,33±0,33a	1,44±0,51a
T4 (750 kg de dolomie)	1,67±0,33a	3,56±0,51a	1,44±0,51a
T5 (1000 kg de dolomie)	2,33±0,58a	3,33±0,88a	1,72±0,25a
T6 (1250 kg de dolomie)	2,00±0,33a	2,89±0,38a	1,11±0,51a

Au-delà des statistiques, il n'empêche pas que, en première récolte, ce soient les traitements T2 (250 kg/ha de dolomie) et le traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomie) qui ressortent du lot. En deuxième récolte, avec les plus grands nombres de gousses par plant par rapport aux deux autres récoltes, ce sont plutôt les traitements T4 et T5 qui enregistrent les nombres de graines par plant les plus élevés (Tableau 12). Nous notons que, pour le nombre de gousses par plant, comme pour les paramètres précédents, la deuxième récolte est la plus productive des trois.

3.2.1.5 Nombre de graines par pot

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la première et la deuxième récolte (Tableau 12). De ce fait, toutes les moyennes du nombre de graines de haricot par pot correspondantes à ces deux récoltes sont classées dans le même groupe de moyennes homogènes. Il n'en ressort pas moins que c'est le traitement T4 (750 kg/ha de dolomie) qui enregistre les plus grands nombres de graines de haricot par pot.

Tableau 12. Nombre de graines par pot

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	3,00±3,60a	18,00±10,53a	3,00±2,00b
T1 (0 kg de dolomie)	8,00±1,00a	15,33±2,08a	5,67±2,52ab
T2 (250 kg de dolomie)	6,33±1,53a	21,33±9,07a	7,67±4,16ab
T3 (500 kg de dolomie)	8,67±3,51a	17,00±0,00a	8,00±2,00ab
T4 (750 kg de dolomie)	9,67±2,31a	31,33±9,07a	11,67±2,08a
T5 (1000 kg de dolomie)	8,00±4,36a	26,33±9,71a	9,00±3,00ab
T6 (1250 kg de dolomie)	7,33±2,52a	16,33±3,51a	6,33±4,16ab

C'est la même conclusion que l'on peut tirer aussi à la troisième récolte, pour laquelle ce même traitement T4 produit plus de 4 fois le nombre de graines par pot que le traitement témoin T1, sans être néanmoins statistiquement différent des autres traitements (T1, T2, T3, T5 et T6). La même tendance croissante/décroissante entre les trois récoltes telle que relevée ci-dessus apparaît aussi pour le paramètre nombre de graines par pot.

3.2.1.6 Nombre de graines par gousse

L'analyse statistique a montré un seul groupe de moyennes homogènes du nombre de graines par gousse, aussi bien pour la première, la deuxième que la troisième récolte (Tableau 13). Dans tous les cas, c'est le traitement T4 (750 kg/ha de dolomie) qui reste en tête.

Tableau 11. Nombre de graines par gousse

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	0,80±0,88a	1,97±0,41a	1,67±0,76a
T1 (0 kg de dolomie)	1,82±0,50a	2,34±0,31a	1,59±1,04a
T2 (250 kg de dolomie)	1,19±0,46a	2,48±0,62a	2,02±0,65a
T3 (500 kg de dolomie)	1,95±0,39a	2,46±0,35a	1,89±0,19a
T4 (750 kg de dolomie)	1,93±0,24a	2,90±0,56a	2,80±0,50a
T5 (1000 kg de dolomie)	1,22±0,82a	2,61±0,45a	1,97±0,45a
T6 (1250 kg de dolomie)	1,42±0,52a	1,87±0,22a	1,90±0,79a

3.2.1.7 Poids de mille graines

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour aucune des trois récoltes quant au poids de mille graines de haricot (Tableau 14).

Tableau 12. Poids de mille graines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 Kg de dolomie)	91,62±82,19 a	319,58±42,96a	67,29±7,24a
T1 (0 Kg de dolomie)	70,97±27,75a	264,41±49,71a	81,78±15,53a
T2 (250 Kg de dolomie)	75,90±32,65a	337,55±61,61a	93,03±35,6a
T3 (500 Kg de dolomie)	74,63±30,43a	352,92±67,07a	114,26±35,06a
T4 (750Kg de dolomie)	75,30±21,25a	368,38±49,41a	82,81±24,36a
T5 (1000Kg de dolomie)	122,22±51,06a	370,50±65,82a	123,62±41,47a
T6 (1250 Kg de dolomie)	99,19±35,68a	370,50±92,92a	87,43±11,7a

En absence de différences significatives entre les traitements testés quant au poids de mille graines pour les trois récoltes, le traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomie) pour la première récolte, T5, T4 (750 kg/ha de dolomite) et T6 (1.250 kg/ha de dolomite) pour la deuxième récolte et T5 et T3 (500 kg/ha de dolomite) pour la troisième récolte sont caractérisées quantitativement (et pas statistiquement) par les poids de mille graines les plus élevés.

Aussi, quand les résultats des trois récoltes sont comparés, la deuxième récolte constitue le pic en poids de mille graines de haricot. Cette observation a été également relevée pour les autres paramètres mesurés au cours des trois récoltes de haricot.

3.2.1.8 Biomasse totale du haricot

Pour le paramètre biomasse totale du haricot, l'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 %. C'est ainsi que toutes les moyennes de biomasse totale du haricot cumulée sur trois récoltes appartiennent au même groupe homogène (Tableau 15).

Tableau 15. Biomasse totale de haricot

Traitement	Moyenne en g/traitement
T0 (0 kg de dolomie)	13,09±5,32a
T1 (0 kg de dolomie)	13,09±2,75a
T2 (250 kg de dolomie)	16,35±2,07a
T3 (500 kg de dolomie)	12,79±3,80a

T4 (750 kg de dolomie)	22,48±7,53a
T5 (1000 kg de dolomie)	20,49±3,75a
T6 (1250 kg de dolomie)	19,47±6,28a

Malgré tout, en valeur absolue les deux traitements avec les biomasses les plus élevées sont enregistrées avec les traitements T4 (750 kg/ha de Dolomie) et T5 (1.000 kg/ha de dolomie).

3.2.1.9 Production en graines de haricot

L'analyse de la variance a montré un effet significatif ($p < 0,05$) des traitements sur la production en graines du haricot. Le classement des moyennes homogènes est montré dans le tableau 16 ci-dessus.

Tableau 16. Production en graines de haricot par traitement pour le sol de Gashikanwa

Traitement	Moyenne en g/Traitement
T0 (0 kg de dolomie)	6,71±4,74ab
T1 (0 kg de dolomie)	5,13±1,23b
T2 (250 kg de dolomie)	8,26±2,03ab
T3 (500 kg de dolomie)	7,46±0,97ab
T4 (750 kg de dolomie)	12,97±2,67a
T5 (1000 kg de dolomie)	11,65±3,93ab
T6 (1250 kg de dolomie)	6,23±1,81ab

L'analyse statistique des moyennes de production de graines par pot indique 2 groupes de moyennes chevauchants. La valeur la plus élevée en graines de haricot a été obtenue avec le traitement T4 qui correspond à une dose de dolomie de 750 kg/ha. Ce traitement correspond à la valeur pic de production en graines de haricot. Il n'est pas statistiquement différent des traitements T5, T2, T3, T6 et même T0 (Témoin). Cependant, en valeur absolue, ce traitement produit entre 12 (T5) et 108 (T6) % de plus que les autres traitements appartenant au même groupe de moyennes homogènes, lesquelles ne sont pas statistiquement différentes de la plus faible moyenne obtenue avec le traitement T1 (Fumier et FOMI Imbura seuls).

3.2.2 Paramètres de croissance et de rendement du haricot cultivé en pots sur le sol de Zege (pH=4,9)

3.2.2.1 Hauteur moyenne (cm) des tiges

L'analyse statistique effectuée sur la longueur moyenne des racines n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour toutes les trois récoltes (Tableau 17).

Malgré l'absence de différences statistiques ($p > 0,05$), ce sont les traitements T5 (4.000 kg/ha de dolomie) et T2 (1.000 kg/ha de dolomie) qui enregistrent les plus grandes hauteurs des tiges pour la première récolte. La deuxième récolte donne des résultats mitigés, dans la mesure où le traitement témoin T0 est comparable aux traitements T5 (4.000 kg/ha de dolomie) et T4 (3.000 kg/ha de dolomie) qui ont été chaulés et fertilisés. La troisième récolte met en avant et dans l'ordre décroissant les traitements T2 (1.000 kg/ha de dolomie), T1 (Imbura + Fumier de vache), T5 (4.000 kg/ha) et T4 (3.000 kg/ha). La tendance montante et décroissante de la longueur moyenne des tiges est moins marquée par rapport aux autres paramètres mesurés.

Tableau 17. Hauteur moyenne (cm) des tiges

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	20,40±5,00a	37,07±5,50a	24,83±5,85a
T1 (0 kg de dolomie)	26,73±0,98a	33,10±4,85a	29,77±2,40a
T2 (1000 kg de dolomie)	27,97±3,94a	36,73±5,08a	33,33±2,52a
T3 (2000 kg de dolomie)	26,13±2,28a	32,97±8,40a	25,83±1,96a
T4 (3000 kg de dolomie)	21,97±4,81a	35,67±2,08a	28,73±5,61a
T5 (4000 kg de dolomie)	29,10±1,85a	36,77±9,13a	29,43±2,98a
T6 (5000 kg de dolomie)	26,17±2,36a	34,77±5,17a	26,77±5,00a

3.2.2.2 Longueur moyenne (cm) des racines

L'analyse de la variance appliquée au paramètre longueur moyenne des racines n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la deuxième et la troisième récolte. De la sorte, le classement des moyennes a donné lieu à un seul groupe autant pour la deuxième que la troisième récolte (Tableau 18). Cependant, en valeurs absolues, ce sont les traitements T0 (témoin intégral), T5 (4.000 kg/ha de dolomie) et T6 (5.000 kg/ha de dolomie) qui donnent les plus grandes longueurs des racines à la deuxième récolte. À la troisième récolte, c'est le traitement T3 (2.000 kg/ha de dolomie) qui semble se détacher.

L'analyse de la variance effectuée sur le paramètre longueur moyenne des racines pour la première récolte relève deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. À la tête du groupe se trouvent les traitements avec les plus grandes doses de dolomies T5 (4.000 kg/ha) et T6 (5.000 kg/ha de dolomie) suivis de près par le traitement T3 (2.000 kg/ha).

Tableau 18. Longueur moyenne (cm) des racines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	6,87±0,81b	17,97±5,49a	10,43±1,50a
T1 (0 kg de dolomie)	6,97±1,19b	13,07±3,07a	11,43±0,75a
T2 (1000 kg de dolomie)	9,63±3,51ab	16,83±5,56a	12,53±1,66a
T3 (2000 kg de dolomie)	12,57±1,05a	15,43±5,66a	11,63±1,53a
T4 (3000 kg de dolomie)	9,87±0,51ab	16,10±4,15a	11,87±1,80a
T5 (4000 kg de dolomie)	12,97±1,35a	18,70±6,23a	11,87±0,23a
T6 (5000 kg de dolomie)	12,87±0,23a	18,50±1,80a	10,63±0,65a

3.2.2.3 Nombre de gousses par pot

À l'exemple des paramètres « Production en graines » et « Biomasse totale » du haricot, l'analyse de la variance (ANOVA 1) appliquée au paramètre nombre de gousses par pot n'a pas pu démontrer l'effet des traitements au seuil de 5 % de probabilité ($p < 5\%$) pour les trois récoltes. C'est ainsi qu'un seul groupe de moyennes homogènes a été observé (Tableau 19).

Néanmoins, quelques traitements sortent du lot. C'est en particulier le traitement T2 (1.000 kg/ha de dolomie) pour la première et la deuxième récolte, et le même traitement T2 pour la troisième récolte, pour laquelle il est surpassé par le traitement T5 (4.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 19. Nombre de gousses par pot

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	5,33±3,21a	7,00±1,00a	3,00±0,00a
T1 (0 kg de dolomie)	7,33±0,58a	6,33±1,53a	3,00±1,00a
T2 (1000 kg de dolomie)	8,67±1,53a	9,00±4,00a	4,33±1,15a
T3 (2000 kg de dolomie)	7,00±3,46a	7,67±3,05a	3,67±1,15a
T4 (3000 kg de dolomie)	6,33±1,53a	7,33±3,21a	4,00±1,73a
T5 (4000 kg de dolomie)	7,33±0,58a	6,67±1,15a	5,00±1,00a
T6 (5000 kg de dolomie)	3,00±2,64a	5,67±0,58a	2,67±2,52a

Contrairement aux résultats de récoltes rapportées dans le cas du sol de Gashikanwa, la tendance croissante/décroissante entre les trois récoltes n'est pas aussi nettement marquée pour le site de Zege.

3.2.2.4 Nombre de gousses par plant

L'analyse de la variance à un seul critère au seuil de 5 % de probabilité ne montre pas d'effet des traitements sur le nombre de gousses par plant (Tableau 20). Au-delà des comparaisons statistiques, les traitements T2 (1.000 kg/ha de dolomie), T3 (2.000 kg/ha de dolomie) et T4 (3.000 kg/ha de dolomie) se démarquent des autres traitements

pour la première récolte. Les mêmes observations se confirment pour la deuxième récolte, alors que pour la troisième récolte, c'est le traitement T2 (1.000 kg/ha de dolomie) qui a le nombre de gousses par plant numériquement le plus élevé.

Tableau 20. Nombre de gousses par plant

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	1,67±1,15a	2,67±0,58a	1,00±0,00a
T1 (0 kg de dolomie)	2,33±0,58a	2,33±0,58a	1,00±0,00a
T2 (1000 kg de dolomie)	2,67±0,58a	3,00±1,00a	1,67±0,58a
T3 (2000 kg de dolomie)	2,67±0,58a	3,00±1,00a	1,33±0,58a
T4 (3000 kg de dolomie)	2,67±0,58a	3,33±2,31a	1,33±0,58a
T5 (4000 kg de dolomie)	2,33±0,58a	2,67±0,58a	1,67±0,58a
T6 (5000 kg de dolomie)	1,00±1,00a	2,33±0,58a	1,00±1,00a

3.2.2.5 Nombre de graines par pot

L'analyse de la variance à un critère (ANOVA 1) appliquée au nombre de gousses par plant ne montre pas de différences significatives entre les traitements au seuil de 5 % de probabilité ($p > 0,05$). Il en découle qu'on observe un seul groupe de moyennes homogènes, autant pour la première, la deuxième que la troisième récolte (Tableau 21).

Cependant, quelques traitements sortent du lot. C'est ainsi que les traitements T2 (1.000 kg/ha de dolomie) et T1 (FOMI Imbura + Fumier de vache) montrent les plus grands nombres de graines par pot pour la première récolte. Il en est de même pour les traitements T3 (2.000 kg/ha de dolomie), T2 (1.000 kg/ha) et T4 (4.000 kg/ha de dolomie) pour la deuxième récolte et encore T2 (1.000 kg/ha) pour la troisième récolte.

Tableau 21. Nombre de graines par pot

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	7,00±5,00a	15,67±4,51a	6,33±0,58a
T1 (0 kg de dolomie)	14,00±3,00a	14,67±3,51a	4,33±0,58a
T2 (1000 kg de dolomie)	15,33±2,08a	20,67±11,59a	9,67±2,08a
T3 (2000 kg de dolomie)	12,00±6,00a	22,33±11,68a	5,00±1,00a
T4 (3000 kg de dolomie)	9,67±2,89a	20,67±10,78a	7,00±6,56a
T5 (4000 kg de dolomie)	13,00±2,00a	16,00±1,00a	6,33±4,04a
T6 (5000 kg de dolomie)	6,00±7,81a	13,00±3,60a	2,67±2,52a

3.2.2.6 Nombre de graines par gousse

L'analyse de la variance à un seul critère au seuil de 5 % de probabilité ne montre pas d'effet des traitements sur le nombre de gousses par plant (Tableau 22). Pour la première récolte, ce sont les traitements T1 (Imbura + Fumier de vache), T2 (1.000 kg/ha de dolomie) et T5 (4.000 kg/ha de dolomie) qui montrent les normes les plus élevés de graines par gousse. De l'autre côté, la deuxième récolte enregistre les plus grands nombres de graines par gousse avec les traitements T2 (1.000 kg/ha de dolomie), T3 (2.000 kg/ha de dolomie), T4 (3.000 kg/ha de dolomie) et T5 (4.000 kg/ha de dolomie), alors que pour la troisième récolte, le nombre le plus élevé de graines par gousse est obtenu avec le traitement T2 (1.000 kg de dolomie).

Tableau 22. Nombre de graines par gousse

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	1,33±0,58a	2,33±0,58a	2,00±0,00a
T1 (0 kg de dolomie)	2,00±0,00a	2,33±0,58a	1,67±1,15a
T2 (1000 kg de dolomie)	2,00±0,00a	2,67±0,58a	2,33±0,58a
T3 (2000 kg de dolomie)	1,67±0,58a	2,67±0,58a	1,33±0,58a
T4 (3000 kg de dolomie)	1,67±0,58a	2,67±0,58a	1,33±1,15a

T5 (4000 kg de dolomie)	2,00±0,00a	2,67±0,58a	1,33±0,58a
T6 (5000 kg de dolomie)	1,67±1,15a	2,33±0,58a	0,67±0,58a

3.2.2.7 Poids de mille graines

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour aucune des trois récoltes quant au poids de mille graines de haricot (Tableau 23).

En valeur absolue, à la première récolte, le traitement T3 (2.000 kg/ha) a donné le poids de mille graines le plus élevé, tandis qu'à la deuxième, deux traitements se démarquent du lot, à savoir T6 (5.000 kg/ha de dolomie) et T4 (3.000 kg/ha de dolomie). A la troisième récolte, la supériorité numérique du traitement T6 (5.000 kg/ha de dolomie) reste, avec le traitement T2 (1.000 kg/ha de dolomie) en deuxième position. La tendance croissante entre la première récolte et la deuxième récolte, de même que la tendance décroissante entre cette dernière et la troisième récolte persistent. De manière globale, les poids de mille graines de haricot varient du simple au double et même au triple entre la troisième récolte et les deux autres.

Tableau 23. Poids de mille graines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	98,04±34,28a	288,22±38,7a	93,65±20,74a
T1 (0 kg de dolomie)	103,73±18,14a	254,72±81,63a	108,28±24,46a
T2 (1000 kg de dolomie)	95,02±17,08 a	280,48±55,57a	134,18±14,26a
T3 (2000 kg de dolomie)	143,68±54,26a	311,23±50,27a	110,06±35,14a
T4 (3000 kg de dolomie)	97,42±37,95a	347,00±63,22a	119,71±51,01a
T5 (4000 kg de dolomie)	97,73±27,49a	298,17±93,93a	102,02±47,14a
T6 (5000 kg de dolomie)	130,39±31,6a	367,59±20,19a	151,71±172,8a

3.2.2.8 Biomasse totale de haricot

Comme pour le paramètre « Production en graines » de haricot, l'analyse de la variance (ANOVA 1) appliquée au paramètre « Biomasse totale » du haricot n'a pas pu démontrer l'effet des traitements (Tableau 24) au seuil de 5 % de probabilité ($p < 5 \%$). De ce fait, un seul groupe de moyennes homogènes a pu être dégagé. Ce classement place quantitativement le traitement T3 (2.000 kg/ha de dolomie) en tête, suivi de très près par le traitement T5 (4.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 24. Biomasse totale du haricot

Traitement	Moyenne en g/ Traitement
T0 (0 kg de dolomie)	14,12±5,07a
T1 (0 kg de dolomie)	11,41±3,27a
T2 (1000 kg de dolomie)	15,85±5,63a
T3 (2000 kg de dolomie)	16,65±5,23a
T4 (3000 kg de dolomie)	15,38±2,47a
T5 (4000 kg de dolomie)	16,61±1,32a
T6 (5000 kg de dolomie)	16,13±2,26a

3.2.2.9 Production en graines du haricot

L'analyse de la variance (ANOVA 1) appliquée au paramètre « Production en graines » du haricot n'a pas pu démontrer l'effet des traitements au seuil de 5 % de probabilité ($p < 5 \%$). Par conséquent, le classement des moyennes regroupe celles-ci dans un seul groupe de moyennes homogènes (Tableau 25). Malgré l'absence de différences statistiques entre les traitements testés, l'analyse basée sur les valeurs absolues relève que c'est le traitement T3 (2.000 kg/ha de dolomie) suivi des traitements T2 (1.000 kg/ha de dolomie) et T4 (3.000 kg/ha de dolomie) qui se démarquent des autres traitements en termes de poids total en graines de haricot, cumulé sur trois récoltes.

Tableau 25 : Production en graines de haricot

Traitement	Moyenne en g/Traitement
T0 (0 kg de dolomie)	5,75±0,36a
T1 (0 kg de dolomie)	5,70±1,37a
T2 (1000 kg de dolomie)	8,67±4,13a
T3 (2000 kg de dolomie)	9,01±3,59a
T4 (3000 kg de dolomie)	8,68±1,41a
T5 (4000 kg de dolomie)	6,75±1,85a
T6 (5000 kg de dolomie)	6,17±2,59a

3.2.3. Paramètres de croissance et de rendement du haricot cultivé en pots sur le sol de Muruta (pH=4,6)

3.2.3.1 Hauteur moyenne (cm) des tiges

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la deuxième et la troisième récolte quant à la hauteur moyenne des plants de haricot (Tableau 26). En conséquence, le classement des moyennes ne montre qu'un seul groupe de moyennes homogènes pour ces deux récoltes. Malgré cette absence de différences statistiques entre les hauteurs moyennes, certaines tendances se dessinent en termes de valeurs absolues. C'est ainsi que les traitements T4 (1.500 kg/ha de dolomie) suivi du traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) se démaquent des autres traitements pour la deuxième récolte. Pour la troisième récolte, c'est le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) qui se place au-dessus du lot.

Le classement des hauteurs moyennes des tiges de haricot pour la deuxième récolte montre deux groupes de moyennes chevauchants, avec à la tête les traitements T6 (1.250 kg/ha de dolomie), suivi des traitements T4 (750 kg/ha de dolomie) et T5 (1.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 26. Hauteur moyenne (cm) des tiges

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	11,30±1,00b	21,87±4,56a	17,07±4,96a
T1 (0 kg de dolomie)	15,33±2,52ab	23,17±5,69a	15,50±2,53a
T2 (500 kg de dolomie)	19,27±1,96b	23,73±5,52a	17,53±1,28a
T3 (1000 kg de dolomie)	16,53±0,95ab	23,87±5,39a	18,40±1,59a
T4 (1500 kg de dolomie)	16,53±2,36ab	32,53±8,20a	18,20±1,15a
T5 (2000 kg de dolomie)	14,70±2,86ab	27,10±4,29a	18,20±4,85a
T6 (2500 kg de dolomie)	16,77±0,68a	30,53±2,16a	22,00±4,36a

Contrairement aux deux dernières récoltes, l'analyse de la variance à un seul critère (ANOVA 1) montre des différences significatives ($p < 0,05$) entre les traitements testés. En conséquence, le classement des moyennes indique l'existence de deux groupes de moyennes homogènes chevauchants. En tête du classement se trouve le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie), le bas du classement revenant au traitement T0 (Témoin intégral).

Les 5 autres traitements se trouvent en position intermédiaire entre les deux traitements extrêmes, sans en être statistiquement différents.

3.2.3.2 Longueur moyenne (cm) des racines

L'analyse de la variance appliquée au paramètre longueur moyenne des racines n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la deuxième récolte (Tableau 27). De la sorte, pour cette dernière récolte, le classement des moyennes a donné lieu à un seul groupe de moyennes homogènes, qui place néanmoins le traitement T4 (1.500 kg/ha de dolomie), suivis du traitement T6 (2.500 kg/ha) et du traitement T2 (500 kg/ha de dolomie).

Tableau 27. Longueur moyenne (cm) des racines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	4,50±0,17b	13,20±1,01a	9,30±1,70ab
T1 (0 kg de dolomie)	5,37±1,41ab	13,40±0,72a	9,53±0,80ab
T2 (500 kg de dolomie)	6,50±1,32ab	14,97±2,90a	10,73±0,75ab
T3 (1000 kg de dolomie)	6,10±0,53ab	12,73±0,98a	9,97±1,23ab
T4 (1500 kg de dolomie)	5,63±0,85ab	17,63±2,17a	11,53±1,86a
T5 (2000 kg de dolomie)	5,33±0,58ab	13,40±1,15a	6,97±1,65b
T6 (2500 kg de dolomie)	7,50±0,85a	15,43±4,37a	11,60±2,00a

Par contre, l'analyse de la variance effectuée sur le paramètre longueur moyenne des racines pour la première et la troisième récolte a montré des différences significatives entre les traitements testés ($p < 0,05$).

Pour la première récolte, le classement des moyennes montre l'existence de deux groupes de moyennes qui se chevauchent, avec en tête le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) et, en bas du classement le traitement T0 (Témoin intégral). Les autres traitements occupent une position intermédiaire entre les sans en être significativement différents.

S'agissant de la troisième récolte, le classement des moyennes indique aussi deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le groupe de tête est constitué par les traitements T6 (2.500 kg/ha de dolomie) et le traitement T4 (1.500 kg/ha de dolomie), avec en bas du classement le traitement T5 (2.000 kg/ha de dolomie). Les autres traitements occupent une position intermédiaire entre les sans en être significativement différents.

3.2.3.3 Nombre de gousses par pot

L'analyse statistique appliquée au paramètre nombre de gousses par pot n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour les deux dernières récoltes (Tableau 28). Ainsi, autant pour la deuxième que la troisième récolte, les moyennes du nombre de gousses de haricot par pot sont classées dans un seul et même groupe.

Mais au-delà des statistiques, et en considérant les valeurs absolues, le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) suivis des traitements T4 (1.500 kg/ha) et T3 (1.000 kg/ha de dolomie) se démarquent des autres traitements pour la deuxième récolte. Pour la troisième récolte, c'est le T6 (2.500 kg/ha de dolomie) qui sort du lot.

Tableau 28. Nombre de gousses par pot

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	1,67±2,08ab	4,67±1,53a	3,00±2,00a
T1 (0 kg de dolomie)	3,67±0,58ab	3,67±1,53a	3,00±0,00a
T2 (500 kg de dolomie)	1,67±1,53ab	4,67±0,58a	2,67±0,58a
T3 (1000 kg de dolomie)	2,67±2,08ab	6,00±2,64a	3,00±0,00a
T4 (1500 kg de dolomie)	5,00±1,00a	6,33±2,52a	3,00±0,00a
T5 (2000 kg de dolomie)	1,00±1,00b	5,67±1,53a	3,33±1,53a
T6 (2500 kg de dolomie)	2,67±0,58ab	8,33±4,93a	4,00±3,46a

3.2.3.4 Nombre de gousses par plant

L'analyse de la variance à un seul critère au seuil de 5 % de probabilité ne montre pas d'effet des traitements sur le nombre de gousses par plant (Tableau 29) pour toutes les trois récoltes.

Au-delà des comparaisons statistiques, les traitements T4 (1.500 kg/ha de dolomie) suivis des traitements T3 (1.000 kg/ha de dolomie) et T1 (Imbura + Fumier de vache) se démarquent des autres traitements pour la première récolte. Pour la deuxième récolte, la plus grande valeur en nombre de gousses par plant est observée avec le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie). Il en est de même pour la troisième récolte où ce traitement est équivalent au traitement T5 (2.000 kg/ha).

Tableau 29. Nombre de gousses par plan

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	0,33±0,58a	1,67±0,58a	1,33±1,15a
T1 (0 kg de dolomie)	1,33±0,58a	1,33±0,58a	1,00±0,00a
T2 (500 kg de dolomie)	1,00±1,00a	1,67±0,58a	1,00±0,00a
T3 (1000 kg de dolomie)	1,33±0,58a	2,00±1,00a	1,00±0,00a
T4 (1500 kg de dolomie)	1,67±0,58a	2,00±1,00a	1,00±0,00a
T5 (2000 kg de dolomie)	0,67±0,58a	1,67±0,58a	1,67±1,15a
T6 (2500 kg de dolomie)	1,00±0,00a	3,00±1,73a	1,67±1,15a

3.2.3.5 Nombre de graines par pot

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour la deuxième récolte et la troisième récolte (Tableau 30). De ce fait, toutes les moyennes du nombre de graines de haricot par pot correspondantes à ces deux récoltes sont classées dans le même groupe de moyennes homogènes. Il n'en ressort pas moins que c'est le traitement T4 (1.500 kg/ha de dolomie) qui enregistre les plus grands nombres de graines de haricot par pot, suivis des traitements T3 (1.000 kg/ha de dolomie) et T5 (2.000 kg/ha de dolomie).

Par contre, à la troisième récolte, ce sont les traitements avec les plus grandes doses de dolomie qui sont en tête, à commencer par le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) suivi du traitement T5 (2.000 kg/ha).

Le seul effet des traitements sur le nombre de graines par pot a été observé pour la première récolte ($p < 0,05$). Le classement des moyennes issu de l'analyse de variance place le traitement T4 (1.500 kg/ha de dolomie) tout en haut, avec des valeurs nulles, presque nulles ou très faibles pour les autres traitements.

Tableau 30. Nombre de graines par pot

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00b	9,00±2,64a	4,00±3,00a
T1 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00b	8,00±3,46a	3,67±1,15a
T2 (500 kg de dolomie)	2,00±2,00ab	9,00±1,00a	5,33±1,15a
T3 (1000 kg de dolomie)	0,00±0,00b	14,00±9,85a	4,67±1,53a
T4 (1500 kg de dolomie)	6,00±4,00a	15,00±9,85a	5,00±1,00a
T5 (2000 kg de dolomie)	1,33±2,31ab	13,67±3,78a	7,33±4,16a
T6 (2500 kg de dolomie)	0,00±0,00b	0,00±0,00a	9,00±9,54a

3.2.3.6 Nombre de graines par gousse

L'analyse de la variance au seul critère traitement au seuil de 5 % de probabilité ne montre pas d'effet des traitements sur le nombre de graines par gousse pour toutes les deux premières récoltes (Tableau 31). Pour la première récolte, c'est le traitement T4 (1.500 kg/ha) qui est caractérisé par le plus grand nombre de graines par gousse. De l'autre côté, la deuxième récolte montre que c'est le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) qui se place en tête des traitements restés.

A l'opposé des deux premières récoltes, l'analyse de la variance indique l'existence de deux groupes de moyennes chevauchants, avec au bas du classement le traitement T0 (Témoin intégral) et en tête le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) suivis à distance par les traitements T5 (2.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 31. Nombre de graines par gousse

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00a	1,67±0,58a	1,00±0,00b
T1 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00a	2,33±0,58a	1,33±0,58ab

T2 (500 kg de dolomie)	0,67±0,58a	2,33±0,58a	2,00±0,00ab
T3 (1000 kg de dolomie)	0,00±0,00a	2,33±1,15a	1,67±0,58ab
T4 (1500 kg de dolomie)	1,33±0,58a	2,33±0,58a	1,67±0,58ab
T5 (2000 kg de dolomie)	0,67±1,15a	2,67±0,58a	2,00±0,00ab
T6 (2500 kg de dolomie)	0,00±0,00a	3,00±1,00a	2,33±0,58a

3.2.3.7 Poids de mille graines

L'analyse statistique n'a pas montré de différences significatives entre les traitements au seuil de probabilité de 5 % pour aucune des trois récoltes quant au poids de mille graines de haricot (Tableau 32).

Tableau 32. Poids de mille graines

Traitement	Récolte 1	Récolte 2	Récolte 3
T0 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00a	279,46±142,19a	93,32±66,14a
T1 (0 kg de dolomie)	0,00±0,00a	203,53±41,67a	58,51±13,94a
T2 (500 kg de dolomie)	88,42±86,68a	184,19±11,31a	86,47±10,92a
T3 (1000 kg de dolomie)	0,00±0,00a	181,10±83,60a	77,06±27,11a
T4 (1500 kg de dolomie)	59,40±51,59a	265,6±131,75a	63,08±18,97a
T5 (2000 kg de dolomie)	56,17±97,28a	264,37±61,9a	90,97±17,80a
T6 (2500 kg de dolomie)	0,00±0,00a	322,71±42,7a	110,53±100,78a

En absence de différences significatives entre les traitements testés quant au poids de mille graines pour les trois récoltes, le traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomite) pour la première récolte, T4 (750 kg/ha de dolomite) et T6 (1.250 kg/ha de dolomite) pour la deuxième récolte et T5 et T3 (500 kg/ha de dolomite) pour la troisième récolte sont caractérisées quantitativement (et pas statistiquement) par les poids de mille graines les plus élevés.

3.2.3.8. Biomasse totale de haricot

Comme pour le paramètre « Production en graines » de haricot, l'analyse de la variance (ANOVA 1) appliquée au paramètre « Biomasse totale » du haricot n'a pas pu démontrer l'effet des traitements au seuil de 5 % de probabilité ($p < 5\%$). De ce fait, un seul groupe de moyennes homogènes a pu être dégagé (Tableau 33). Ce classement place quantitativement le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) en tête, suivi de loin par le traitement T4 (2.000 kg/ha de dolomie) et dans une moindre mesure T2 (500 kg/ha de dolomie).

Tableau 33. Biomasse totale du haricot

Traitement	Moyenne en g/traitement
T0 (0 kg de dolomie)	8,68±1,78a
T1 (0 kg de dolomie)	8,80±0,91a
T2 (500 kg de dolomie)	10,73±2,65a
T3 (1000 kg de dolomie)	9,41±3,27a
T4 (1500 kg de dolomie)	12,12±3,91a
T5 (2000 kg de dolomie)	10,10±2,56a
T6 (2500 kg de dolomie)	18,38±18,38a

3.2.3.9 Production en graines du haricot

L'analyse de la variance (ANOVA 1) appliquée au paramètre « Production en graines » du haricot n'a pas pu démontrer l'effet des traitements au seuil de 5 % de probabilité ($p < 5\%$) dans le cas su sol de Muruta. Par conséquent, le classement des moyennes regroupe celles-ci dans un seul groupe de moyennes homogènes.

Malgré l'absence de différence statistique entre les traitements testés (Tableau 34), l'analyse basée sur les valeurs absolues relève que c'est le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie) qui donne lieu au plus à la plus grande production en graines par traitement. Cette production est deux fois plus élevée que les traitements suivants, à savoir T4 (1.500 kg/ha de dolomie) et T5 (2.000 kg/ha de dolomie).

Tableau 34. Poids total en graines de haricot

Traitement	Moyenne en g/traitement
T0 (0 kg de dolomie)	3,00±1,80a
T1 (0 kg de dolomie)	1,88±0,90a
T2 (500 kg de dolomie)	2,40±0,41a
T3 (1000 kg de dolomie)	3,46±3,43a
T4 (1500 kg de dolomie)	5,39±4,82a
T5 (2000 kg de dolomie)	4,60±2,55a
T6 (2500 kg de dolomie)	10,70±7,54a

3.3. Effets de la dolomie et du fumier de vache sur le pH

A la conclusion des essais, après la troisième récolte, les échantillons de sols ont été analysés pour le pHeau. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau condensé ci-après (Tableau 35).

Tableau 35. Effet des traitements sur le pHeau

Traitement	Gashikanwa	Muruta	Zege
T0 (0 kg de dolomie)	5,99±0,60a	6,13±0,56a	5,70±0,45b
T1 (0 kg de dolomie)	6,27±0,18a	6,19±0,56a	6,00±0,47ab
T2 (500 kg de dolomie)	6,21±0,24a	6,12±0,51a	6,14±0,36ab
T3 (1000 kg de dolomie)	6,17±0,26a	6,17±0,47a	6,25±0,47ab
T4 (1500 kg de dolomie)	6,14±0,43a	6,00±0,64a	6,35±0,30a
T5 (2000 kg de dolomie)	6,15±0,34a	6,18±0,61a	6,41±0,48a
T6 (2500 kg de dolomie)	6,02±0,37a	6,16±0,57a	6,53±0,42a

Assez étonnant, l'analyse de la variance appliquée au paramètre pH n'a pas montré d'effet des traitements pour le sol de Gashikanwa et de Muruta. L'effet dose d'application de la dolomie n'a pas été apparent. Le classement des moyennes aboutit chaque fois à un seul groupe de moyennes homogènes ne montrant aucune tendance notable.

En effet, les pH mesurés tournent autour de 6 pour tous les traitements, y compris les traitements témoins. Cette situation est sujette à caution et nécessite une plus grande justification que nous n'arrivons pas à fournir ici pour le moment. Une erreur analytique ? Une probable contamination croisée ?

Par contre, pour le sol de Zege, l'analyse de la variance montre un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du facteur traitement. Ainsi, le classement des moyennes relève deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent. Le groupe de tête est constitué des traitements T6, T5 et T4 (qui ne sont pas significativement différents entre eux). Le groupe en bas du classement est constitué par le traitement T0 (témoin intégral), qui est significativement inférieur aux trois traitements précités. Entre les deux extrêmes se situent les autres traitements qui ne sont pas significativement différents entre eux et entre les quatre autres traitements. Sur ce sol de Zege, le seul à montrer des résultats quelque peu cohérents et probants quant au pH, on peut noter un minime effet dose, du fait que l'on note de légers accroissements de pH (moins de 0,15) avec l'augmentation de doses d'application de dolomie.

4. DISCUSSION DES RESULTATS

Le dispositif en pots utilisé dans les trois expérimentations sur les sols de Gashikanwa, Zege et Muruta consistait à évaluer l'effet de doses croissantes de dolomie sur les paramètres de croissance et de production en grains du haricot, prise comme plante test. Le haricot est considéré comme une culture très sensible à l'acidité et répond très bien à sa correction par application de la dolomie. Outre la production en graines par pot, les paramètres mesurés étaient les suivants : biomasse, nombre de gousses par pot, nombre de graines par pot, nombre de gousses par plant, nombre de graines par gousse, poids de 1000 graines, hauteur des tiges et longueur des racines.

En se limitant aux 7 principaux paramètres que sont la production en graines par pot, la biomasse totale, le nombre de gousses par pot, le nombre de graines par pot, le nombre de gousses par plant, le nombre de graines par gousse et le poids de 1000 graines, nous pouvons générer le tableau 36 ci-après. Celui-ci relève les traitements qui ont été les meilleurs vis-à-vis des paramètres précités.

Tableau 36. Synthèse des meilleurs traitements sur les sols de Gashikanwa, Zege et Muruta

Paramètre	Gashikanwa (pH=5,3)	Sol de Zege (pH=4,9)	Sol de Muruta (pH=4,6)
Nombre de gousses/pot	T4, T5	T2	T6
Nombre de gousses/plant	T5, T4	T2	T6
Nombre de graines/pot	T4	T2	T6
Nombre de graines/gousse	T4	T2	T6
Poids de 1000 graines	T5	T6	T6
Biomasse totale (g/pot)	T4	T2, T3	T6
Production en graines (g/pot)	T4, T5, T2	T3, T4, T2	T6, T4, T5

Pour rappel, les doses d'application de dolomie sur les trois sols étaient croissantes suivant une progression arithmétique de raison de 0,25 T (250 kg) pour le sol de Gashikanwa, 0,5 T (500 kg) pour le sol de Muruta et 1 T (1.000 kg) pour le sol de Zege. Pour ce dernier sol, les doses testées variaient de 0 à 5 T/ha. Les doses d'application de dolomie variaient de 0 à 2,5 T/ha pour le sol de Muruta et de 0 à 1,25 T/ha pour le sol de Gashikanwa.

De l'analyse du tableau 36, on remarque qu'avec le sol de Gashikanwa, le traitement T4 (750 kg/ha de dolomie) apparaît plus fréquemment que le traitement T5 (1.000 kg/ha de dolomie) comme le traitement donnant le meilleur résultat, pour les paramètres de croissance et de production en grains du haricot.

La même approche analytique centrée sur le sol Zege relève une plus grande fréquence pour le traitement T2 (1.000 kg/ha de dolomie). Au site de Muruta, c'est le traitement T6 (2.500 kg/ha de dolomie). (Yamoah, et al., 1990) ont proposé au Rwanda une formule rapide de calcul de la dolomie nécessaire pour corriger les sols acides, dans un intervalle de pH bien précis ($\text{pH} < 5,5$). Cette formule est libellée comme suit :

Besoin en chaux/dolomie (T/ha) = $16-2,87 \text{ pH}$

La formule de Yamoah et al. (1990) appliquée au sol de Gashikanwa ($\text{pH}=5,3$) aboutit à une dose de dolomie proposée correspondant à 789 kg/ha de dolomie. Pour le sol de Zege ($\text{pH}=4,9$), la même formule donne des besoins en chaux/dolomie équivalents à 1,9 T/ha de dolomie. Ces besoins deviennent 2,8 T/ha pour le sol de Muruta ($\text{pH} = 4,6$).

Les résultats expérimentaux rapportés dans cette étude sont proches de ceux obtenus avec la formule de Yamoah et al. (1990). De ce fait, la formule de Yamoah et al. (1990) constitue une bonne approximation rapide et économique des besoins en chaux/dolomie.

La particularité des expérimentations rapportées dans cette étude est la combinaison de la dolomie à différentes doses suivant les sols étudiés, les fertilisants organo-minéraux FOMI (Imbura) et la matière organique constituée par le fumier de vache. L'acidité du sol est causée par plusieurs processus qui ont été décrits dans les paragraphes introductifs. Dans la majorité des sols du Burundi, particulièrement ceux des plateaux et hautes collines, l'acidité des sols est contrôlée par l'Al échangeable. Celui-ci peut être neutralisé par la dolomie et la matière organique, soit sous forme de fumiers ou composts, soit par l'utilisation de fertilisants organo-minéraux contenant la matière organique et les cations basiques, comme le Ca et le Mg. A cette dernière catégorie appartiennent les fertilisants organo-minéraux produits par l'Usine FOMI : Imbura ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO} : 9-22-4-13-2$) ; Bagara ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO} : 11-0-22-4-2$) et Totahaza ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO} : 21-0-8-4-2$).

De manière générale, l'action de neutralisation de l'Al échangeable par la matière organique est plus faible à court terme, mais elle se prolongerait dans le temps (Kaboneka et al., 2020); (Bizimana, 2003) ; (Nimubona, 2005). Sa combinaison avec la dolomie donnerait de meilleurs résultats à long terme (effet résiduel).

En effet, la combinaison de la chaux et de la matière organique a été utilisée pour la correction de l'acidité et la toxicité aluminique par certains chercheurs. A titre d'exemple, dans leur expérience effectuée à Kajondi dans la région naturelle du Bututsi, (Mathieu & Bruyère, 1987) ont relevé que la combinaison de 4 T de fumier de vache

et 2 T de calcaire équivaldrait à 7 T de fumier appliqué seul à l'hectare. Autrement dit, la combinaison des deux amendements (minéraux et organiques) réduirait les quantités de fumier à utiliser.

Les rôles des amendements calcaires tout comme la dolomie dans la restauration du complexe absorbant des sols acides en bases et dans l'élimination de la toxicité aluminique des sols sont connus (Hicintuka & Masilya ; 2013).

De même que dans l'amélioration de la structure du sol et dans la disponibilisation des éléments (Ca et Mg) aux plantes (FAO, 1987); (Minani, D. et al., 1992); (Schlecht et al., 2006).

Ces éléments avaient conduit l'ISABU à proposer le chaulage des terres sur plus de 90 % de la superficie du Burundi (Landa, 1988). Cependant, les résultats de cette étude tout comme d'autres obtenus auparavant montrent en effet que l'augmentation des doses de dolomie n'influence pas les rendements aussi bien en graines qu'en fanes de haricot dans les trois sites étudiés.

Ce résultat rejoint les conclusions de certains auteurs (Uehara & Keng, 1975) et des agronomes des années 60 qui indiquent que le chaulage de certains sols tropicaux acides spécialement les sols ferrallitiques comme ceux du Burundi (Sottiaux et al., 1985) ne serait pas du tout bénéfique.

En effet, le chaulage de tels sols peut entre autres modifier la structure du sol soit par une floculation, soit par une dispersion avec la modification des charges superficielles avec comme conséquence l'apparition des effets dépressifs des fortes doses de calcaire sur les rendements (Landa, 1983).

Cet auteur mentionne que ces doses élevées provoquent une mauvaise solubilisation des oligo-éléments comme le Zn, B et Cu et dérèglent le rapport (Ca+Mg)/K. Ceci expliquerait la non-existence des différences des rendements aux doses élevées et faibles en dolomie observées au cours de cette étude. Toutefois, nous n'avons pas analysé les concentrations des oligo-éléments dans les sols amendés ; ce qui constituerait une meilleure piste de recherche pour découvrir la cause exacte de manque d'effet des doses élevées de calcaire sur le rendement, alors que la dose la plus élevée qu'il avait utilisée était de 750 kg de calcaire/ha de loin inférieure aux doses fortes pouvant atteindre même 4 tonnes de calcaire/ha pour corriger les pH des sols alumino-toxiques (Ntiburumusi, 1989 ; Gillet & Scaglia, 1992). C'est une intéressante voie de recherche que de suivre la dynamique des oligoéléments (microéléments) au cours du processus de chaulage.

Dès lors, cet essai devrait être répété dans d'autres sites au sol acide au Burundi pour arriver à établir une carte des doses minimales nécessaires de dolomie à appliquer dans chaque site pour y corriger le pH acide en améliorant le rendement agricole. Il s'agit de promouvoir la démarche de recherche-action participative. Ainsi, à travers des expérimentations participatives à large échelle, les agriculteurs peuvent, au vu des résultats concrets, s'impliquer massivement dans le processus de gestion de la fertilité des sols et d'amélioration de la production agricole sur des petites superficies. Aussi, ces doses devraient être testées sur d'autres cultures communes telles la culture de la pomme de terre.

En examinant tous les résultats obtenus pour toutes les variables mesurées et pour tous les trois sols utilisés, nous remarquons qu'il n'y a pas de différence significative entre T0 (0 kg de dolomie sans fumure organique ni engrais organo-minéral) et T1 (0 kg de dolomie avec fumier de vache et engrais organo-minéral). L'application du seul fumier de vache et du fertilisant FOMI-Imbura sans dolomie sur les sols acides est une perte de temps et de moyens.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude sur la détermination de la dose optimale de chaux dolomitique pour la correction de l'acidité des sols d'altitude du Burundi a révélé des résultats probants. A travers cette étude, il a été établi que les quantités optimales de dolomie à recommander varient selon les types de sols et leurs niveaux de pH. Pour le sol de Gashikanwa (pH=5,33), une dose de 750 kg/ha s'est révélée efficace, tandis que pour les sols de Zege (pH=4,9) et de Muruta (pH=4,6), des doses de 2 T/ha et 2,5 T/ha respectivement ont été nécessaires. Intéressant, l'application de la formule de Yamoah sur les trois sols testés aboutit à des doses de dolomie très proches des doses expérimentalement obtenues dans cette étude. De ce fait, la formule de Yamoah peut être considérée comme une bonne alternative rapide à la détermination en champ des doses d'application de dolomie sur des sols à pH < 5,5. Cette étude a également établi que l'application de la dolomie sur les sols acides est crucial en démontrant que l'application combinée du fumier de vache et de l'engrais FOMI-imbura en ignorant la dolomie n'aboutit pas aux résultats significativement différents de ceux du témoin intégral (sans aucun amendement ni fertilisant).

Les résultats obtenus dans cette étude soulignent l'importance d'adapter les pratiques de fertilisation aux caractéristiques spécifiques des sols afin d'optimiser la productivité agricole. Enfin, la présente pièce de recherche met en lumière la nécessité de sensibiliser les agriculteurs à l'importance de l'analyse des sols et à l'utilisation d'amendements appropriés pour restaurer la fertilité des terres cultivées. Des recommandations pratiques découlent de cette étude, visant à améliorer la gestion des sols et à soutenir le développement durable de l'agriculture au Burundi.

Voici quelques suggestions pour compléter les acquis de cette étude :

1. Élargir la recherche sur d'autres cultures: Investiguer l'impact de la chaux dolomitique sur d'autres types de cultures pour déterminer si les résultats obtenus avec le haricot se vérifient également avec d'autres espèces.
2. Études à long terme: Mener des études à plus long terme pour évaluer l'effet durable de l'application de la chaux dolomitique sur la santé du sol et la productivité des cultures, en tenant compte des variations saisonnières et en suivant la dynamique des microéléments (Cu, B, Zn).
3. Analyse des sols variés: Effectuer des analyses similaires sur différents types de sols au Burundi pour mieux comprendre comment la chaux dolomitique peut être utilisée pour différents contextes pédologiques.
4. Sensibilisation des agriculteurs: Mettre en place des programmes de sensibilisation pour informer les agriculteurs sur l'importance de l'analyse de sol et l'application de la chaux dolomitique pour améliorer la fertilité des sols.
5. Amendements combinés: Explorer l'efficacité de l'association de la chaux dolomitique avec d'autres amendements organiques ou minéraux pour maximiser les rendements et la santé des sols.
6. Suivi des pratiques agricoles: Établir un suivi et une évaluation des pratiques agricoles dans les exploitations qui appliquent la chaux dolomitique pour recueillir des données empiriques sur les résultats.
7. Collaboration interdisciplinaire: Encourager la collaboration entre agronomes, écologues et économistes pour développer des recommandations de gestion intégrées qui prennent en compte les aspects environnementaux et économiques.

Ces suggestions visent à renforcer les résultats de l'étude et à contribuer à une agriculture durable au Burundi.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Adejobi, K. B., Akanbi, O. S., Ugioro, O., Adeosun, S. A., Mohammed, I., Nduka, B. A., Adeniyi, D. O. 2014. Comparative effects of NPK fertilizer, cowpea pod husk and some tree crops wastes on soil, leaf chemical properties and growth performance of cocoa (*Theobroma cacao* L.). *African Journal of Plant Science*, 8(2): 103-107.
2. Aitken, R. L. 1992. Relationships between extractable Al, selected soil properties, pH buffer capacity and lime requirement in some acidic Queensland soils. *Soil Research*, 30(2): 119-130.
3. Aitken, R. L., Moody, P.W., & Mckinley, P.G. 1990. Lime requirement of acidic Queensland soils. I. Relationships between soil properties and pH buffer capacity. *Soil Research*, 28(5): 695-701.
4. Bacanamwo, M. E. Ruffyikiri. 1987. Etude des amendements calco-magnésiens dans la fertilisation des sols acides. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 149 p.
5. Birachi, E. A., Ochieng, J., Wozemba, D., Ruraduma, C., Niyuhire, M. C., & Ochieng, D. 2011. Factors influencing smallholder farmers' bean production and supply to market in Burundi. *African Crop Science Journal*, 9 p.
6. Bizimana, S. 2003. Effets comparatifs des amendements organiques et calcaires sur la réduction de l'Aluminium échangeable dans deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire, U.B., FACAGRO. Bujumbura. 136 p.
7. Bourrié, G., & Arousseau, P. 1987. pH et besoin en chaux, Colloque AFES, CEC et fertilisation des sols agricoles. Caen, 19, 155-173.
8. Burundi Eco. 2020. L'agriculture, moteur de croissance économique ? Dossier pédagogique réalisé par Bonaparte Sengabo, Chanelle Irabaruta, Benjamin Kuriyo et Charles Gahungu. Mise en page par JD Mugisha.
9. Cochrane, T.T, J.G. Salinas, & P.A. Sanchez. 1989. « An equation for liming acid mineral soils to compensate for crop tolerance ». *Trop. Agric. (Trinidad)* 57 : 133-140.
10. Dabin, B. 1985. Les sols tropicaux acides. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. Vol. XXI (1), pp. 7-19.
11. De Keyser, S. 1991. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de leur correction. Séminaire National sur la Fertilisation des Sols du Burundi. Bujumbura, 10-12 Décembre 1991. P. 46-80.
12. FAO. 1987. Guide sur les engrais et la nutrition des plantes. Rome. 190 p.
13. Gentiane. 1995. Impacts de l'inoculation du haricot vert nain avec des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote sur le fonctionnement microbien du sol de culture. 81 p.
14. Gillet, Y. & Scaglia, J.A. 1992. Les sols acides au Rwanda. Atelier International. IBSRAM/ISABU/FACAGRO, Bujumbura, Burundi. 47p.
15. Harter, P. R. D. 2007. Les sols acides des tropiques. Université du New Hampshire. 12 p.
16. Hassett, J.J. & W.L. Banwart. 1992. Soils and their environment. Prentice Hall. New Jersey. 424 p.
17. 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, Article Hors-série 17.
18. Hue, N.V, Graddock, G. R., Adams, F. 1986. Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 28-30.
19. Hue, N.V. 1988. Increasing soil productivity for the humid tropics through organic matter management. S.A EL-SWAIFL. Agronomy and Soil Science. Alabama. 18 p.
20. IFDC/PAGRIS. 2022. Rapport de mission : Etude de faisabilité pour le renforcement de la filière « amendement calcaire / dolomie » au Burundi. 114 p.

21. ISABU. 2018. Catalogue des variétés de haricot en diffusion au Burundi. 51 p.
22. ISABU. 2025. Catalogue des Espèces et Variétés vivrières sélectionnées par ISABU. 271 p.
23. ISABU & IFDC - PAGRIS. 2021. Cartographie de la Fertilité des Sols du Burundi et des Besoins des Principales Cultures Vivrières en Éléments Nutritifs. 191 p.
24. Jones, A., H. Breuning-Madsen, M. Brossard, A. Dampaha, J. Deckers, O. Dewitte, T. Gallali, S. Hallet, R. Jones, M. Kilasara, P. Le Roux, E. Micheli, L. Montanarella, O. Spaargaren, L. Thiombiano, E. Van Ranst, M. Yemefack, R. Zougmore, (eds). 2013. Soil Atlas of Africa. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 176 pp
25. Kaboneka, S. 2020. Acidité des sols : causes, conséquences et techniques de correction. IN atelier de réflexion sur la « Problématique de l'acidification des sols au Burundi : contexte et enjeux » organisé par le Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et environnementales (CRAVE) et le Forum des Organisations de Producteurs Agricoles du Burundi – Ijwi ry'Abarimyi. Bujumbura, Royale Palace. 24 mars 2020.
26. Kaboneka, S., A. Niyongabo, S. Nijimbere. 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. Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles. Volume 28 : 9-15.
27. Kaboneka, S. 2019. Problématique de l'acidité des sols au Burundi : aspects généraux et normes de correction. Atelier national sur la problématique d'acidité du sol et restitution des cartes d'acidité du sol des communes d'action du PAPAB. Bujumbura. 12/11/2019 (Hôtel City Hill). 30-31/12/2019 (Détente).
28. Kaboneka, S., B.T Iro Ong'or, C. Kwizera, G. Nsavyimana, D. Buzoya, N. Ntukamazina. 2019. Effects of urea and Di-Ammonium Phosphate on acidification of three Burundi representative soils. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). Volume 5(8). August 2019. Doi: 10.31695/IJASRE.2019.33119. ISSN : 2454-8006
29. Kamprath, E. J. 1970. Exchangeable Aluminum as a Criterion for Liming Leached Mineral Soils. Soil Science Society of America Journal, 34(2): 252-254.
30. Kibiriti, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin, P. Hollebodch. 1986a. Analyse des bases échangeables, de la CEC et de l'acidité échangeable. ISABU. 33 p.
31. Kibiriti, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin, P. Hollebosch. 1986b. Détermination du pH, la conductivité et l'analyse de la matière organique. ISABU. 35 p.
32. Landa, C. 1983. Vingt ans d'essais de fumure sur les cultures vivrières au Burundi (1963-1983). Publication ISABU N° 35.
33. Landa, C. 1988. Synthèse des essais de fumure réalisés au Burundi entre 1982 et 1997. ISABU.
34. Mathieu, C., Bruyère, A. 1987. Effet de la fertilisation sur les rendements du blé Romany en culture d'ouverture. Rapport annuel du Projet IBSNAT de Kajondi. FACAGRO, Bujumbura. 65 p.
35. MEEATU. 2011. Stratégie Nationale et Plan d'Action pour la lutte contre la dégradation des sols au Burundi. 90 p.
36. Mehlich, A. 1976. New buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and lime requirement of soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 7(7): 637-652.
37. Minani, D., P. Hennebert., M.H. Novak. 1992. Amélioration et rentabilisation vivrière des terres acides d'altitude. FACAGRO, Bujumbura.
38. MINEAGRIE. 2020. Document d'orientation de la politique environnementale, agricole et d'élevage. 448 p.
39. MINEAGRIE. 2022. Fiche technique de la vulgarisation agricole. 36 p
40. Motsara, M.R., R.N. Roy. 2008. Guide to Laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAP Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 204 p.

41. Ndabaneze, E. 2000. Identification des souches de *Pseudomonas syringae* pv. *Phaseolicola* et criblage pour la résistance à la bactériose à halo du haricot. 53 p.
42. Nduwimana, E. 2016b. Caractéristiques des nouvelles variétés de haricot homologuées par l'office national de contrôle et de certification des semences (ONCC) prêtes à la diffusion. 53 p.
43. Nijimbere, S., Kaboneka, S., Ndiokubwayo, S., Irakoze, W., Ndikumana, J. 2021. Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi).
44. Nimubona, L. 2005. Effet de l'application de différents fumiers et du calcaire sur la dynamique de l'Aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire, U.B., FACAGRO. Bujumbura. 168 p.
45. Ntiburumusi, F. 1989. Arrière-effet du chaulage sur la productivité d'un kaolisol humifère dans la région naturelle du Mugamba (Burundi). Publication ISABU N° 135.
46. Oates, K. M., Kamprath, E. J. 1983. Soil Acidity and Liming : I. Effect of the Extracting Solution Cation and pH on the Removal of Aluminum from Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47(4): 686-689.
47. Pionke, H. B., Corey, R. B., Schulte, E. E. 1968. Contributions of Soil Factors to Lime Requirement and Lime Requirement Tests. *Soil Science Society of America Journal*, 32(1): 113-117.
48. Razafintsalama, H. 2018. La culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans le moyen ouest du vakinankaratra : Effets d'apports de phosphore et de l'inoculation par des rhizobia.
49. Rishirumuhirwa, T., Roose, E. 1997. Effets des matières organiques et minérales sur la réhabilitation des sols acides de montagne du Burundi. 10 p.
50. Rossel, R. A. V., McBratney, A. B. 2001. A response-surface calibration model for rapid and versatile site-specific lime-requirement predictions in south-eastern Australia. *Soil Research*, 39(1): 185-201.
51. Rössel, R. A. V., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., Skjemstad, J. O. 2006. Proximal sensing of soil pH and lime requirement by mid infrared diffuse reflectance spectroscopy. 6 p.
52. Ruraduma, C., Ntukamazina, N., Ntibashirwa, S., Habonayo, G., Nduwarugira, E., Nijimbere, B. 2012. Augmentation de la production par l'utilisation de la biomasse de *tithonia diversifolia* à la place du dap : Cas de la culture de haricot. ISABU. 16 p.
53. Schalbroeck J.J., Opdecamp L. 1987. Sensibilités différentielles du blé et du triticale à l'acidité des terres dans le Mugamba (Burundi). Publications Agricoles (Belgium). Administration Generale de La Cooperation Au Developpement. N°. 10.
54. Schlecht, E., A. Buerkert, E. Tielkes., A. Bationo. 2006. A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Soudano-sahelian West Africa. p1-28. *Advances in Integrated soil fertility management in Sub-saharan Africa : Challenges and opportunities*. Springer, 109-136.
55. Shoemaker, H. E., McLean, E. O., Pratt, P. F. 1961. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. *Soil Science Society of America Journal*, 25(4): 274-277.
56. Sottiaux, T., Roeseler, J., Reynaert, M. S. 1985. Aerodynamic filtration of inhaled particles. Applications to aerosol therapy. *Revue Medicale De Liège*, 40(5): 172-180.
57. Tessens, E., J. Gourdin. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo No 19. ISABU. 36 p.
58. Thuriès, L. 2012. Effets de différentes sources organiques sur les propriétés d'un sol sableux argileux, 10 ans d'essai en culture légumière à la SERAIL (Brindas, France) : Session 3. Stratégie promotion vulgarisation.
59. Uehara G., Keng J. 1975. Management Implications of Soil Mineralogy in Latin America. 22 p.
60. Van Raij, B. 1991. Fertility of acid soils. In R. J. Wright, V. C. Baligar, R. P. Murrmann (Éds.), *Plant-Soil Interactions at Low pH: Proceedings of the Second International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH*, 24-29 June 1990, Beckley West Virginia, USA (p. 159-167). Springer Netherlands.
61. Van Ranst, E. 1995. Rational soil management in the humid tropics. *Meded. Zitt. K. Acad. Overzeese Wet.* 40 (1994-2): 209-233.

62. Viscarra Rossel, R. A., McBratney, A. B. 2000. A Two-Factor Empirical Deterministic Response Surface Calibration Model for Site-Specific Predictions of Lime Requirement. *Precision Agriculture* 2(2): 163-178.
63. Viscarra Rossel, R., Perez Hoyos, A., Walter, C. 2002. Estimations précises des besoins en chaux dans le Massif Armoricaïn. 17 p.
64. Wakana, M. 1984. Contribution à la définition de la toxicité aluminique des sols humifères d'altitude du Burundi. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 108 p.
65. Wambeke, A. van. 1992. Soils of the tropics : Properties and appraisal. *Soils of the Tropics: Properties and Appraisal*. 353 p.
66. Woodruff, C. M. 1948. Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Science*, 66(1). 53.
67. Wouters, J.F.R, M. Wakana., L. Opdecamp. 1985. Sensibilité du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) à la concentration en Aluminium des sols de la région des Grands-Lacs. *Tropicultura*. Vol 4(1): 20-26.
68. Yamoah, J. R. Burleigh., M. R. Malcolm. 1990. "Application of Expert Systems to Study of Acid Soils in Rwanda," *Agric. Ecosystems Environ*. 30:203–218.

Evaluation de l'effet des classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité aluminique et de la disponibilité du P assimilable dans le sol

Niyonkuru Anicet², Salvator Kaboneka¹, Séverin Nijimbere¹, Oscar Nduwimana² et Micael Beun²

¹Université du Burundi, Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI), Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE), BP 2940 Bujumbura, Burundi.

²Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Biologie. Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. BP 2700 Bujumbura, Burundi.

³International Fertilizer Development Center (IFDC), BP: 1995 Bujumbura, Burundi.

*Auteur de correspondance, E-mail: salvator.kaboneka@gmail.com

Résumé

Une étude a été menée sur l'évaluation de l'effet des différentes classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité aluminique, de la disponibilité du phosphore assimilable et sur la production d'une culture test de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans un sol acide des plateaux centraux du Burundi. L'étude s'est déroulée sur une période de 12 mois, couvrant quatre récoltes de haricot (septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024). Le dispositif expérimental utilisé était en randomisation totale avec trois répétitions et sept traitements : T0 (témoin intégral), T1 (1 mm), T2 (0,5 mm), T3 (0,25 mm), T4 (0,1 mm), T5 (0,05 mm) et T6 (granulométrie mixte, forme actuellement vendue sur le marché). Le traitement T5, correspondant à la dolomie à granulométrie fine (0,05 mm), atteint un pic de pH élevé dès la première récolte, passant du pH initial de 4,92 à 5,57, et cela trois mois après l'application. Le traitement T1, contenant une dolomie à granulométrie grossière (1 mm), montre une augmentation retardée du pH, observable en décembre (pH de 5,34), soit six mois après l'application. Le traitement T6, constitué d'une dolomie à granulométrie mixte, suit une tendance intermédiaire et maintient une efficacité relativement stable tout au long de l'expérimentation sur une période d'un an. Leur pH est respectivement 5,39 ; 5,46 ; 5,26 et 5,25. Les traitements montrent une réactivité différente en fonction de leur granulométrie tout au long de la période d'expérimentation. De manière générale, les résultats obtenus indiquent que les traitements à texture fine (0,05 mm et 0,1 mm) réagissent rapidement, avec une tendance descendante en dents de scie pour les paramètres physico-chimiques et agronomiques mesurés. Au contraire, les traitements à texture grossière présentent un effet plus lent mais progressif, suggérant une dissolution lente. Le rendement le plus élevé a été trouvé neuf mois après le chaulage dans le traitement T6 (7,74 g), tandis que le rendement le plus bas a été trouvé au même mois pour le traitement témoin (0,25 g). L'observation principale de cette étude est que le traitement à granulométrie mixte (T6) démontre un effet plus durable et équilibré sur la production du haricot, ce qui est recherché dans la pratique du chaulage.

Mots-clés : Granulométrie, dolomie, pH, phosphore assimilable, biomasse

Abstract

A study was conducted on the effect of different particle size classes of dolomitic lime on the dynamics of pH, aluminum acidity, available phosphorus, and the production of a test crop of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in an acidic soil of the central highlands of Burundi. The study was carried out over a 12-month period, covering four bean harvests (September 2023, December 2023, February 2024, and June 2024). The experimental design was a completely randomized design with three replications and seven treatments: T0 (untreated control), T1 (1 mm), T2 (0.5 mm), T3 (0.25 mm), T4 (0.1 mm), T5 (0.05 mm), and T6 (mixed particle size, the form currently available on the market). Overall, treatment T5, corresponding to finely ground dolomite (0.05 mm), reached a high pH peak as early as the first harvest, increasing from an initial pH of 4.92 to 5.57 just three months after application. Treatment T1, containing coarse dolomite (1 mm), showed a delayed pH increase, becoming noticeable in December (pH 5.34), six months after application. Treatment T6, composed of mixed-size dolomite, followed an intermediate trend and maintained relatively stable effectiveness throughout the one-year experimental period, with pH values of 5.39, 5.46, 5.26, and 5.25 over the successive harvests. The treatments exhibited different reactivity patterns depending on their particle size throughout the experimental period. In general, the results indicate that fine-textured treatments (0.05 mm and 0.1 mm) reacted quickly, with a fluctuating downward trend in the measured physico-chemical and agronomic parameters. Conversely, coarse-textured treatments had a slower but more progressive effect, suggesting gradual dissolution. The highest yield was recorded nine months after liming in treatment T6 (7.74 g), while the lowest yield was observed in the control treatment at the same time (0.25 g). The main finding of this study is that the mixed particle size treatment (T6) demonstrated a more durable and balanced effect on bean production, which is desirable in liming practices.

Keywords: Particle size, dolomitic lime, pH, available phosphorus, biomass.

1. INTRODUCTION

L'agriculture joue un rôle crucial à l'échelle mondiale, contribuant à plusieurs aspects essentiels de la société et de l'économie à savoir la sécurité alimentaire, l'économie, la réduction de la pauvreté et dans la gestion et l'utilisation des terres et des ressources naturelles. Cependant, elle peut aussi entraîner la dégradation des sols et d'autres impacts environnementaux. Le développement de l'agriculture est l'un des leviers les plus puissants sur lequel l'on peut agir pour mettre fin à l'extrême pauvreté, renforcer le partage de la prospérité et nourrir les 10 milliards de personnes que comptera la planète en 2050 (FAO, 2017).

La production agricole mondiale a ralenti ces dernières années, avec des taux de croissance plus faibles dans plusieurs régions. Cela est en partie dû à l'épuisement des terres agricoles, à la dégradation des sols, et aux effets du changement climatique.

Environ 250 millions de personnes sont directement dépendantes de l'agriculture pour leur survie, et beaucoup souffrent déjà d'insécurité alimentaire (Masson-Delmotte et al., 2020). Cette situation est exacerbée par les conflits, les catastrophes naturelles et les mauvaises conditions climatiques. Le changement climatique impacte directement la production agricole en augmentant la fréquence des événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations. Cela réduit la productivité des cultures et menace la sécurité alimentaire mondiale. Il y a une adoption croissante des technologies agricoles modernes pour améliorer les rendements, comme l'irrigation, les semences génétiquement modifiées et la mécanisation. Ces innovations visent à soutenir une agriculture plus durable (Altieri, 2009).

L'agriculture est aussi un facteur essentiel de croissance économique : en 2018, elle représentait 4 % du produit intérieur brut (PIB) mondial et, dans certains pays en développement parmi les moins avancés, sa part peut dépasser 25 % du PIB. Cependant, l'agriculture mondiale fait face à de nombreux défis et évolue en réponse à plusieurs tendances et pressions environnementales, sociales et économiques.

L'agriculture est une source majeure d'emploi et contribue jusqu'à 60 % au PIB dans certains pays africains (The State of Food and Agriculture, 2021). Elle est essentielle pour la subsistance des populations rurales et pour le développement économique, en particulier dans les pays les moins avancés.

L'agriculture en Afrique est affectée par la faible productivité, les pratiques agricoles traditionnelles, et une dépendance importante aux conditions climatiques. Le changement climatique aggrave cette situation, rendant l'agriculture plus vulnérable aux sécheresses et aux inondations.

Au Burundi, l'agriculture contribue à elle seule à hauteur de 39,6 % au PIB, offre 84 % d'emplois, fournit 95 % de l'offre alimentaire et constitue le principal pourvoyeur de matières premières à l'agro-industrie. C'est un secteur à faible productivité dû à des problèmes d'ordre structurel et conjoncturel. Les rendements agricoles et d'élevage actuels restent inférieurs aux rendements potentiels (PND Burundi, 2018). De l'autre côté, l'agriculture familiale fournit 95 % de l'alimentation nationale. Toutefois, cette production reste insuffisante pour couvrir pleinement les besoins nutritionnels du pays.

Cependant, le Burundi possède un potentiel important pour accroître sa production agricole, ce qui pourrait stimuler la croissance économique et créer des emplois supplémentaires (PND Burundi, 2018). Malgré cela, l'agriculture burundaise fait face à plusieurs défis majeurs, à savoir la faible disponibilité des terres, le changement climatique et les faibles productions agricoles :

Bien que la production agricole commerciale de thé, de café, d'huile de palme et de coton représente moins de 5 % du PIB, les exportations jouent un rôle essentiel dans l'économie du Burundi, car elles génèrent des revenus, de l'emploi et des devises (Alexandratos, 2010).

Parmi les solutions entreprises par l'État pour augmenter la production agricole par diminution de l'acidité du sol, il y a leur correction par utilisation de la dolomie. La dolomie, une roche sédimentaire carbonatée riche en magnésium et calcium, est fréquemment utilisée comme amendement calcaire dans l'agriculture pour ajuster le pH des sols (Kaboneka, 2019).

Le chaulage a un effet sur la structure du sol en provoquant la floculation des argiles et en renforçant le complexe argilo-humique. En apportant des bases, on piège des H⁺ qui ne sont plus disponibles pour se lier aux charges

négligentes de la matière organique et des argiles. L'amendement va rendre des sites disponibles pour se lier aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui vont servir de ponts entre les molécules organiques et les minéraux argileux. Le résultat est la formation d'agrégats qui améliorent la stabilité structurale, l'aération et la réserve utile du sol. Les apports calciques vont aider en particulier à structurer les sols limoneux battants à faible taux d'argile ou de matière organique. Un sol mieux structuré a une capacité à retenir l'eau plus importante, et donc potentiellement de meilleurs rendements (Dinnis, 1994).

S'il est vrai que la technique de chaulage est aujourd'hui bien appréhendée, il existe une lacune dans la compréhension de la façon dont les différentes classes granulométriques de la dolomie peuvent influencer la dynamique du pH du sol, de l'acidité d'échange et de la disponibilité des éléments, particulièrement le phosphore disponible (Nkhata et al., 2021). Cette lacune justifie la nécessité d'une étude approfondie pour optimiser l'utilisation de la dolomie dans l'amélioration des propriétés du sol et la correction de l'acidité.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche approfondie sur l'impact de la dolomie sur la gestion des sols acides du Burundi, un enjeu crucial pour l'agriculture locale. À une époque où la sécurité alimentaire et la durabilité des pratiques agricoles sont plus que jamais d'actualité, il est impératif de comprendre comment les amendements calcaires peuvent contribuer à améliorer la qualité des sols et, par conséquent, les rendements des cultures.

L'étude présente une évaluation systématique des différentes classes granulométriques de dolomie et leur influence sur des paramètres clés tels que le pH, l'acidité aluminique et la disponibilité du phosphore, tout en mettant en avant la culture du haricot, essentielle pour la nutrition et l'économie burundaise. Les résultats obtenus soulignent non seulement l'importance de la granulométrie dans l'efficacité des amendements, mais aussi le besoin d'une approche intégrée pour la gestion des sols.

Ce travail, financé par l'International Fertilizer Development Center (IFDC) et mené en collaboration avec l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), vise à apporter des solutions concrètes aux défis rencontrés par les agriculteurs et à renforcer la résilience de l'agriculture burundaise face aux enjeux environnementaux. Je tiens à exprimer ma gratitude envers tous les acteurs qui ont contribué à la réalisation de cette recherche, ainsi qu'à mes proches pour leur soutien inconditionnel tout au long de ce parcours académique.

C'est dans cette optique qu'on a mené une étude intitulée « **Évaluation de l'effet des différentes classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, l'acidité aluminique, la disponibilité du phosphore assimilable et le rendement du haricot dans un sol d'altitude du Burundi** ».

L'objectif général de l'étude est d'évaluer l'effet de la granulométrie de la dolomie sur la dynamique du pH, la neutralisation de l'Al échangeable, l'amélioration de la disponibilité du P assimilable et le rendement d'une culture de haricot dans un sol acide d'altitude du Burundi.

Pour les différentes classes granulométriques de la dolomie, les objectifs spécifiques inhérents à notre étude étaient:

1. Déterminer leur effet sur la dynamique du pH;
2. Évaluer leur influence sur la dynamique de l'acidité aluminique;
3. Appréhender leur effet sur la disponibilité du P assimilable;
4. Évaluer la réponse d'une culture test de haricot.

Les hypothèses à tester étaient les suivantes :

- H1.** Les différentes classes granulométriques de la dolomie ont des effets distincts sur la variation du pH du sol;
- H2.** Les classes granulométriques de la dolomie évaluées affectent différemment l'acidité aluminique du sol;
- H3.** Les différentes classes granulométriques de la dolomie influencent de manière différente la disponibilité du phosphore assimilable dans le sol;
- H4.** Les différentes classes granulométriques de la dolomie affectent différemment le rendement du haricot.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Lieu de l'étude

Cette expérimentation a été réalisée en conditions semi contrôlées dans Bujumbura Mairie. Les températures moyennes varient entre 20°C et 30°C tout au long de l'année. L'humidité relative moyenne varie de 60 % en saison sèche à environ 80 % pendant la saison des pluies.

L'expérience a été réalisée en utilisant des pots de culture contenant chacun 3 kg de sol. Le sol a été prélevé sur le site du Campus Zege à Gitega, appartenant à la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi. Ce sol a été objet d'une série des recherches complémentaires dans le projet de la FABI financé par IFDC.

2.2. Traitements et protocole expérimental

Un essai dans les pots a été mis en place contenant un sol préalablement analysé et chaulé dont le niveau de pH de départ était de 4,92, phosphore assimilable 5,70 mg/kg et acidité aluminique 0,908 méq/100g de sol. Le sol a été chaulé avec de la dolomie à 5 classes granulométriques ($T_1=1$ mm, $T_2=0,5$ mm, $T_3=0,25$ mm, $T_4=0,1$ mm, $T_5=0,05$ mm, $T_6=$ dolomie non tamisée et le témoin T_0). La dose d'application était basée sur la formule de Yamoah et al. (1990) qui stipule que les besoins en chaux (T/ha) est égale à $16-2,87 \times \text{pH}$.

La méthode a été choisie parce qu'elle a été testée dans une région intertropicale comme la notre. Elle est aussi moins couteuse. Le dispositif expérimental était un dispositif en randomisation totale avec 3 répétitions. Cette méthode a été choisie parce que les unités expérimentales étaient homogènes car le sol était uniforme.

Tous les traitements ont été semés en haricot avec l'application de la formule de fertilisation organique et minérale (FOMI Imbura (9 % N, 22 % P_2O_5 , 4 % K_2O , 13 % CaO, 2 % MgO) recommandée par l'ISABU).

Au total, 21 traitements ont été évalués. L'échantillonnage du sol et l'analyse au laboratoire du pH et l'acidité aluminique ainsi que le P assimilable ont été effectuées après chaque récolte et cela pendant quatre fois. L'étude a débuté juin 2023 et a été conclue juin 2024.

Le détail des traitements testés basés sur la granulométrie est donné ci-après:

T_0	: Témoin sans dolomie
T_1	: Dolomie à granulométrie de 1 mm
T_2	: Dolomie à granulométrie 0,5 mm
T_3	: Dolomie à granulométrie 0,25 mm
T_4	: Dolomie à 0,1 mm
T_5	: Dolomie à granulometrie 0,05 mm
T_6	: Dolomie à granulométrie non tamisée

Cette fertilisation chimique pendant l'étude a été assurée par l'application de FOMI Imbura de formule: 9% N, 22% P_2O_5 , 4% K_2O , 13% CaO, 2% MgO. La dose appliquée a été calculée à partir de la quantité nécessaire sur ha (200 kg/ha), tenant compte de la masse estimée de terre arable à 2.000.000 kg/ha pour un sol moyen de profondeur 15 cm et de densité apparente 1,325 g/cm³. Etant donné qu'un ha est égal à 10 mille mètre carrés, la quantité de sol est égale à 1 kg x 10.000 m² x 0,15m x 1,325 kg/dm³. Le résultat de 1987500 kg est arrondi à 2.000.000 kg de sol par ha.

Les doses d'intrants appliqués par pot (unité expérimentale) étaient constituées de 3 g de dolomie, 15 g de Fumure organique associés à 0,3 g d'Imbura.

2.3. Plantation et récolte

Les opérations culturales comprenaient la préparation du terrain, le semis, le sarclage et la récolte. Après une semaine d'installation et mélange de ces substrats, les semences de haricot de variété «Rufutamadeni» ont été semées à raison de 6 graines par pot. Après 10 jours, le démariage a été fait en laissant 3 plants les plus vigoureux. Le sarclage a été effectué à la main à chaque fois que de besoin.

Quatre récoltes de haricot ont été effectuées avec les différents paramètres de croissance et de rendement. La récolte a été effectuée à la main. Les graines ont été séchées à l'air libre puis conservées dans les sacs dans un endroit frais et aéré. Les paramètres mesurés dans le sol étaient le pH_{eau}, P assimilable et l'acidité aluminique tandis que les paramètres agronomiques étaient le nombre de gousse (NGO), nombre de graines (NG), poids des graines (PG), biomasse aérienne, biomasse racinaire et le poids de mille graines.

2.4. Analyse des données

Les données relatives aux paramètres de croissance et de rendement ont été consignées dans des fichiers Excel, puis organisées par traitement. Elles ont ensuite été soumises à une analyse de variance (ANOVA) afin de tester la significativité des différences observées entre les traitements, lorsque celles-ci existent. Le traitement des données a été effectué avec Microsoft Excel, et les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel d'analyse Rstudio (Gaudron, 2016). Un groupement des moyennes homogènes a été effectué sur base de la plus petite différence significative (ppds ou LSD en anglais). La vérification de la normalité des données a été faite par le test de Shapiro-Wilk qui dit que si p-value est supérieur à 0,05, on ne rejette pas l'hypothèse nulle, auquel cas les données suivent une distribution normale.

L'homoscédasticité (ou l'égalité des variances) des données dans R a été vérifiée par le test de Bartlett. A chaque fois, les moyennes associées aux différents paramètres mesurés étaient accompagnés d'écart-type montrant leurs intervalles de variation.

3. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

3.1. Paramètres physicochimiques du sol

Les paramètres du sol suivis au cours de l'expérimentation se sont limités à trois : le pH_{eau}, le P assimilable et l'acidité échangeable (Al³⁺ et H⁺). Ces mesures ont été effectuées à la conclusion de chacune des quatre expérimentations en pot (Septembre, Décembre, Février, Juin), qui correspondent à la période de récolte de la culture test de haricot.

3.1.1 Dynamique du pH

La dynamique du pH a été soumise à l'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 3).

Tableau 3. Analyse de la variance pour le pH du sol

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	1,5	0,24	6,9	1,46e-05 ***
Mois	3	0,50	0,16	4,7	0,00511 **
Traitement x Mois	18	0,83	0,05	1,3	0,20588
Residus	56	1,9	0,03		

0,001*** : Très hautement significatif ; 0,01** : Hautement significatif ; 0,05* : Simplement significatif ; NS : Non significatif (p > 0,05).

Cette analyse de la variance (ANOVA 2) a mis en évidence un effet très hautement significatif du facteur traitement (p < 0,001), un effet hautement significatif (p < 0,01) du facteur mois (récolte), mais une absence de l'effet interactif (p > 0,05) sur la dynamique du pH du sol.

Le tableau 4 ci-après classe les traitements testés période d'échantillonnage par période d'échantillonnage en groupes de moyennes homogènes pour le paramètre pH du sol.

Tableau 4. Analyse de la variance pour le pH du sol

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	4,96±0,40 c	5,13±0,24b	4,48±0,15b	5,05±0,09b
T ₁	4,99±0,12bc	5,34±0,12ab	5,12±0,10ab	5,23±0,03ab
T ₂	5,15±0,33abc	5,43±0,17a	5,33±0,04a	5,48±0,18a
T ₃	5,47±0,25a	5,42±0,07a	5,21±0,29a	5,34±0,09ab
T ₄	5,2±0,37abc	5,57±0,10a	5,31±0,02a	5,07±0,49b
T ₅	5,57±0,16a	5,48±0,04a	5,3±0,02a	5,31±0,13ab
T ₆	5,39±0,21abc	5,46±0,12a	5,26±0,12a	5,25±0,84ab

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en trois groupes homogènes chevauchants. En tête de ce classement se place le traitement T₃ (5,47±0,25) et T₅ (5,57±0,16), alors qu'en bas du même classement se retrouve le traitement témoin T₀ (4,96±0,40). Entre les deux groupes se retrouvent les autres traitements. Les traitements de tête T₃ et T₅ n'est statistiquement supérieur qu'au traitement témoin T₀ et le traitement T₁.

La même approche analytique appliquée aux données de pH de la récolte de décembre 2023, place les différents traitements granulométriques testés en deux groupes de moyennes homogènes (GH). Les traitements allant de T₂ à T₆ sont statistiquement supérieurs au témoin T₀, avec des valeurs de pH variant de 5,57±0,10 (T₄) à 5,42±0,07 (T₃), mais ne le sont pas avec le traitement T₂. Au cours de cette phase de l'expérimentation, c'est le traitement T₄ qui donne une valeur absolue de pH la plus élevée.

Le même scénario se reproduit à la troisième récolte. L'analyse de la variance place les valeurs de pH en deux groupes de moyennes homogènes chevauchants. Les mêmes traitements T₂ à T₆ étant le même groupe de moyennes homogènes chevauchant avec le traitement T₁ et statistiquement supérieur au traitement témoin T₀. A ce stade se remarque une légère chute de pH (< 0,20 unité) pour tous les traitements par rapport au deuxième échantillonnage de décembre 2023. La plus grande réduction de pH entre décembre 2023 et février 2024 est enregistrée avec le traitement témoin T₀. (- 0,65 unité de pH).

A la dernière récolte du haricot de juin 2024, deux groupes de moyennes (chevauchants) de pH apparaissent, avec à la tête du premier groupe le traitement T₂ (5,48±0,18) et en bas de l'échelle se retrouve le traitement témoin (T₀) et le traitement T₄. Rappelons que ce dernier traitement affichait des valeurs de pH parmi les plus élevées au cours des trois récoltes précédentes.

D'une manière générale, le traitement T₅, correspondant à la dolomie à granulométrie fine (0,05 mm), atteint un pic de pH élevé dès la première récolte, trois mois après l'application, avant de diminuer légèrement en décembre. Le traitement T₁, contenant une dolomie à granulométrie grossière (1 mm), montre une augmentation retardée du pH, observable en décembre, soit six mois après l'application. Le traitement T₆, constitué d'une dolomie à granulométrie mixte, suit une tendance intermédiaire et maintient une efficacité relativement stable tout au long de l'expérimentation sur une période d'un an. Les traitements montrent une réactivité différente en fonction de leur granulométrie tout au long de la période d'expérimentation.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et la période de collecte des données de pH permet d'établir le tableau 5 ci-après. Elle groupe les traitements binômes en trois groupes de moyennes (de pH) chevauchants. En bas du classement, quelle que soit la date d'échantillonnage du pH se retrouve le traitement témoin T₀ dont le pH a varié de 4,88 à 5,13 tout au long de l'expérimentation. Dans la grande majorité des traitements, les pH étaient systématiquement (pas toujours statistiquement) plus élevés que ceux observés avec le témoin. Une indication de l'intérêt du chaulage dans ces types de sols acides du Burundi.

Tableau 5. Effet de l'interaction traitement x période sur le pH du sol.

Traitement et mois	pH	Groupes Homogènes
T ₄ x Décembre 2023	5,57	a
T ₅ x Septembre 2023	5,57	a
T ₂ x Juin 2024	5,48	ab
T ₅ x Décembre 2023	5,48	ab
T ₃ x Septembre 2023	5,47	abc
T ₆ x Décembre 2023	5,46	abc
T ₂ x Décembre 2023	5,43	abc
T ₃ x Décembre 2023	5,43	abc
T ₆ x Septembre 2023	5,39	abc
T ₃ x Juin 2024	5,34	abc
T ₁ x Décembre 2023	5,34	abc
T ₂ x Février 2024	5,34	abc
T ₅ x Juin 2024	5,31	abc
T ₄ x Février 2024	5,31	abc
T ₅ x Février 2024	5,30	abc
T ₆ x Février 2024	5,26	abc
T ₆ x Juin 2024	5,25	abc
T ₁ x Juin 2024	5,23	abc
T ₃ x Février 2024	5,21	abc
T ₄ x Septembre 2023	5,20	abc
T ₂ x Septembre 2023	5,15	abc
T ₀ x Décembre 2023	5,13	abc
T ₁ x Février 2024	5,12	abc
T ₄ x Juin 2024	5,07	abc
T ₀ x Juin 2024	5,05	abc
T ₁ x Septembre 2023	4,99	abc
T ₀ x Septembre 2023	4,96	bc
T ₀ x Février 2024	4,48	c

Les traitements avec les augmentations de pH les plus élevées correspondent aux traitements suivants : T₄ au mois de décembre 2023 (pH=5,57), T₅ au mois de septembre 2023 (pH=5,57), T₂ au mois de juin 2024 (pH=5,48), T₅ au mois de décembre 2023, T₃ au mois de septembre 2023 (pH=5,47), T₆ au mois de décembre 2023 (pH=5,46) , alors que le pic de pH (pH=5,34) pour le traitement T₁ a été observé au mois de décembre.

L'intérêt de cette analyse séquentielle est de montrer les différences de réactivité de la dolomie en fonction des classes granulométriques et de son effet sur la variation de pH dans le temps qu'a duré l'expérimentation. Cette analyse est appuyée par la figure 1 ci-après, laquelle illustre graphiquement la dynamique du pH selon les différentes classes granulométriques de la dolomie appliquée au sol pendant une période de 12 mois.

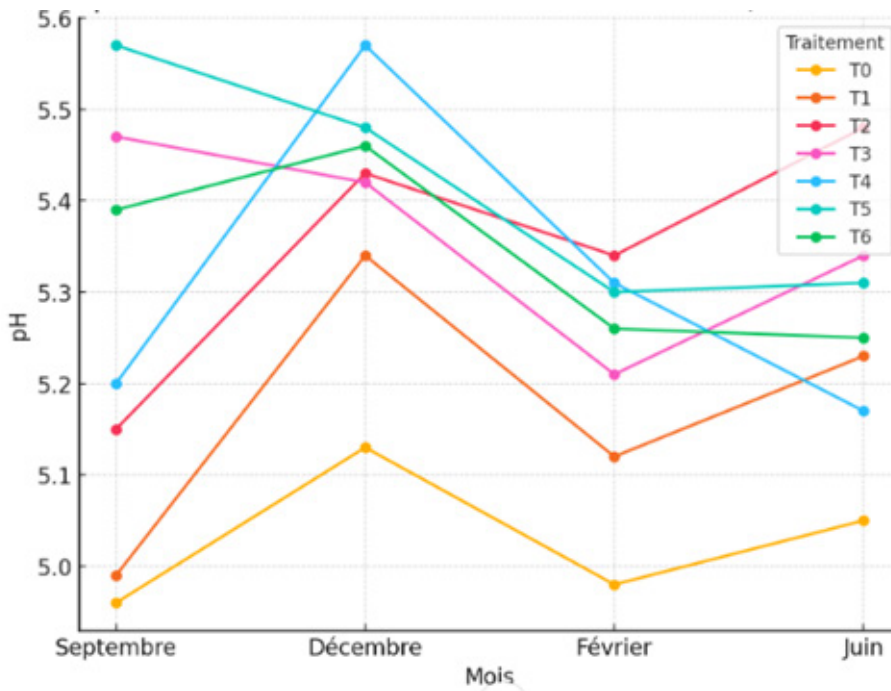


Figure 1. Dynamique du pH des différents traitements selon la période de mesure

Une analyse rapide du graphique montre une série de tendances. La tendance basse regroupe les traitements témoin (T_0) et le traitement T_1 , qui montrent une évolution parallèle en dents de scie, avec des pics de pH à la récolte de décembre 2023. Le traitement T_2 suit la même tendance que les deux derniers traitements, mais au plus haut niveau, jusqu'à montrer la plus haute valeur de pH à la conclusion de l'étude, au mois de juin 2024.

La série des traitements T_5 et T_6 suit une autre tendance. Avec des valeurs de pH plus élevées à 3 mois de l'application de la dolomie, leur pH diminue au cours des récoltes suivantes de haricot et se stabilise au niveau de la troisième et quatrième récoltes, les valeurs de pH restant plus élevées pour le traitement T_5 par rapport au traitement T_6 .

Une série particulière qui n'est représentée que par le traitement T_4 montre une brutale augmentation de pH entre septembre 2023 et décembre 2023, suivie d'une chute notable au niveau de la deuxième (décembre 2023), la troisième (février 2024) et la quatrième récolte (juin 2024) de haricot. À la fin de l'expérimentation, ce traitement atteint la plus basse valeur de pH après le traitement T_0 .

Enfin, le traitement T_3 est initialement caractérisé par une des deux valeurs de pH les plus élevées (avec T_5), son pH diminue entre septembre et décembre 2023 et plus particulièrement entre décembre 2023 et février 2024, pour ensuite remonter en juin 2024, et se placer juste derrière le traitement T_2 qui montre la plus grande valeur de pH (=5,48).

D'une manière générale, les résultats obtenus dans la présente étude corroborent les études antérieures, qui soulignent que la granulométrie des amendements calcaires influence directement leur réactivité et leur efficacité dans la correction de l'acidité du sol. Plus spécifiquement, ces résultats sont cohérents avec ceux d'Esilaba et al. (2023) qui ont montré que les particules de calcaire plus fines réagissent plus rapidement, en raison de leur surface spécifique élevée qui est corrélée à leur réactivité pour la variation de pH du sol.

Dans la même ligne de réflexion, les résultats de Barber (1984) avancent que le pH des sols acides augmente davantage rapidement grâce à l'utilisation de calcaire plus fin, de même que Hoyert et Axley (1952) ont montré que l'augmentation du pH du sol est plus importante pour le calcaire plus fin que pour le matériau plus grossier. Ces observations ont été également confirmées par Rich et Thomas (1960) et Conyers et al. (2020). Ces derniers investigateurs ont avancé que les tailles de particules plus fines de calcaire, en particulier celles de diamètre < 0,075 mm, donnent les plus fortes augmentations du pH du sol par tonne de calcaire appliqué. En tout état de cause, si les granulométries fines sont plus efficaces dans la correction de l'acidité des sols par rapport aux granulométries plus grossières, les considérations économiques (coût) et de difficultés de gestion pratique doivent être tenues en compte dans le choix des granulométries (Scott, 1992).

3.1.2. Disponibilité du P assimilable

La dynamique du P assimilable a été soumise à l'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 6).

Tableau 6. Analyse de la variance pour le P assimilable (mg/kg de sol)

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	775	12,9	0,997	0,4365
Mois	3	2830	943	72,7	<2e-16 ***
Traitement x Mois	18	270	15,0	1,16	0,32
Résidus	56	726	12,9		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au paramètre P assimilable n'a pas relevé d'effet simple du facteur traitement ni de l'effet interactif traitement x mois sur la dynamique du P assimilable ($p > 0,05$). Autrement dit, les différentes granulométries de dolomie utilisées n'ont pas eu d'impact notable sur la disponibilité du P assimilable dans le sol pendant la durée de l'expérimentation en pots.

En revanche, un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) a été observé pour la période d'échantillonnage (mois). C'est ainsi que l'analyse de la variance permet d'aboutir aux groupes de moyennes homogènes indiquées dans le tableau 7 ci-après.

Tableau 7. Effet des traitements sur le P assimilable en mg/kg de sol

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	5,06±2,62b	11,6±1,29a	12,8±1,60c	18,1±0,65a
T ₁	6,86±1,08ab	9,69±0,95a	13,0±0,87c	20,4±3,61a
T ₂	8,38±2,57a	14,9±2,00a	15,2±1,44abc	20,2±8,93a
T ₃	5,18±1,12ab	11,9±3,52a	18,4±3,93a	25,7±8,23a
T ₄	5,24±1,15ab	13,8±3,79a	19,0±3,27a	20,2±0,53a
T ₅	6,62±0,88ab	13,4±1,99a	17,6±3,60ab	23,9±6,50a
T ₆	5,24±1,74ab	11,9±4,75a	13,7±1,45bc	23,5±2,00a

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en deux groupes homogènes chevauchants. En tête de ce classement se place le traitement T₂ (8,38±2,57), alors qu'en bas du même classement se retrouve le traitement témoin T₀ (5,06±2,62). Entre les deux groupes se retrouvent les autres traitements restants. Le traitement de tête T₂ n'est statistiquement supérieur qu'au traitement témoin T₀. Tous les traitements montrent une forte déficience en P assimilable sur base des normes d'interprétation des sols proposées par Tessens et Gourdin (1993).

La même approche analytique appliquée aux données de P assimilable de la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en un seul groupe de moyennes homogènes, avec encore une fois le traitement T₂ (14,9±2,00) avec une plus grande valeur de P assimilable, sans différence statistique avec les autres traitements néanmoins. Les deux traitements avec des valeurs proches en P assimilable sont T₄ (13,8±3,79) et T₅ (13,4±1,99). Dans tous les traitements testés, à l'exception du traitement T₁, la concentration en P assimilable a plus que doublé entre la récolte de septembre et celle de décembre 2023, y compris le traitement témoin T₀.

A la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place les valeurs de P assimilable en trois groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête les traitements T₄ (19,0±3,27) et T₃ (18,4±3,93). Ces traitements ne sont pas statistiquement supérieurs aux traitements T₂ (15,2±1,44) et T₅ (17,6±3,60), mais le sont aux traitements T₆, T₁ et T₀. À ce stade se remarque une nette augmentation progressive du P assimilable tout au long de la période d'expérimentation. Les augmentations les plus notables s'observent au niveau des traitements T₄, T₃ et T₅.

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, l'analyse de la variance place les différents traitements granulométriques testés en un seul groupe de moyennes homogènes. Le traitement T₆ (23,6±2,00) a une plus grande valeur de P assimilable, sans différence statistique avec les autres traitements néanmoins.

Cependant, de manière générale, la teneur en P assimilable a remarquablement augmenté tout au long de l'expérimentation pour tous les traitements (y compris le témoin), passant de la valeur initiale du sol original de 5,70 mg/kg de sol à plus de 20 mg/kg, soit 4 fois plus, sur une période d'une année. C'est l'un des effets spectaculaires de l'application de la dolomie sur les sols acides.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et la période de collecte des données de P permet d'établir le tableau 8 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en 7 groupes de moyennes (de P assimilable) chevauchants. En bas du classement, et de manière nette se retrouvent les traitements associés aux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023). Aussi de manière nette, la tête de classement est occupée par les traitements associés beaucoup plus à la quatrième récolte (juin 2024) qu'à la récolte précédente.

Les traitements qui sortent du lot avec des teneurs en P assimilable supérieures à 20 mg/kg sont les traitements T₃, T₅ et T₆.

Tableau 8. Effet de l'interaction traitement x période sur le P assimilable

Traitement et mois	P assimilable (mg/kg)	Groupes Homogènes
T ₃ x Juin 2024	25,7	a
T ₅ x Juin 2024	23,9	ab
T ₆ x Juin 2024	23,5	abc
T ₁ x Juin 2024	20,4	abcd
T ₂ x Juin 2024	20,2	abcd
T ₄ x juin 2024	20,2	abcde
T ₄ x Février 2024	19,0	abcdef
T ₃ x Février 2024	18,4	abcdef
T ₀ x Juin 2024	18,1	abcdef
T ₅ x Février 2024	17,6	abcdef
T ₂ x Février 2024	15,2	abcdefg
T ₂ x Décembre 2023	14,9	abcdefg
T ₄ x Décembre 2023	13,8	bcdefg
T ₆ x Février 2024	13,7	bcdefg
T ₅ x Décembre 2023	13,4	bcdefg
T ₁ x Février 2024	13,0	bcdefg
T ₀ x Février 2024	12,8	bcdefg
T ₃ x Décembre 2023	12,0	cdefg
T ₆ x Decembre 2023	11,9	defg
T ₀ x Décembre 2023	11,6	defg
T ₁ x Décembre 2023	9,69	defg
T ₂ x Septembre 2023	8,38	efg
T ₁ x Septembre 2023	6,86	fg
T ₅ x Septembre 2023	6,6	fg
T ₄ x Septembre 2023	5,2	g
T ₆ x Septembre 2023	5,2	g
T ₃ x Septembre 2023	5,2	g
T ₀ x Septembre 2023	5,1	g

En tout état de cause, à la lumière des résultats consignés dans les tableaux 6 et 7 ci-dessus, on note que la disponibilité en P assimilable, concomitamment à l'augmentation du pH augmente progressivement au fil du temps après le chaulage. Les valeurs les plus élevées sont observées à la fin de l'expérimentation.

C'est un fait que les résultats obtenus indiquent que les valeurs les plus élevées du P assimilable sont remarquables après une année de chaulage, tandis que les trois premiers mois (septembre 2023) sont caractérisés par des valeurs de P assimilable relativement faibles. Ces résultats corroborent quelque peu ceux avancés par Fageria (2001), qui stipulent qu'il existe des interactions positives entre P et Mg puisque Mg est un activateur des enzymes kinases et active la plupart des réactions impliquant le phosphate transfert.

Il en est de même pour les résultats de Fageria et Baligar (2008) disant qu'en réduisant l'acidité, elle stimule également l'activité biologique, ce qui favorise la minéralisation de la matière organique et la libération de phosphore organique sous une forme assimilable. Pour dire qu'une partie du P assimilable pourrait provenir de cette source organique, mais au bout du compte les teneurs en P assimilable enregistrées au bout de 12 mois de notre expérimentation restent faibles selon Tessens et Gourdin (1993).

3.1.3. Dynamique de l'acidité aluminique

Tout comme pour le pH du sol et le P assimilable, la dynamique de l'acidité aluminique a été soumise à l'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 9).

Tableau 9. Analyse de la variance pour l'acidité aluminique

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	0,22	0,04	2,6	0,029 *
Mois	3	0,06	0,02	1,3	0,279
Traitement x Mois	18	0,47	0,03	1,8	0,049 *
Residuals	56	0,82	0,01		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée à l'acidité aluminique a montré des effets simplement significatifs ($p < 0,05$) du facteur traitement de son interaction avec la période d'échantillonnage (mois).

Par contre, l'effet du facteur « mois » était non significatif ($p > 0,05$). Cependant, l'observation des résultats sur l'acidité aluminique indique pratiquement des valeurs de zéro. Ceci ne justifie guère de rapporter ces données de manière classique sous forme de tableaux.

3.2. Paramètres agronomiques du haricot

Les paramètres agronomiques de la culture test du appréhendés dans cette expérimentation en pots étaient la biomasse totale et ses composantes racinaire et aérienne, le nombre de gousses/pot, le nombre de graines/pot, le rendement en graines/pot et le poids de 1000 grains. Ces mesures ont été effectuées à la conclusion de chacune des quatre expérimentations en pot (Septembre 2023, Décembre 2023, Février 2024, Juin 2024), qui correspondent à la période de récolte de la culture test de haricot.

3.2.1. Biomasse totale du haricot

La production de la biomasse totale du haricot a fait l'objet d'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 10).

Tableau 10. Analyse de la variance pour la biomasse totale du haricot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	41,7	6,95	4,34	0,00123 **
Récolte	3	323,9	107,9	67,46	< 2e-16 ***
Traitement x Récolte	18	117,8	6,54	4,09	3.23e-05 ***
Résidus	53	84,8	1,60		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au paramètre P assimilable a démontré des effets très hautement significatifs ($p < 0,001$) du facteur récolte (considéré comme mois dans les discussions antérieures) et de son interaction avec le facteur traitement. La même analyse relève un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du facteur traitement sur la biomasse totale du haricot.

Le tableau 11 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour la biomasse totale du haricot utilisé comme culture test.

Tableau 11. Effet des traitements sur la biomasse totale (g) du haricot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	1,58±0,20a	4,6±0,53ab	1,93±0,15d	4,84±2,76d
T ₁	1,96±0,28a	4,8±1,22a	6,10±0,70a	6,74±1,22bcd
T ₂	2,17±0,74a	4,6±1,35ab	4,83±0,83ab	9,76±0,38ab
T ₃	1,67±0,09a	5,9±2,50a	4,17±1,04bc	4,86±1,54d
T ₄	1,55±0,07a	4,5±0,70ab	3,20±0,56cd	6,50±3,10cd
T ₅	1,86±0,07a	5,0±2,00a	2,60±0,46d	8,74±0,99abc
T ₆	1,50±0,59a	2,6±0,56b	5,47±0,15ab	10,6±1,39a

À la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en un seul groupe de moyennes dont trois traitements, T₂ (2,17±0,74), T₁ (1,96±0,28) et T₅ (1,86±0,07) se démarquent du lot en production de biomasse totale du haricot.

La même approche analytique appliquée à la production de biomasse totale du haricot produite avec la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en deux groupes de moyennes homogènes, avec cette fois-ci le traitement T₃ (5,9±2,50) avec une plus grande production de biomasse totale du haricot, sans différence statistique avec les autres traitements, sauf le traitement T₆ (2,6±0,56) qui se place en bas de l'échelle de classement. Ce dernier traitement produit pratiquement moitié moins que les autres traitements testés. L'on note une augmentation de production de biomasse totale du haricot deux et même 5 fois plus entre la récolte de septembre 2023 et celle de décembre 2023, indiquant un sensible effet de l'application de la dolomie sur le paramètre biomasse totale de la culture test de haricot.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place les valeurs de biomasse du haricot en quatre groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₁ (6,10±0,70), suivi de T₆ (5,47±0,15). À ce stade se remarque une nette diminution de la production de biomasse de haricot par rapport à la récolte précédente, particulièrement pour les traitements T₀ (1,93±0,15), T₅ (2,60±0,46) et T₄ (3,20±0,56).

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, quatre groupes de moyennes (chevauchants) de biomasse totale de haricot sont identifiables sur base de l'analyse de la variance.

Les traitements de tête sont T₆ (10,6±1,39), T₂ (9,76±0,38) et T₅ (8,74±0,99). La comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales dans l'évolution de la production de biomasse de haricot. On remarque une augmentation continue (parfois lente) des productions de biomasse de haricot pour les traitements T₁, T₂ et T₆ entre les récoltes de septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024. De l'autre côté se remarque une évolution plutôt en dents de scie, particulièrement pour les traitements T₀, T₄ et T₅. Cette évolution en dents de scie de la production de biomasse de la culture test de haricot est à lier avec la dynamique du pH du sol, telle qu'illustrée par la figure 1.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et la récolte de biomasse totale de haricot permet d'établir le tableau 12 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en 9 groupes de moyennes chevauchants. En bas du classement, et de manière nette se retrouvent les traitements associés aux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023). Aussi de manière nette, la tête de classement est occupée par les traitements associés beaucoup plus à la quatrième récolte (juin 2024) qu'à la récolte précédente. Cinq des huit meilleures combinaisons traitement-date de récolte correspondent à la dernière récolte de la culture de haricot (juin 2024). Ces 5 combinaisons correspondantes à la récolte de juin 2024 sont T₆, T₂, T₅, T₁ et T₄.

Tableau 12. Effet de l'interaction traitement x période sur la biomasse totale du haricot

Traitement et mois	Biomasse totale (g/pot)	Groupes Homogènes
T ₆ x Juin 2024	10,6	a
T ₂ x Juin 2024	9,76	ab
T ₅ x Juin 2024	8,74	abc
T ₁ x Juin 2024	6,74	abcd
T ₄ x Juin 2024	6,50	bcde
T ₁ x Février 2024	6,10	bcdef
T ₃ x Décembre 2023	5,90	bcdefg
T ₆ x Février 2024	5,47	cdefgh
T ₅ x Décembre 2023	5,00	cdefghi
T ₃ x Juin 2024	4,86	cdefghi
T ₀ x Juin 2024	4,84	cdefghi
T ₂ x Février 2024	4,83	cdefghi
T ₁ x Décembre 2023	4,80	cdefghi
T ₂ x Décembre 2023	4,60	defghi
T ₀ x Décembre 2023	4,60	defghi
T ₄ x Décembre 2023	4,50	defghi
T ₃ x Février 2024	4,17	defghi
T ₄ x Février 2024	3,20	defghi
T ₅ x Février 2024	2,60	efghi
T ₆ x Décembre 2023	2,60	efghi
T ₂ x Septembre 2023	2,17	fghi
T ₁ x Septembre 2023	1,96	ghi
T ₀ x Février 2023	1,93	hi
T ₅ x Septembre 2023	1,87	hi
T ₃ x Septembre 2023	1,67	hi
T ₀ x Septembre 2023	1,58	hi
T ₄ x Septembre 2023	1,55	hi
T ₆ x Septembre 2023	1,50	i

3.2.2. Biomasse aérienne du haricot (g/pot)

La production de la biomasse aérienne du haricot a fait l'objet d'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 13).

Tableau 13. Analyse de la variance pour la biomasse aérienne du haricot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	20,6	3,43	4,11	0,002 **
Récolte	3	111	37,1	44,5	1,7e-14 ***
Traitement x Récolte	18	60,2	3,34	4,01	4,1e-05 ***
Résidus	53	44,2	0,83		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée à la biomasse aérienne du haricot a démontré l'existence des effets très hautement significatifs ($p < 0,001$) du facteur récolte (considéré comme mois dans les discussions antérieures) et de son interaction avec le facteur traitement. La même analyse relève un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du facteur traitement sur la biomasse aérienne du haricot.

Le tableau 14 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour la biomasse aérienne du haricot utilisée comme culture test.

Tableau 14. Effet des traitements sur la biomasse aérienne (g) par pot du haricot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	1,28±0,13a	3,43±0,65a	1,28±0,08c	2,99±1,87d
T ₁	1,50±0,20a	3,13±0,85a	4,53±0,85a	4,44±0,60bcd
T ₂	1,77±3,00a	3,00±0,92a	3,70±0,66ab	6,41±0,58ab
T ₃	1,42±0,11a	3,40±0,78a	3,47±0,35b	3,14±1,03d
T ₄	1,36±0,12a	3,37±0,40a	2,23±0,21c	4,20±2,37cd
T ₅	1,60±0,05a	4,00±2,15a	1,69±0,24c	5,73±0,99abc
T ₆	1,23±0,48a	1,90±0,61a	4,37±0,23ab	6,77±0,67a

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en un seul groupe de moyennes dont trois traitements, T₂ (2,17±0,74), T₁ (1,96±0,28) et T₅ (1,86±0,07) se démarquent du lot en production de biomasse aérienne du haricot. C'est la même tendance qui a été observée au niveau de la biomasse totale.

La même approche analytique appliquée à la production de biomasse aérienne du haricot produite avec la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en un seul groupe de moyennes homogènes. C'est le traitement T₅ (4,00±2,15) qui affiche la plus grande production de biomasse aérienne du haricot. L'on note une augmentation de production de biomasse aérienne du haricot deux fois et même plus entre la récolte de septembre 2023 et celle de décembre 2023, indiquant un sensible effet de l'application de la dolomie sur le paramètre biomasse aérienne de la culture test de haricot.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place les valeurs de biomasse aérienne du haricot en trois groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₁ (4,53±0,85), suivi de T₆ (4,37±0,23). À ce stade se remarque une nette diminution de la production de biomasse aérienne de haricot par rapport à la récolte précédente, particulièrement pour les traitements T₀ (1,28±0,08), T₅ (1,69±0,24) et T₄ (2,23±0,21), qui se placent par ailleurs au bas du classement des moyennes homogènes.

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, quatre groupes de moyennes (chevauchants) de biomasse aérienne de haricot sont identifiables sur base de l'analyse de la variance. Les traitements de tête sont T₆ (6,77±0,67), T₂ (6,41±0,58) et T₅ (5,73±0,99). Encore une fois, la comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales dans l'évolution de la production de biomasse aérienne de haricot. On remarque une augmentation continue (parfois lente) des productions de biomasse aérienne de haricot pour les traitements T₁, T₂ et T₆ entre les récoltes de septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024. De l'autre côté s'observe une évolution plutôt en dents de scie, particulièrement pour les traitements T₀, T₄, T₅ et relativement moins pour le traitement T₃. Cette observation a par ailleurs été rapportée ailleurs dans les résultats de cette étude.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et la récolte de biomasse aérienne de haricot permet d'établir le tableau 15 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en 7 groupes de moyennes chevauchants.

En bas du classement, et de manière nette se retrouvent les traitements associés aux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023). Aussi de manière nette, la tête de classement est occupée par les traitements associés beaucoup plus à la troisième (février 2024) et quatrième récolte (juin 2024). C'est ainsi que les trois meilleurs traitements en rendements en grains de haricot sont enregistrés à la dernière récolte de la culture de haricot au mois de juin 2024. Ces traitements sont dans l'ordre décroissant T₆, T₂ et T₅.

Tableau 15. Effet de l'interaction traitement x période sur la biomasse aérienne en g par pot

Traitement et mois	Biomasseaérienne (g)	Groupes Homogènes
T ₆ x Juin 2024	6,77	a
T ₂ x Juin 2024	6,41	ab
T ₅ x Juin 2024	5,74	abc
T ₁ x Février 2024	4,53	abcd
T ₁ x Juin 2024	4,44	abcde
T ₆ x Février 2024	4,37	abcdef
T ₄ x Juin 2024	4,20	abcdefg
T ₅ x Décembre 2023	4,00	abcdefgh
T ₂ x Février 2024	3,70	bcdefgh
T ₃ x Février 2024	3,47	cdefgh
T ₀ x Décembre 2023	3,43	cdefgh
T ₃ x Décembre 2023	3,40	cdefgh
T ₄ x Décembre 2023	3,37	cdefgh
T ₃ x Juin 2024	3,14	cdefgh
T ₁ x Décembre 2023	3,13	cdefgh
T ₂ x Décembre 2023	3,00	cdefgh
T ₀ x Juin 2024	3,00	cdefgh
T ₄ x Février 2024	2,23	defgh
T ₆ x Décembre 2023	1,90	defgh
T ₂ x Septembre 2023	1,77	defgh
T ₅ x Février 2024	1,69	efgh
T ₅ x SepT2023	1,59	fgh
T ₁ x Septembre 2023	1,49	gh
T ₃ x Septembre 2023	1,42	gh
T ₄ x Septembre 2023	1,36	h
T ₀ x Septembre 2023	1,28	h
T ₀ x Février 2024	1,28	h
T ₆ x Septembre 2023	1,23	h

3.2.3. Biomasse racinaire du haricot (g/pot)

La production de la biomasse racinaire du haricot a fait l'objet d'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 16).

Tableau 16. Analyse de la variance pour la biomasse racinaire du haricot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	4,86	0,81	2,28	0,0491 *
Récolte	3	54,9	18,3	51,6	9,45e-16 ***
Traitement x Récolte	18	15,4	0,86	2,42	0,0066 **
Résidus	53	18,8	0,35		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée à la biomasse racinaire du haricot a démontré l'existence des effets très hautement significatifs ($p < 0,001$) du facteur récolte (considéré comme mois dans les discussions antérieures) et de son interaction avec le facteur traitement. La même analyse relève un effet simplement significatif ($p < 0,01$) du facteur traitement sur la biomasse racinaire du haricot.

Le tableau 17 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour la biomasse aérienne du haricot utilisée comme culture test.

Tableau 17. Biomasse racinaire (g) du haricot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	0,29±0,07abc	1,17±0,24ab	0,65±0,09c	1,85±1,03cd
T ₁	0,47±0,12a	1,17±0,74ab	1,47±0,35a	2,31±0,62bcd
T ₂	0,39±0,19ab	1,60±0,96ab	1,57±0,30a	3,34±0,30ab
T ₃	0,24±0,13bc	2,50±2,08a	1,43±0,06ab	1,72±0,52d
T ₄	0,19±0,07c	1,13±0,30ab	0,97±0,38bc	2,30±0,75bcd
T ₅	0,28±0,08bc	1,00±0,17ab	0,91±0,26c	3,00±0,00abc
T ₆	0,26±0,21bc	0,70±0,17b	1,10±0,10abc	3,81±0,71a

À la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en trois groupes de moyennes dont deux traitements T₁ (0,47±0,12) et T₂ (0,39±0,19) se démarquent du lot en production de biomasse racinaire du haricot. La plus basse production de biomasse racinaire est observée pour les traitements T₄ (0,19±0,07).

La même approche analytique appliquée à la production de biomasse racinaire du haricot produite avec la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en deux groupes de moyennes homogènes. C'est le traitement T₃ (2,50±2,08) suivi du traitement T₂ (1,60±0,96) qui affichent les plus grandes productions de biomasse racinaire du haricot. Comme pour les biomasses totale et aérienne, l'on note une augmentation de production de biomasse racinaire du haricot deux et même dix fois entre la récolte de septembre 2023 et celle de décembre 2023, indiquant un sensible effet de l'application de la dolomie sur le paramètre biomasse racinaire de la culture test de haricot.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place les valeurs de biomasse racinaire du haricot en trois groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₂ (1,57±0,30), suivi de T₁ (1,47±0,35) et T₃ (1,43±0,06). À ce stade se remarque une nette diminution de la production de biomasse racinaire de haricot par rapport à la récolte précédente, particulièrement pour les traitements T₀ (0,65±0,09), qui se place par ailleurs au bas du classement des moyennes homogènes, au même titre que le traitement T₅ (0,91±0,26).

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, quatre groupes de moyennes (chevauchants) de biomasse racinaire de haricot sont identifiables sur base de l'analyse de la variance. Les traitements de tête sont T₆ (3,81±0,71), T₂ (3,34±0,30) et T₅ (3,00±0,00). Une fois de plus, la comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales dans l'évolution de la production de biomasse racinaire de haricot. De fait, on remarque une augmentation continue (parfois lente) des productions de biomasse racinaire de haricot pour les traitements T₁, T₂ et T₆ entre les récoltes de septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024. De l'autre côté s'observe une évolution plutôt en dents de scie, particulièrement pour les traitements T₀ (Témoin) et T₃.

L'analyse interactionnelle entre le facteur traitement et la récolte de biomasse racinaire de la culture test de haricot permet d'établir le tableau 18 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en 6 groupes de moyennes chevauchants.

En bas du classement, et de manière nette se retrouvent les traitements associés aux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023). Aussi de manière nette, la tête de classement est occupée par les traitements associés beaucoup plus à la quatrième récolte (juin 2024).

De fait, les trois meilleurs traitements en rendements en biomasse racinaire de haricot enregistrés à la dernière récolte de la culture de haricot au mois de juin 2024 sont dans l'ordre décroissant T₆, T₂ et T₅. Exactement le même classement que pour la biomasse aérienne de la culture test de haricot, de même que pour la biomasse totale de haricot.

Tableau 18. Effet de l'interaction traitement x période sur la biomasse racinaire du haricot

Traitement et mois	Biomasse racinaire (g)	Groupes Homogènes
T ₆ x Juin 2024	3,81	a
T ₂ x Juin 2024	3,34	ab
T ₅ x Juin 2024	3,00	abc
T ₃ x Décembre 2023	2,50	abcd
T ₁ x Juin 2024	2,31	abcde
T ₄ x Juin 2024	2,30	abcde
T ₀ x Juin 2024	1,85	bcdef
T ₃ x Juin 2024	1,72	bcdef
T ₁ x Décembre 2023	1,67	bcdef
T ₂ x Décembre 2023	1,60	bcdef
T ₂ x Février 2024	1,57	bcdef
T ₁ x Février 2024	1,47	bcdef
T ₃ x Février 2024	1,44	cdef
T ₀ x Décembre 2023	1,17	cdef
T ₄ x Décembre 2023	1,13	cdef
T ₆ x Février 2024	1,10	cdef
T ₅ x Décembre 2023	1,00	def
T ₄ x Février 2024	0,97	def
T ₅ x Février 2024	0,91	def
T ₆ x Décembre 2023	0,70	def
T ₀ x Février 2024	0,67	def
T ₁ x Septembre 2023	0,47	ef
T ₂ x Septembre 2023	0,39	f
T ₀ x Septembre 2023	0,30	f
T ₅ x Septembre 2023	0,28	f
T ₆ x Septembre 2023	0,26	f
T ₃ x Septembre 2023	0,24	f
T ₄ x Septembre 2023	0,19	f

3.2.4. Nombre de gousses (NGO) du haricot par pot

Comme pour les autres paramètres agronomiques, le nombre de gousses par pot a fait l'objet d'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (récolte) et leur interaction (Tableau 19).

Tableau 19. Analyse de la variance pour le nombre de gousses de haricot par pot

	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	205	34,2	2,56	0,030 *
Récolte	3	43,4	14,5	1,08	0,365
Traitement x Récolte	18	221	12,3	0,92	0,560
Résidus	53	709	13,38		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au paramètre nombre de gousses par pot a démontré l'absence d'effet simple du facteur récolte et de l'effet interactif traitement x récolte ($p > 0,05$). Seul un effet simplement significatif du facteur traitement a été observé ($p < 0,05$). Le tableau 20 ci-après regroupe en donne l'illustration numérique comparative.

Tableau 20. Effet des traitements sur le nombre de gousses du haricot par pot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	2,33±2,31a	4,00±1,00b	0,66±0,57e	1,67±0,58c
T ₁	2,67±0,57a	4,00±1,00b	8,00±1,73a	5,33±0,57ab
T ₂	2,33±2,08a	2,00±0,00b	7,00±1,73ab	6,00±1,00ab
T ₃	3,33±1,53a	3,33±2,21b	5,33±1,15c	4,33±1,15bc
T ₄	3,33±1,53a	4,00±1,73b	3,00±1,00d	4,33±2,08bc
T ₅	4,33±1,53a	4,33±3,21b	5,66±0,58bc	5,33±1,53ab
T ₆	2,00±2,00a	13,30±17,1a	6,33±2,52bc	8,00±1,73a

À la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en un seul groupe de moyennes dont trois traitements, T₅ (4,33±1,53), T₃ (3,33±1,53) et T₄ (3,33±1,53) se démarquent du lot en nombre de gousses de haricot par pot. De l'autre côté, hormis le traitement témoin T₀ (2,33±2,31), le plus faible nombre de gousses par pot a été obtenu avec le traitement T₆ (2,00±2,00).

La même approche analytique appliquée au même paramètre nombre de gousses de haricot par pot pour la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en deux groupes de moyennes homogènes, avec en tête du classement le traitement T₆ (13,30±17,1). Il est significativement plus élevé que tous les autres traitements : 3 à 6 fois. Le plus faible nombre de gousses de haricot par pot étant enregistré avec le traitement T₂ (2,00±0,00). L'on note une augmentation du nombre de gousses de haricot par pot pour tous les traitements (sauf le traitement T₂, plutôt stable), plus particulièrement le traitement T₆ (6,5 fois), entre les deux premières récoltes de la culture test de haricot. Ceci démontre que le retard de réactivité de ce même traitement enregistré au cours des trois premiers mois est compensé au cours des trois mois suivants.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place le nombre de gousses de haricot par pot en cinq groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₁ (8,00±1,73), suivi de T₂ (7,00±1,73) et en bas du classement le traitement témoin T₀ (0,66±0,57). Par rapport à la récolte précédente, à ce stade de l'expérimentation, l'on note une diminution du nombre de gousses de haricot par pot pour les traitements T₀, T₄ et T₆. À l'opposé, des augmentations (parfois spectaculaires) du nombre de gousses de haricot par pot sont relevées pour les traitements T₁ (deux fois), T₂ (3,5 fois), T₃ (1,4 fois) et T₅ (1,3 fois).

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, trois groupes de moyennes (chevauchants) du nombre de gousses de haricot par pot sont identifiables sur base de l'analyse de la variance. Le traitement de tête est constitué par le traitement T₆ (8,00±1,73), tandis que le traitement en bas de l'échelle de classement se retrouve le traitement témoin T₀ (1,67±0,58).

Contrairement à l'évolution des autres paramètres de croissance et de production du haricot, celle du nombre de gousses au cours des quatre expérimentations suit globalement une tendance en dents de scie, avec des maxima variant de traitement à traitement.

Les traitements T₀ et T₆ enregistrent leur maximum à la récolte de décembre 2023 (deuxième récolte), les traitements T₁, T₂, T₃ et T₅ ont leur maxima au mois de février 2024 (troisième récolte), tandis que le traitement T₄ enregistre son maximum à la fin de l'expérimentation, à la récolte de juin 2024. Cette évolution en dents de scie, aussi observée pour les autres paramètres, traduit une différence de réactivité de la dolomie appliquée, en fonction de ses classes granulométriques.

3.2.5. Nombre de graines (NG) du haricot par pot

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au paramètre nombre de graines par pot a démontré l'absence d'effet interactif entre le facteur récolte et le facteur traitement ($p > 0,05$). Elle relève cependant des effets hautement significatifs des facteurs traitement et récolte ($p < 0,05$).

Le tableau 21 en est une illustration.

Tableau 21. Analyse de la variance pour le nombre de graines de haricot par pot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	1495	249	4,16	0,00170 **
Récolte	3	1036	345	5,76	0,00173 **
Traitement x Récolte	18	1126	62,5	1,04	0,43028
Résidus	53	3174	59,9		

Le tableau 22 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour le paramètre nombre de graines par pot de la culture test de haricot.

Tableau 22. Effet des traitements sur le nombre de graines de haricot en g par pot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	3,00±2,31a	6,00±2,00a	1,33±1,54d	3,67±1,53c
T ₁	4,67±1,53a	9,33±3,05a	17,3±2,08ab	16,7±2,08abc
T ₂	4,33±3,78a	4,00±2,00a	14,3±4,04bc	19,0±4,00ab
T ₃	7,00±2,00a	14,6±18,3a	13,0±1,73bc	12,7±4,93bc
T ₄	5,67±2,52a	19,3±4,51a	10,0±3,64c	15,0±6,24bc
T ₅	7,00±1,00a	21,0±16,8a	11,0±1,00c	13,7±7,23bc
T ₆	3,67±23,1a	23,3±23,1a	19,0±1,00a	28,3±8,39a

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en un seul groupe de moyennes dont deux traitements, T₃ (7,00±2,00) et T₅ (7,00±1,00) équivalents, se démarquent des autres traitements en nombre de graines de haricot par pot.

La même approche analytique appliquée à la récolte de décembre 2023 place également les différents traitements granulométriques testés en un seul groupe de moyennes homogènes. Les trois traitements de tête sont constitués, dans l'ordre décroissant par les traitements T₆ (23,3±23,1), T₅ (21,0±16,8) et T₄ (19,3±4,51). Les plus faibles valeurs de nombre de graines par pot sont enregistrées par les traitements T₂, T₀ et T₁. L'on note une augmentation globale de production du nombre de graines de haricot par pot par rapport à la première récolte (septembre 2023), et ce pour tous les traitements, particulièrement pour les traitements T₄ (trois fois), T₅ (trois fois) et T₆ (six fois).

A la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place le nombre de graines par pot dans quatre groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₆ (19,0±1,00), suivi de T₁ (17,3±2,08). Le traitement témoin T₀ enregistre le plus faible nombre de graines par pot. En comparaison avec la précédente récolte, exception faite des traitements T₁ et T₂, tous les autres traitements ont été caractérisés par des chutes en nombre de graines par pot, variant de 10% (T₃) à 80% (Témoin T₀).

A la dernière récolte du haricot de juin 2024, quatre groupes de moyennes (chevauchants) de nombre de graines de haricot par pot, avec en tête le traitement T₆ (28,3±8,39), suivi d'assez loin par le traitement T₂ (19,0±4,00).

La plus basse valeur de nombre de graines de haricot par pot a été enregistrée logiquement avec le traitement témoin T₀ (3,67±1,53). La comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales dans l'évolution de la production de biomasse de haricot. On remarque une augmentation continue (parfois lente) du nombre de graines de haricot par pot pour les traitements T₁, T₂ et T₆, et dans une moindre mesure le traitement T₃, entre les récoltes de septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024. De l'autre côté se remarque une évolution plutôt en dents de scie, particulièrement pour les traitements T₀, T₄ et T₅. Comme indiqué pour le cas du nombre de gousses de haricot par pot, cette évolution en dents de scie du nombre de graines de haricot par pot est à lier avec la dynamique du pH du sol, telle qu'illustrée par la figure 4.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et le nombre de graines de haricot par pot permet d'établir le tableau 23 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en deux groupes de moyennes chevauchants. En bas du classement se retrouvent globalement les traitements associés aux deux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023).

De l'autre côté, en tête se retrouve un certain nombre de combinaisons associées aux récoltes de juin 2024, décembre 2023 et même février 2024. Les 8 meilleures combinaisons traitement-date de récolte correspondantes sont constituées dans l'ordre décroissant par : T_6 x Juin 2024, T_6 x Décembre 2023, T_5 x Décembre 2023, T_4 x Décembre 2023, T_2 x Juin 2024, T_6 x Février 2024, T_1 x Février 2024 et T_1 x Juin 2024.

Une observation intéressante à relever est que le traitement témoin T_0 est systématiquement au bas de l'échelle de classement pour tous les paramètres appréhendés au cours de cette étude en conditions contrôlées sur l'effet de la granulométrie. Nous en concluons que l'application de la dolomie est cruciale pour la gestion des sols acides du Burundi, comme celui utilisé dans la présente expérimentation.

Tableau 23. Effet de l'interaction traitement x période sur le nombre de graines en g par pot

Traitement et mois	Nombre de graines par pot	Groupes Homogènes
T_6 x Juin 2024	28,3	a
T_6 x Décembre 2023	23,3	ab
T_5 x Décembre 2023	21,0	ab
T_4 x Décembre 2023	19,3	ab
T_2 x Juin 2024	19,0	ab
T_6 x Février 2024	19,0	ab
T_1 x Février 2024	17,3	ab
T_1 x Juin 2024	16,7	ab
T_4 x Juin 2024	15,0	ab
T_3 x Décembre 2023	14,7	ab
T_2 x Février 2024	14,3	ab
T_5 x Juin 2024	13,7	Ab
T_3 x Février 2024	13,0	ab
T_3 x Juin 2024	12,7	ab
T_5 x Février 2024	11,0	ab
T_4 x Février 2024	10,0	ab
T_1 x Décembre 2023	9,33	ab
T_3 x Septembre 2023	7,00	ab
T_5 x Septembre 2023	7,00	ab
T_2 x Septembre 2023	6,50	ab
T_0 x Décembre 2023	6,00	ab
T_4 x Septembre 2023	5,67	ab
T_6 x Septembre 2023	5,50	ab
T_1 x Septembre 2023	4,67	ab
T_2 x Décembre 2023	4,00	ab
T_0 x Juin 2024	3,67	ab
T_0 x Septembre 2023	3,33	b
T_0 x Février 2024	2,00	b

Toutes les analyses séquentielles effectuées pour les différents paramètres visent à démontrer les différences de réactivité des différentes classes granulométriques utilisées dans le cadre de cette expérimentation. Pour le cas du nombre de graines de haricot par pot, cette analyse est appuyée par la figure 2 ci-après. La figure 2 indique que les traitements T_3 , T_4 , T_5 et T_6 (à faible granulométrie) montrent une augmentation du nombre de graines dès le sixième mois après l'application de la dolomie, tandis que les traitements à granulométrie grossière

(T_1 et T_2) atteignent leurs pics neuf mois après le chaulage (février). Des traitements évalués sur les performances de la culture test de haricot, le traitement T_6 est plus persistant. En dehors de la première récolte (septembre 2023), ce traitement produit (en valeur absolue) le plus grand nombre de graines par pot de la culture test de haricot.

Nombre de grains récoltés par traitement

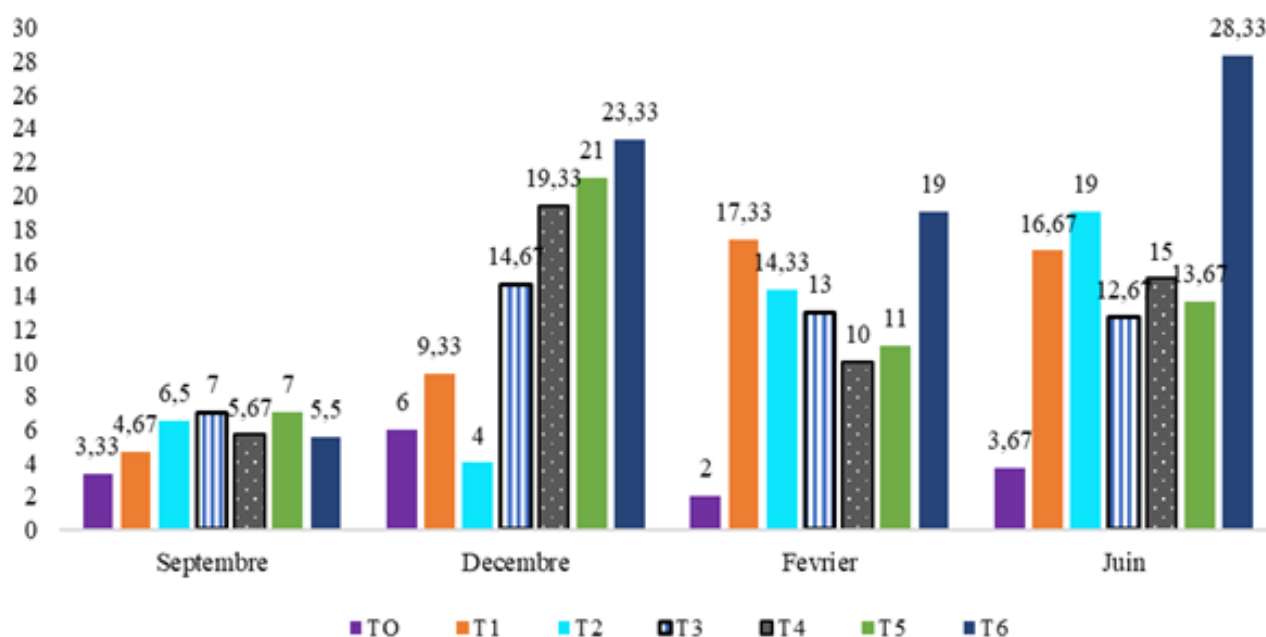


Figure 5. Effet des classes granulométriques sur le nombre de graines de haricot en fonction des périodes de récolte.

3.2.6. Poids de 1000 grains de haricot

Le poids de 1000 grains du haricot a fait l'objet d'analyse de la variance considérant les effets traitement, période de mesure (mois) et leur interaction (Tableau 24).

Tableau 24. Analyse de la variance pour le poids de 1000 grains de haricot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr(>F)
Traitement	6	72945	12158	30,2	1,85e-15 ***
Récolte	3	62553	20851	51,9	8,71e-16 ***
Traitement x Récolte	18	95472	5304	13,2	1,16e-12 ***
Résidus	53	21306	402		

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au poids de 1000 grains de haricot a démontré l'existence des effets très hautement significatifs ($p < 0,001$) du facteur traitement, du facteur récolte et de leur interaction sur le poids de 1000 grains de haricot.

Le tableau 25 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour le poids de 1000 grains de haricot

Tableau 25. Poids de 1000 grains de haricot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	195,90±4,44b	211,11±7,74b	124,50±2,83f	188,95±6,53e
T ₁	201,12±3,28b	226,72±2,16b	288,95±0,26bc	295,82±3,94b
T ₂	203,65±5,35b	309,72±24,50a	291,83±5,41b	224,38±1,98c
T ₃	203,41±4,94b	308,33±18,93a	266,17±3,72e	210,67±5,03d
T ₄	213,34±2,79a	299,89±70,99a	285,83±13,72cd	204,65±5,01d
T ₅	233,62±4,74a	318,21±13,79a	281,26±2,25d	190,04±0,88e
T ₆	198,62±5,53b	277,90±64,19ab	325,54±0,92a	355,04±3,67a

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements testés en deux groupes de moyennes homogènes distincts. Ce sont les traitements T₅ (233,62±4,74) et T₄ (213,34±2,79) qui affichent les plus grands poids de 1000 grains de haricot. Ils sont tous significativement supérieurs aux traitements T₁ (201,12±3,28), T₂ (203,65±5,35), T₃ (203,41±4,94), T₆ (198,62±5,53) et T₀ (195,90±4,44). La même approche analytique appliquée au poids de 1000 grains de haricot pour la récolte de décembre 2023 place les différents traitements granulométriques testés en deux groupes de moyennes homogènes distincts. C'est le traitement T₅ (318,21±13,79) suivi des traitements T₂

(309,72±24,50), T₃ (308,33±18,93) et T₄ (299,89±70,99) qui affichent les plus grands poids de 1000 grains de haricot. Ils sont tous les quatre significativement supérieurs aux deux autres traitements T₁ (226,72±2,16) et T₀ (211,11±7,74) qui montrent les plus faibles poids de 1000 grains de haricot. Comme pour les autres paramètres de production du haricot, l'on note une augmentation de poids de 1000 grains de haricot dans tous les traitements, mais plus particulièrement pour les traitements allant de T₂ à T₆.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place les poids de 1000 grains de haricot en trois groupes de moyennes homogènes dont deux sont chevauchants, avec en tête le traitement T₆ (325,54±0,92), qui est le seul à être significativement supérieur aux autres traitements tandis que le traitement témoin T₀ (124,50±2,83) est significativement inférieur à tous les autres traitements.

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, cinq groupes de moyennes (chevauchants) du poids de 1000 grains de haricot sont observés. Le traitement T₆ (355,04±3,67) est significativement supérieur à tous les autres traitements et occupe à lui seul le groupe de tête, le bas de l'échelle est occupé par le traitement témoin T₀ (188,95±6,53).

En termes d'analyse de la tendance évolutive des valeurs de poids de 1000 grains de haricot, une fois de plus, la comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales. D'un côté, les traitements T₀, T₂, T₃ et T₄ suivent une courbe montante puis descendante, avec un pic à la récolte de décembre 2023 ; de l'autre, les traitements restants (T₁ et T₅) voient leurs poids de 1000 grains de haricot progressivement augmenter de la première récolte (septembre 2023) à la quatrième récolte (juin 2024). Ces deux traitements montrent un effet continu et durable des classes granulométriques de dolomie y associées.

L'analyse interactionnelle entre le facteur traitement et la récolte de biomasse racinaire de la culture test de haricot permet d'établir le tableau 26 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en 7 groupes de moyennes chevauchants. Contrairement aux distributions des traitements observés pour les précédents paramètres de croissance et de production de haricot, les valeurs les plus basses de poids de 1000 grains sont quelque peu distribuées entre les périodes de récolte et les traitements, sans nette démarcation. C'est ainsi que les sept combinaisons traitement x récolte avec les plus faibles poids de 1000 grains sont, dans l'ordre croissant, les suivantes : T₀ x Février 2024, T₀ x Juin 2024, T₅ x Juin, T₀ x Septembre, T₆ x Septembre, T₁ x Septembre, T₃ x Septembre.

En gros, le traitement témoin T₀ apparaît comme celui avec moins de performances vis-à-vis de la production de la culture test de haricot. Une démonstration de l'efficacité de l'application de la dolomie sur sols acides, quelle que soit la classe granulométrique considérée.

De l'autre côté, les traitements avec les poids de 1000 grains de haricot les plus élevés, cette fois dans l'ordre décroissant, sont les suivants : T₆ x Juin, T₆ x Février 2024, T₅ x Décembre 2023, T₂ x Décembre 2023, T₃ x Décembre 2023, T₄ x Décembre 2023, T₁ x Juin 2024 et T₂ x Février 2024

Tableau 26. Effet de l'interaction traitement x période sur le poids de 1000 grains du haricot

Traitement et mois	Poids de 1000 grains (g)	Groupes Homogènes
T ₆ x Juin 2024	355	a
T ₆ x Février 2024	325	ab
T ₅ x Décembre 2023	318	ab
T ₂ x Décembre 2023	310	ab
T ₃ x Décembre 2023	308	ab
T ₄ x Décembre 2023	300	ab
T ₁ x Juin 2024	296	ab
T ₂ x Février 2024	292	ab
T ₁ x Février	289	bc
T ₄ x Février	286	bcd
T ₅ x Février	281	bcd
T ₆ x Décembre	278	bcd
T ₃ x Février	266	bcde
T ₁ x Décembre	227	cdef
T ₂ x Juin	224	def
T ₅ x Septembre	214	ef
T ₄ x Septembre	213	ef
T ₀ x Décembre	211	ef
T ₃ x Juin	211	ef
T ₄ x Juin	205	ef
T ₂ x Septembre	204	ef
T ₃ x Septembre	203	ef
T ₁ x Septembre	201	f
T ₆ x Septembre	199	fg
T ₀ x Septembre	196	fg
T ₅ x Juin	190	fg

T ₀ x Juin	189	fg
T ₀ x Février	124	g

3.2.7. Rendement (g/pot) du haricot

L'analyse de la variance (ANOVA 2) appliquée au rendement en grains (g) a démontré l'absence d'effet interactif entre le facteur récolte et le facteur traitement ($p > 0,05$). Par contre, la même analyse des effets très hautement significatifs des facteurs traitement et récolte ($p < 0,001$).

Le tableau 27 en est une illustration.

Tableau 27. Analyse de la variance pour le rendement en de haricot par pot

Source de Variation	DDL	SCE	CM	Valeur F	Pr (>F)
Traitement	6	134	22,4	5,07	0,000354 ***
Récolte	3	94,3	31,4	7,11	0,000421 ***
Traitement x Récolte	18	120	6,67	1,51	0,123507
Résidus	53	234	4,42		

Le tableau 28 ci-après regroupe les traitements testés (différentes classes granulométriques) récolte par récolte en groupes de moyennes homogènes pour le paramètre rendement en grains de la culture test de haricot.

Tableau 28. Effet des traitements sur le rendement en grains (g) par pot

Traitement	Septembre 2023	Décembre 2023	Février 2024	Juin 2024
T ₀	0,66±0,46a	1,28±0,63a	0,167±0,14e	0,88±0,40c
T ₁	0,94±0,31a	2,31±0,46a	4,14±0,47b	4,08±0,38ab
T ₂	0,88±0,78a	1,23±0,47a	3,17±0,82bc	4,77±0,84ab
T ₃	1,42±0,39a	4,76±6,18a	2,88±0,80bcd	3,55±0,97bc
T ₄	1,15±0,52a	5,90±2,17a	1,69±0,68d	4,02±1,08ab
T ₅	1,50±0,23a	6,63±5,15a	1,98±0,03cd	3,39±1,83bc
T ₆	0,73±0,71a	5,55±4,19a	7,74±3,95a	6,84±2,03a

A la première récolte du haricot au mois de septembre 2023, l'analyse de la variance place les traitements en un seul groupe de moyennes dont deux traitements, T₅ (1,50±0,23) et T₃ (1,42±0,39), se démarquent des autres traitements en rendement en grains de la culture test de haricot.

À la deuxième récolte de décembre 2023, l'analyse de la variance montre un seul groupe de moyennes homogènes, dans lequel, les traitements T₅ (6,63±5,15) et T₄ (5,90±2,17) se placent en tête du classement. Par contre, les traitements T₁ et T₂ à côté du traitement témoin (T₀) sont caractérisés par de faibles rendements en grains de haricot par pot au cours de cette deuxième récolte. Il faut aussi noter une augmentation de rendement entre la première récolte de septembre 2023 et la deuxième récolte de décembre 2023.

À la troisième récolte de février 2024, l'analyse de la variance place le rendement en grains de la culture test de haricot dans quatre groupes de moyennes homogènes chevauchants, avec en tête le traitement T₆ (7,74±3,95), suivi de loin par T₁ (4,14±0,47). Comme pour le nombre de graines de haricot, le traitement témoin T₀ enregistre le plus faible rendement en grains par pot. En comparaison avec la précédente récolte, exception faite des traitements T₁, T₂ et T₆, tous les autres traitements ont été caractérisés par des chutes en nombre de graines par pot, variant de 30% (T₄, T₅) à 84% (Témoin T₀).

À la dernière récolte du haricot de juin 2024, trois groupes de moyennes (chevauchants) de rendement en grains de haricot par pot, avec en tête le traitement T₆ (6,84±2,03), suivi d'assez loin par le traitement T₂ (4,77±0,84). De l'autre côté, le plus faible rendement en grains de haricot a été observé logiquement avec le traitement témoin T₀ (0,88±0,40).

Comme pour les précédents paramètres agronomiques, la comparaison des résultats par récolte illustre deux tendances globales dans l'évolution du rendement en grains du haricot. D'un côté, on remarque une augmentation continue (parfois lente) du rendement en grains de haricot par pot pour les traitements T₁, T₂ et T₆ tout au long

des périodes de récolte. De l'autre côté, se remarque une évolution plutôt en dents de scie pour tout le reste des traitements.

L'analyse de l'interaction entre le facteur traitement et le rendement en grains de haricot par pot permet d'établir le tableau 29 ci-après. L'analyse de la variance groupe les traitements binômes en deux groupes de moyennes chevauchants. En bas du classement se retrouve globalement les traitements associés aux deux premières périodes d'expérimentation (septembre et décembre 2023) et au traitement témoin T_0 .

De l'autre côté, en tête se retrouve un certain nombre de combinaisons associées aux récoltes de juin 2024, décembre 2023 et même février 2024. Les 5 meilleures combinaisons traitement-date de récolte sont constituées dans l'ordre décroissant par : T_6 x Février 2024, T_6 x Juin 2024, T_5 x Décembre 2023, T_4 x Décembre 2023, T_6 x Décembre 2023

Tableau 29. Effet de l'interaction traitement x période sur le rendement en grains par pot

Traitement et mois	Rendement en grains en g/pot	Groupes Homogènes
T_6 x Février 2024	7,74	a
T_6 x Juin 2024	6,84	ab
T_5 x Décembre 2023	6,64	abc
T_4 x Décembre 2023	5,90	abc
T_6 x Décembre 2023	5,55	abc
T_2 x Juin 2024	4,77	abc
T_3 x Décembre 2023	4,75	abc
T_1 x Février 2024	4,14	abc
T_1 x Juin 2024	4,08	abc
T_4 x Juin 2024	4,02	abc
T_3 x Juin 2024	3,55	abc
T_5 x Juin 2024	3,39	abc
T_2 x Février 2024	3,17	abc
T_3 x Février 2024	2,88	abc
T_1 x Décembre 2023	2,31	abc
T_5 x Février 2024	1,98	abc
T_4 x Février 2024	1,69	abc
T_5 x Septembre 2023	1,50	abc
T_3 x Septembre 2023	1,42	abc
T_0 x Décembre 2023	1,28	abc
T_2 x Décembre 2023	1,23	abc
T_4 x Septembre 2023	1,15	bc
T_1 x Septembre 2023	0,94	bc
T_2 x Septembre 2023	0,88	bc
T_0 x Juin 2024	0,88	bc
T_6 x Septembre 2023	0,73	bc
T_0 x Septembre 2023	0,66	bc
T_0 x Février 2024	0,17	c

D'une manière générale, le constat est que la dolomie à granulométrie fine influence le rendement après trois mois de son application, alors que celle à granulométrie grossière influence le rendement pratiquement 6 à 9 mois après le chaulage. D'où finalement tout l'intérêt de mélanger différents types de granulométrie avec effet durable et échelonné sur la durée. La représentation de la figure 3 ci-après permet de visualiser le comportement des différentes classes granulométriques de dolomie sur 4 périodes de récolte successives.

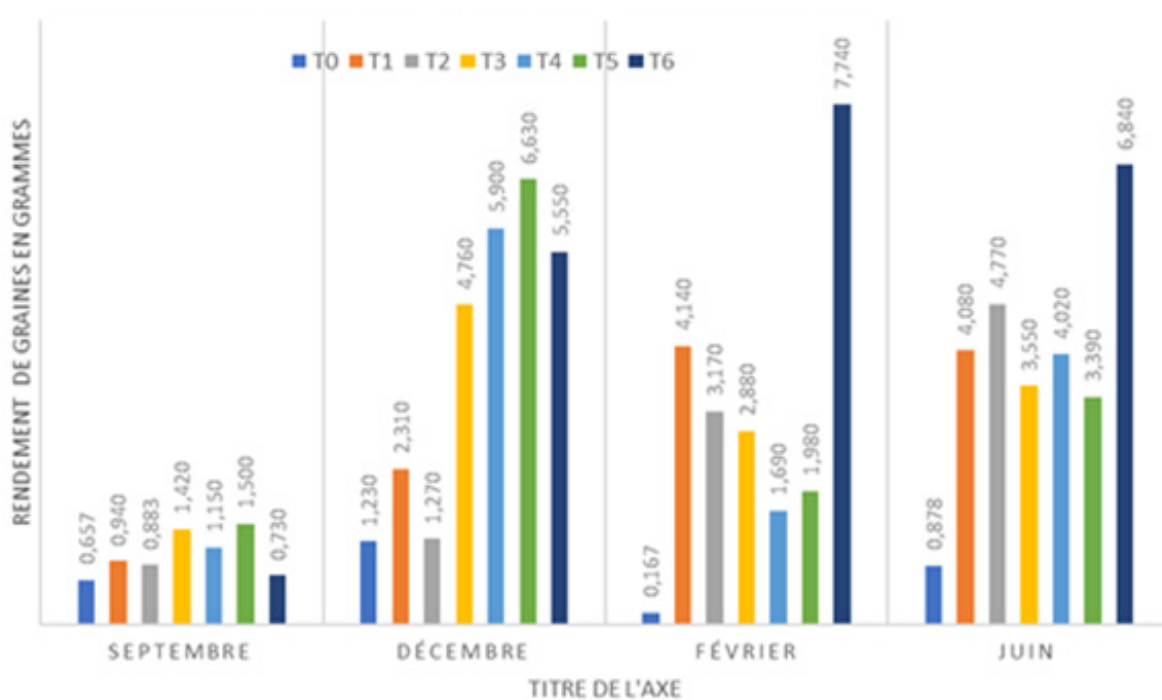


Figure 3. Effet des classes granulométriques sur le rendement en grains (g) de haricot en fonction des périodes de récolte.

Cette figure démontre l'effet en dents de scie des traitements testés sur le rendement en grains de haricot observé pour tous les traitements, à l'exception du traitement T6 qui maintient un rendement croissant et persistant de la seconde à la quatrième récolte.

Les résultats issus des expérimentations ayant fait l'objet de la présente étude, particulièrement sur les paramètres agronomiques, corroborent ceux d'un certain nombre de chercheurs. Une expérience menée par Fageria et Stone (2006) sur des sols tropicaux acides a montré que l'application de dolomie a réduit la toxicité aluminique, augmentant ainsi le développement racinaire et la biomasse des légumineuses. Accepté que l'acidité affecte la disponibilité du P en le fixant sous forme de phosphates insolubles d'aluminium et de fer, de la sorte, en augmentant le pH, la dolomie libère le phosphore assimilable,

un élément essentiel pour le métabolisme énergétique et la croissance des haricots. Cette assertion scientifique est confirmée par les travaux de Raj et Quaggio (1997) qui ont démontré que l'ajout de dolomie améliore la solubilité des phosphates dans les sols acides. Cette augmentation de la disponibilité en P aura impacté la biomasse et le rendement du haricot dans l'étude qui nous concerne.

D'autre part, une recherche de Caires et al. (2008) a montré que l'amendement calcaire, incluant la dolomie, améliore la concentration en Ca et Mg dans les tissus des légumineuses, augmentant ainsi leur croissance et leur biomasse. Aussi, dans la même ligne, Hungria et al. (2003) ont étudié les effets d'amendements calcaires sur la fixation symbiotique de l'azote du haricot et ont trouvé une augmentation significative de la biomasse due à une meilleure nodulation. Selon Oliveira et al. (2000), l'application de la dolomie sur sols acides améliore la structure du sol en favorisant la floculation des argiles, augmentant ainsi l'aération et l'infiltration de l'eau. Ces améliorations physiques favorisent la croissance racinaire et la biomasse. Cette recherche a été aussi confirmée par Stenberg et al. (2000). Ces derniers auteurs ont montré qu'un sol amendé avec de la dolomie avait une meilleure porosité et perméabilité, ce qui aurait aussi contribué à la croissance racinaire et la biomasse du haricot.

Travaillant sur une culture d'ananas, Cahyono et al. (2019) stipulent que la dolomie provoque l'augmentation du pH du sol et des nutriments du sol tels que Ca et Mg, la diminution considérable des éléments toxiques comme le Fe et l'Al accompagnée par une meilleure croissance de la culture d'ananas (*Ananas comosus* L.).

La problématique de l'acidité des sols et de sa gestion fait partie de nombreux travaux et publications à différents niveaux effectués par l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU), la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) et l'IFDC depuis près de 40 ans (Wakana, 1984 ; Wouters et al., 1985 ; Bacanamwo, 1987 ; Schalbrock et Opdecamp, 1987 ; Ntiburumusi, 1989 ; De Keyser, 1991 ; Shehata, 1991 ; Hicintuka et Masilya, 2013 ; Bizimana,

2003 ; Nimubona, 2005 ; Ndayishimiye, 2007 ; IFDC/Catalist, 2008 ; Niyungeko et Ntitandekura, 2008 ; Kaboneka, 2019 ; Kaboneka et al., 2019 ; Kaboneka, 2020 ; Kaboneka et al., 2020 ; IFDC/PAGRIS, 2022 ; Niyonsaba, 2022). La problématique de l'acidité des sols s'inscrit donc très haut dans les stratégies de la gestion intégrée et durable de la fertilité et de la productivité des sols à orientation agricole au Burundi.

Tous ces auteurs se sont intéressés à l'efficacité des amendements calcaires/dolomitiques dans la correction de l'acidité et de la toxicité aluminique, leur arrière-effet sur les cultures successives, les interactions des amendements minéraux et organiques (fumier de vache, fientes de poule) et leurs effets sur la santé du sol (fixation biologique de l'azote atmosphérique et nodulation). Ils concernaient les amendements minéraux avec des granulométries standards connues, à tel point qu'il a été impossible de trouver une recherche qui appuierait les résultats de notre recherche sur l'effet des classes granulométriques de dolomie sur la dynamique des paramètres physico-chimiques du sol et sur le rendement des cultures. Nous considérons cette étude comme une investigation originale au Burundi.

Cependant, une rare référence sur cet aspect d'étude sur les amendements minéraux calcaires/dolomitiques a été trouvée. Elle est de Havlin et al. (2013). Ces auteurs ont relevé que le temps de réaction des amendements calcaires/dolomitiques est fonction de leur distribution granulométrique. Il est de 24 mois pour des granulométries entre 0,5 et 2 mm de diamètre, 12-18 mois pour des granulométries entre 0,2 et 0,5 mm de diamètre, et de 9 mois pour des granulométries entre 0,01 et 0,25 mm de diamètre.

Insistant sur le fait que le temps de réaction et l'efficacité des amendements calcaires/dolomitiques sont contrôlés par leurs compositions chimiques, la profondeur d'incorporation, l'humidité du sol et son niveau d'acidité, mais également et de manière déterminante leur distribution granulométrique, ces investigateurs ont rapporté les résultats suivants : (i) pour des amendements calcaires/dolomitiques de 0,1 mm (et légèrement plus), partant d'un pH original (proche de celui du sol utilisé dans notre étude), les valeurs de pH du sol sont de 5,5, 6,3, 6,6 et 6,3 après 6, 12, 18 et 24 mois d'incorporation ; (ii) pour les amendements de 0,25 mm de diamètre, pour la même période d'investigation, ces valeurs de pH sont 5,2, 5,6, 6,0 et 6,1 ; (iii) pour la catégorie de 0,5 mm, l'évolution du pH était : 4,9, 5,3, 5,5 et 5,6 ; (iv) l'évolution du pH est plus lente pour la classe granulométrique autour de 1 mm, puisqu'elle était la suivante : 4,8, 4,9, 5,0 et 4,9 après 6, 12, 18 et 24 mois.

Bien que la présente étude n'ait duré que 12 mois, ses résultats sont en parfaite harmonie avec l'étude originale rapportée par Havlin et al. (2013).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le contexte des sols dégradés et acides du Burundi, caractérisés par une faible disponibilité des éléments nutritifs, l'amendement de ces sols est essentiel pour une agriculture durable. Les analyses du pH, de l'acidité échangeable et du phosphore assimilable ont été effectuées après chaque récolte (septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024) dans le sol de différents pots dans le laboratoire accrédité de l'ISABU. Quatre récoltes de haricot ont permis d'évaluer les paramètres de croissance et de rendement. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA), réalisée avec RStudio, ont révélé que les granulométries fines (0,05 à 0,5 mm) corrigent rapidement le pH, tandis que les granulométries grossières ont un effet plus progressif, suggérant une dissolution lente. Ces mêmes résultats montrent que la granulométrie de la dolomie joue un rôle clé dans la gestion de l'acidité du sol. Une stratégie mixte, combinant des particules fines et grossières, pourrait optimiser la correction du pH sur plusieurs cycles culturaux. C'est la stratégie actuelle de chaulage et de correction des sols acides au Burundi. De ce fait, les résultats obtenus confirment l'hypothèse n°1 qui stipule que les différentes classes granulométriques de la dolomie auront des effets distincts sur la variation du pH du sol.

Par contre, l'analyse de variance ne confirme pas de manière nette l'hypothèse n°2 qui stipule que les classes granulométriques de la dolomie évaluées affectent différemment l'acidité aluminique du sol. Néanmoins, de manière globale, la teneur en P assimilable augmente de plus de 4 mg/kg dans les trois mois suivant l'application de la dolomie et continue de progresser jusqu'à 12 mois, durée totale de l'expérimentation, où elle atteint 20-25 mg/kg de P assimilable, synonyme de niveau médiocre de disponibilité en P du sol, selon Tessens et Gourdin (1993). Par contre, tous les traitements ont réduit significativement l'acidité aluminique, jusqu'à des valeurs proches de 0 méq/100 g de sol.

Pour ce qui est de l'effet différentiel des classes granulométriques de dolomie sur les performances agronomiques de la culture test de haricot, les traitements T_3 (0,25 mm), T_4 (0,1 mm), T_5 (0,05 mm) et T_6 (produit commercial) montrent une augmentation du nombre de graines dès le sixième mois après le chaulage, tandis que les traitements

à granulométrie grossière (T_1 et T_2) atteignent leurs pics neuf mois après le chaulage (février). Les traitements avec de la dolomie à granulométrie fine, tels que T_5 (0,05 mm), se distinguent par un poids élevé de mille graines 6 mois après le chaulage.

En revanche, la dolomie à granulométrie grossière, à l'exemple de T_1 (1 mm), n'entraîne une augmentation significative du poids de mille graines que lors des deux dernières récoltes (février et juin 2024), c'est-à-dire 9 mois après le chaulage. Ces résultats confirment la quatrième hypothèse. La principale observation de cette étude est que c'est le traitement à granulométrie mixte (T_6) qui se révèle particulièrement performant, notamment une année après l'application de la dolomie, démontrant un effet durable et équilibré sur la production, recherché par la pratique de chaulage. En perspective, même si les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents, une vérification en milieu réel sur une plus longue durée (2 ans au moins) est souhaitable pour leur validation en milieu réel. D'autre part, une étude comparative en champ des différents types de dolomie en distribution au Burundi s'avère nécessaire pour établir la meilleure granulométrie, tant et si bien que ces types de dolomie sont caractérisés par des proportions granulométriques variées, suivant le fournisseur.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants vis-à-vis du projet PAGRIS/IFDC pour avoir financé la recherche sur la dolomie et pour avoir facilité la dissémination des résultats durant le Forum sur la Dolomie et la Correction de l'Acidité des sols au Burundi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES/LECTURES RECOMMANDEES

1. Alexandratos N. 2010. World Agriculture to Wards 2010. Overview of a FAO study. 51p
2. Altieri M. A. 2009. Agroecology, small farms, and food sovereignty. *Monthly Review*, 61.
3. Altland J. E., et Jeong K. Y. 2016. Dolomitic Lime Amendment Affects Pine Bark Substrate pH, Nutrient Availability, and Plant Growth : A Review. *HortTechnology*, 26(5), 565-573. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH03465-16>
4. Andjelic D.T. 1990. Soil organic matter – from structure to environmental role. 11p
5. Barber S. A. 1984. Liming materials and practices. *Soil acidity and liming*, 12, 171-209.
6. Barrow N.J. et Hartemink A.E. 2023. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. *Plant Soil* 487, 21–37 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
7. Ayadi A., David P., Arrighi J.-F., Chiarenza S., Thibaud M.-C., Nussaume L. et Marin E. 2015. Reducing the Genetic Redundancy of Arabidopsis PHOSPHATE TRANSPORTER1 Transporters to Study Phosphate Uptake and Signaling. *Plant Physiology*, 167(4), 1511-1526. <https://doi.org/10.1104/pp.114.252338>
8. Bacanamwo M. et Ruyikiri E. 1987. Etude des amendements calco-magnésiens dans la fertilisation des sols acides. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 149 p.
9. Bernard V., Amede T., Bationo A., Bindraban P., Breman H., Couedel A., Chivenge P., Corbeels M., Dobermann A., Fatunbi W., Giller K., Harawa R., Kamau M., Merckx R., Palm C., Powlson D., Rusinamhodzi L., Six J., Singh U. et Groot R. 2023. Fertilizer and Soil Health in Africa : The Role of Fertilizer in Building Soil Health to Sustain Farming and Address Climate Change. 76 p
10. Bisoka A. N., et Ansoms A. 2014. Land Grabbing & Power Relations in Burundi : Practical Norms & Real Governance. In A. Ansoms & T. Hilhorst (Éds.), *Losing your Land* (1^{re} éd., p. 125-140). Boydell and Brewer Limited. <https://doi.org/10.1017/9781782043416.007>.
11. Bizimana S. 2003. Effets comparatifs des amendements organiques et calcaires sur la réduction de l'Aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
12. Bloom P. R., Skyllberg U. L., et Sumner M. E. 2005. Soil acidity. In M. A. Tabatabai & D. L. Sparks (Eds.), *Chemical processes in soils* (pp. 411–459). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser8.c8>.

13. Boudot J., Becquer T., Merlet D. et Rouiller J. 1994. Aluminium acidity in declining forests : A general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the Vosges mountains (France). *Annales des sciences forestières*, 1994, 51 (1), pp.27-51. Ffhal-00882931.
14. Brady N. C. et Weil R. R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson
15. Cahyono P., Loekito S., Wiharso D., Afandi, Rahmat A., Nishimura N., Noda K., et Masateru S. 2019. Influence of Liming on Soil Chemical Properties and Plant Growth of Pineapple (*Ananas comosus* L.Merr.) On Red Acid Soil, Lampung, Indonesia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(22), 2797-2803. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1671441>
16. Caires E. F., Barth G., et Garbuio F. J. 2006. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 89(1), 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.006>
17. Christopher F., Ndakidemi P.A., Samuel N. et Mbega E.R. 2022. The current status, farmers' management practices, knowledge, and perceptions of common bean anthracnose in Tanzania. *International Journal of Biosciences (IJB)*. <https://doi.org/10.12692/ijb/20.2.162-175>
18. Chesworth 2008. *Encyclopedia of soil science*. Encyclopedia of earth sciences series, 902p.
19. Colinet G., Gruber W., et Fonder N. 2009. *Les sols : Formation, classification, propriétés*. Presses Agronomiques de Gembloux
20. Conyers M. K., Scott, B. J., et Whitten M. G. 2020. The reaction rate and residual value of particle size fractions of limestone in southern New South Wales. *Crop and Pasture Science*, 71(4), 368-378.
21. De Keyser S. 1991. Les problèmes de l'acidité et de la toxicité aluminique et les techniques de leur correction. Séminaire National sur la Fertilisation des Sols du Burundi. Bujumbura, 10-12 Décembre 1991. p. 46-80.
22. Dinnis E. R. 1994. *Soil science : Methods & applications* D. L. Rowell, Longman Scientific & Technical, Longman Group UK Ltd, Harlow, Essex, UK (co-published in the USA with John Wiley & Sons Inc. New York), 1994, x + 350 pp £19.99 ISBN 0-592-087848. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 66(4), 573-574. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740660423>
23. Fageria V. D. 2001. Nutrient Interactions in Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 1269-1290.
24. Fageria N. K. et Stone L. F. 2006. "Influence of liming on root growth, nutrient uptake, and yield of common bean in an oxisol." *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(7-8): 1303-131
25. Fageria N. K. et Baligar V. C. 2008 . Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy* 99: 345-399.
26. Félix-Faure B., Carrière M. et Kalt S. 2013. Prendre en compte tous les indicateurs de l'acidité des sols pour l'interprétation et le conseil.
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (Éd.). 2017. *The future of food and agriculture : Trends and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
28. Gitari H.I., 2009. Lime and manure application to acid soils and their effects on bio-chemical soil properties and maize performance at kavutiri - embu county. p 74
29. Gaudron J.P. 2016. *R Commander : Petit guide pratique*. Statistiques de base. 129p
30. Gouvernement du Burundi (2023). *État de la sécurité alimentaire au Burundi : Analyse globale de la vulnérabilité, de la sécurité alimentaire et de la nutrition au Burundi (AGVSAN 2023)*. Programme Alimentaire Mondial. URL
31. Hassett J. J. et Banwart W. L. 1992. *Soils and their environment* (pp. viii+-424).
32. Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L. et Beaton J.D. 2013. *Soil fertility and fertilizers : An introduction to nutrient management*. 8th ed. Prentice Hall

33. Hicintuka C. et 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, Article Hors-série 17. <https://doi.org/10.4000/vertigo.13898>
34. Hue N. V. 2008. Development, impacts and management of soil acidity in hawaii.
35. Hue N. V., Craddock G. R. et Adams F. 1986. Effect of Organic Acids on Aluminum Toxicity in Subsoils. Soil Science Society of America Journal, 50(1), 28-34. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010006x>
36. Hue N. V. et Mai Y. 2002. Manganese Toxicity in Watermelon as Affected by Lime and Compost Amended to a Hawaiian Acid Oxisol. HortScience, 37(4), 656-661. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.4.656>
37. Hungria M. et Vargas M. A. T. 2000. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. Field Crops Research 65(2000), 151-164.
38. IFDC/Catalist. 2008. Solving agricultural problems related to soil acidity in Central Africa's Great Lakes Region. Kigali, Rwanda. 138 p.
39. IFDC/PAGRIS 2022. Rapport de mission : Etude de faisabilité pour le renforcement de la filière « amendement calcaire / dolomie » au burundi. 114 p.
40. ISABU 2014. Bulletin trimestriel n°2, janvier-Mars.
41. ISABU 2021. Cartographie de la fertilité des sols du Burundi
42. Johan P. D., Ahmed O. H., Omar L., et Hasbullah N. A. 2021. Phosphorus Transformation in Soils Following Co-Application of Charcoal and Wood Ash. Agronomy, 11(10), 2010. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>
43. Junior E. C., Gonçalves Jr, A. C., Seidel E. P., Ziemer G. L., Zimmermann J., Oliveira V. H. D. D., Schwantes D. et Zeni C. D. 2020. Effects of Liming on Soil Physical Attributes : A Review. Journal of Agricultural Science, 12(10), 278. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n10p278>
44. Kaboneka S. 2019. Problématique de l'acidité des sols au Burundi : aspects généraux et normes de correction. Atelier national sur la problématique d'acidité du sol et restitution des cartes d'acidité du sol des communes d'action du PAPAB. Bujumbura. 12/11/2019 (Hôtel City Hill). 30-31/12/2019 (Détente).
45. Kaboneka S. 2019. Problématique, conséquences et moyens de correction naturelle de l'acidité du sol. Chroniques Environnement Radio Isanganiro. Diffusion/Rediffusion : 18/1, 25/1, 1/2, 22/2, 1/3/ et 8/3/2019.
46. Kaboneka S., A. Niyongabo et S. Nijimbere 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. Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles. Volume 28 : 9-15. Site: <http://revue.ub.edu.bi/JUB>
47. Kaboneka S. 2020. Acidité des sols : causes, conséquences et techniques de correction. IN atelier de réflexion sur la « Problématique de l'acidification des sols au Burundi : contexte et enjeux » organisé par le Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et environnementales (CRAVE) et le Forum des Organisations de Producteurs Agricoles du Burundi – Ijwi ry'Abarimyi. Bujumbura, Royale Palace. 24 mars 2020.
48. Kaboneka S., Ndayishimiye D., Nibasumba A. and Bizimana S. 2024. Comparative liming power of chicken manure and selected dolomitic sources on an acidic high altitude Burundi surface soil. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). Volume 10(6) : 38-52. ISSN : 2454-8006. Doi : 10.31695/IJASRE. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2024.6.5>.
49. Kamprath E. J. 1970. Exchangeable Aluminum As a Criterion for Liming Leached Mineral Soils. Soil Science Society of America Journal, 34(2), 252-254. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020022x>
50. Keringingo T. et kayakayaci Z. 2023. Agricultural Land Access and Use in Burundi, East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences.
51. Kibiriti J., Ndayiragije S., Gourdin J., Hollebosch P. 1986. Analyse des bases échangeables, de la capacité d'échange cationique et de l'acidité échangeable. Institut des Sciences Agronomiques du Burundi. Fiche labo N° 01

52. Kouassi A. G., Brahim K., Bolou-Bi E. B. et Yao-Kouamé A. 2024. Distribution de l'aluminium échangeable et total dans les sols des agrosystèmes à base de Cacaoyer dans les régions du centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, 6(4), 54-61. <https://doi.org/10.4314/rafea.v6i4.6>
53. Lindsay W. L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons
54. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Buendía E. C., Shukla P. R., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Pereira J. P., Vyas P., Huntley E. et Malley J. 2020. Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. Résumé à l'intention des décideurs
55. Meda A. R., Pavan M. A., Cassiolato M. E. et Miyazawa M. 2002. Dolomite lime's reaction applied on the surface of a sandy soil of the Northwest Paraná, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45(2), 219-222. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132002000200014>
56. Morrison J. 1800. Lime and dolomite.
57. Ndayishimiye D. 2007. Effets comparatifs de trois amendements calco-magnésiens sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du Mugamba (Gisozi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
58. Nduwimana E., Ntukamazina N., Nijimbere B., Niyoyankunze J.M.V., Ndabashinze B., Nnyetereye P., Ndikumana J., Nsengiyunva A., Nshimirimana I. et Emerusenge E. 2020. Référentiel des variétés de haricot en diffusion au Burundi. Deuxième édition.
59. Nimubona L. 2005. Effets de l'application de différents fumiers et du calcaire sur la dynamique de l'aluminium échangeable de deux sols d'altitude du Burundi. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
60. Niyonsaba M.V. 2022. Effet de la dolomie sur la nodulation et le rendement de soja, variété Yezumutima. Mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement. Option Génie de l'Environnement. Faculté des Sciences. Université du Burundi.
61. Niyungeko A. et S. Ntirandekura. 2008. Effet interactif du fumier de poule et de la chaux sur la correction de la toxicité aluminique d'un sol du Mugamba (Gisozi). Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université du Burundi.
62. Nkhata W., Shimelis H., Melis R., Chirwa R., Mathew I., Shayanowako A., et Mzengeza T. 2021. Assessment of smallholder farmers' awareness of bean fly (*Ophiomyia* spp.) and management practices in central and northern Malawi : Implications for resistance breeding. *Crop Protection*, 139, 105353. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105353>
63. Ntiburumusi F. 1989. Arrière-effet du chaulage sur la productivité d'un kaolisol humifère dans la région naturelle du Mugamba (Burundi). Publication ISABU N° 135.
64. Oliveira A. P. et Zambrosi F. C. B. 2000. Effects of soil liming on physical properties and its relationship with plant growth." *Brazilian Journal of Soil Science*, 24(3) : 465-472.
65. Plan National de Développement du Burundi 2018-2027. 2018. PND BURUNDI 2018-2027.
66. Polania J., Poschenrieder C., Rao I. et Beebe S. 2015. Physiological basis of improved adaptation to drought in common bean. International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Autonomous University of Barcelona
67. Raj B. V. et Quaggio J. A. 1997. Methods of soil analysis used in fertility evaluation in Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(7-8) : 681-692.
68. Razafintsalama H. 2018. La culture du haricot (*phaseolus vulgaris* L.) dans le moyen ouest du Vakinankaratra : effets d'apports de phosphore et de l'inoculation par des rhizobia.

69. Rich C. I., et Thomas G. W. 1960. The Clay Fraction Of Soils. *Advances in Agronomy*, 1–39. doi:10.1016/s0065-2113(08)60080-2
70. Robert D. et Harter D. 2007. Les sols acides des tropiques ECHO. Note Technique.
71. Roche P., Grière L., Babre D., Calba H. et Fallavier P. 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux : Appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore.
72. Sadiq G. A., Azizi F., Khaleeq K., Farkhari Z. et Amini A. M. 2023. Effect of Different Seeding Rates on Growth and Yield of Common Bean. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 4(3), 41-45. <https://doi.org/10.32996/jeas.2023.4.3.6>
73. Ségalen P. 1973. L'aluminium dans les sols. Initiations-Documentations Techniques n°22. O.R.S.T.O.M., Paris 1973.
74. Shehata N. 1991. Recherches menées dans le but de l'amélioration des sols acides et/ou alliques d'altitude (p. 93-107). In ISABU. Séminaire national sur la fertilisation des sols au Burundi. Bujumbura, 10 au 12 Décembre 1991. 310 p.
75. Stenberg M., Stenberg B. et Rydberg T. 2000. Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. *Applied Soil Ecology*, 14(2), 135–145. doi:10.1016/s0929-1393(00)00043-3
76. Tahat M. M., Alananbeh K.M., Othman A. Y. et Leskovar I. D. 2020. Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
77. Tessens E., & Gourdin, J. 1993. Propriétés des sols du Burundi: interprétation d'une banque de données pédologiques. IS AB U Publication, 166.
78. The State of Food and Agriculture 2021. FAO. Making agri-food systems more resilient to shocks and stresses. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>
79. Van L. et W. 2018. Soil pH and Lime Requirement Determination. In R. L. Westerman (Éd.), *SSSA Book Series* (p. 73-126). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c5>
80. Wakana M. 1984. Contribution à la définition de la toxicité aluminique des sols humifères d'altitude du Burundi. Mémoire. FACAGRO. Université du Burundi. 108 p.



RECOMMANDATIONS

DU FORUM SUR LA DOLOMIE ET LA CORRECTION DE L'ACIDITE DES SOLS DU BURUNDI

Restaurant La Détente, les 12 et 13 juin 2025

En dates du 12 au 13 juin 2025, il s'est tenu un Forum sur la dolomie et la correction de l'acidité des sols au Burundi dans les enceintes du Restaurant La Détente. Ce Forum a été conjointement organisé par le Centre de recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales (CRAVE) rattachée à la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi (UB) et l'International Fertilizer Development Center (IFDC) dans le cadre du Projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée des Sols (PAGRIS) financé par l'Ambassade des Pays - Bas au Burundi. L'objectif principal de ce Forum est de faire un large état des lieux de tous les travaux déjà effectués à ce jour dans la gestion de l'acidité des sols au Burundi.

Ce Forum a vu la participation d'un public diversifié dont les représentants de services publics et privés intéressés par le secteur agricole (UB, IFDC, ISABU, MINEAGRIE, ONGs, etc.), un représentant de la Primature et un représentant de l'OBM. Ce forum a été couvert par divers médias (RTNB, Radiotélévision Isanganiro, BNP-magazine, Service communication de l'UB, etc.). La liste des présences est donnée en annexe 1 de ce rapport. Les cérémonies ont commencé par un mot circonstanciel du forum présenté par le Représentant Pays IFDC et Chef de Projet PAGRIS, Monsieur Micael Beun. Ce mot a été suivi par le discours d'ouverture du Forum prononcé par Prof David Nahimana, Directeur de la Recherche et de l'Innovation de l'UB, qui a représenté le Recteur de l'UB empêché. Les participants ont par la suite suivi des présentations qui ont fait l'objet des échanges, commentaires et discussions. D'autres activités ayant marqué le Forum sont notamment la présentation des témoignages (de la part d'une agricultrice et du Directeur du BPEAE de Ruyigi) sur la dolomie et la lecture des recommandations. Les activités du Forum ont été clôturées par un discours présenté par le Directeur de la Fertilisation des sols/MINEAGRIE.

1. Déroulement du Forum

1.1. Discours d'ouverture du Forum

Les activités ont d'abord commencé par un mot circonstanciel du forum présenté par le Chef de Projet PAGRIS, Monsieur Micael Beun. Dans ses propos, il a signalé que la protection et la gestion du capital sol constitue un enjeu majeur pour une agriculture durable notamment dans le contexte du Burundi, pays à forte densité de population vivant majoritairement de l'agriculture et où le capital sol est soumis à de nombreux défis au nombre desquels on peut citer l'exiguïté et surexploitation des terres, la dégradation des sols due à la diminution du couvert végétal et

l'acidification des sols et l'augmentation de la toxicité aluminique. Il a également indiqué que dans un objectif d'améliorer durablement la sécurité alimentaire des ménages agricoles burundais, l'IFDC met en œuvre deux projets complémentaires à savoir le projet PAGRIS (Projet d'Appui pour une Gestion Responsable et Intégrée des Sols) et le projet PSSD (Private Seed Sector Development), tous financés par l'Ambassade du Royaume des Pays-Bas au Burundi. A travers ces projets, IFDC apporte son soutien dans le secteur de la recherche, dans l'accompagnement des ménages agricoles, dans l'appui du secteur privé et le développement des marchés ainsi que dans le développement d'un environnement favorable. Clôturant son discours, Monsieur Micael Beun a salué la bonne collaboration d'une part entre le Gouvernement du Burundi à travers le MINEAGRIE/DFS et IFDC, et d'autre part entre IFDC et l'Université du Burundi à travers l'ensemble des travaux menés conjointement avec la FABI notamment ainsi que pour l'organisation de ce Forum d'importance capitale pour une agriculture durable au Burundi. Il a également salué la bonne collaboration et l'engagement des organisations partenaires qui ont significativement contribué à l'atteinte des résultats du projet pilote dolomie.

Le discours d'ouverture a été prononcé par Prof David Nahimana, Directeur de la Recherche et de l'Innovation de l'UB, qui a représenté le Recteur de l'UB empêché. Il a signalé que ce Forum, tenu pour une durée de deux jours du 12 au 13 juin 2025, est un deuxième cadre technique d'échanges, cette fois sur la problématique de la dolomie et la correction de l'acidité des sols au Burundi, après le Forum sur l'érosion hydrique au Burundi, tenue dans les enceintes du Restaurant La Détente, en dates des 24-25 Janvier 2024. En dehors de l'objectif de partager des résultats des recherches menées au sein de l'UB avec la société, il a indiqué que ce Forum rentre dans l'exécution de la mission qui revient à l'Université du Burundi, KAMINUZA MPANUZI, RUMURI RUMURIKIRA ABARUNDI, appelée à éclairer scientifiquement et techniquement les décisions des autorités du Burundi dans divers domaines de la vie socio-économique. Toujours dans ses propos, il a rappelé que le sol constitue le premier capital productif de l'agriculture, ici au Burundi et bien au-delà et que la protection et la gestion durable de ce capital « sol » constitue un enjeu prioritaire et majeur pour prétendre augmenter les rendements agricoles et les revenus, et améliorer de manière durable les conditions de vie des ménages ruraux agricoles. Dans ce même ordre d'idée, il a également rappelé que la grande partie des sols du Burundi sont dégradés par acidification et très désaturés en bases (Ca, Mg et K), très bourrés en Aluminium et pauvres en éléments nutritifs, en accord aux résultats d'une étude cartographique conduite par l'ISABU sous financement du Projet PAGRIS de IFDC qui a révélé que 73 % des sols du Burundi sont acides. Par la même occasion, il a signalé que la réaction acide du sol affecte autant les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols et qu'en conséquence elle induit une série de contraintes à la croissance, la productivité et la production des plantes, aussi bien en terme quantitatif que qualitatif. Comme la majeure partie de la population burundaise (plus de 90%) vit du secteur agricole, on est dans l'obligation d'exploiter les sols burundais pour l'agriculture malgré leur extrême acidité en procédant à la correction de cette forme de dégradation chimique, a toujours martelé le représentant du Recteur de l'UB. Avant de clore son allocution, il a indiqué qu'au niveau de l'UB, l'organisation de ce Forum, constitue, à coup sûr, une contribution significative du projet PAGRIS/IFDC à la politique nationale de gestion rationnelle des terres agricoles, garantie d'un Burundi Emergeant en 2040 et d'un Burundi Développé en 2060. Pour clore son discours, il a réitéré ses vifs remerciements à l'égard des organisateurs de ce Forum, sur la Dolomie et l'Acidité des sols au Burundi. L'intégralité du discours d'ouverture est donnée en annexe 2 de ce rapport.

1.2. Présentations

Au total 12 présentations ont été faites. Le thème et l'aperçu sur le contenu de chaque présentation sont repris ci-dessous.

1.2.1. Acidification et acidité des sols: mécanismes d'action et principes de gestion

Ce thème a été présenté par Prof Kaboneka Salvator, enseignant-chercheur à la FABI/UB. Il a démontré, à base d'une carte de répartition des sols acides dans le monde que la problématique d'acidité des sols ne concerne pas seulement le Burundi mais qu'elle est à l'échelle internationale, d'où la réflexion à ce sujet est de tout le monde. Il a également articulé sa présentation sur les éléments suivants :

- pH du sol ;
- éléments nutritifs et pH du sol
- Quelques principes de base sur les processus d'acidification et l'alcalinisation du sol ;

- Processus qui diminuent le pH du sol ;
- Processus qui augmentent le pH du sol ;
- Mécanismes de contrôle de l'acidité/basicité du sol ;
- Engrais acidifiants (exemples : DAP, urée, Sulfate d'ammonium) et leurs réactions dans les sols;
- Quantité de chaux-corréction de l'acidité résiduelle des engrais N/S ;
- Effet de l'acidité des sols sur la physiologie et la nutrition des plantes ;
- Rôle de la fertilisation organo-minérale dans la séquestration ou chélation de l'Aluminium et du Fer dans la libération du Phosphore ;
- Liste des recherches sur l'acidité des sols au Burundi ;
- Conséquences chimiques, physiques, biologiques de l'acidité des sols ;
- Estimation des besoins en chaux.

On peut globalement retenir de sa présentation que l'acidité du sol est un problème mondial et qui trouve origine dans les phénomènes naturels et anthropiques. Deux principaux problèmes sont liés à l'acidification des sols : l'érosion hydrique et l'application des engrais acidifiants. Pour une gestion durable des sols acides, l'orateur a donné un conseil scientifique selon lequel chaque fois que l'on applique des engrais acidifiants, il faut toujours les accompagner par une application de la dolomie. Dans ce même contexte, une lutte contre l'érosion à travers l'aménagement des bassins versants est également essentielle.

1.2.2. Gisements calcaires et dolomitiques au Burundi: distribution spatiale quantitative et composition chimique

Ce thème a été présenté par Monsieur Gisanganya Aristide de l'OBM. Introduisant sa présentation, il a commencé par signaler que des travaux de recherches géologiques et minières ont été menés sous la supervision du Ministère en charge de la géologie et des mines du Burundi. Ces travaux ont abouti à la découverte d'indices de diverses minéralisations ou fossiles. Il a donné l'exemple des travaux menés en 1964 par MVERHAEGHE et qui ont mis en évidence l'inventaire des gisements de calcaires, dolomies et travertins du Kivu, du Rwanda et du Burundi. D'autres travaux ont été menés en 1965 par l'expert Géologue Arnaud Waleffe et ont identifié les calcaires dolomitiques dans la région de Rutana-Bukemba. Parlant des résultats issus des travaux de recherche, il a indiqué qu'au Burundi, on enregistre trois sortes de gisements de calcaires: Travertins (liés au volcanisme), Origine ignée (pas très intéressante) et Sédimentaires (les plus nombreux). Ces gisements sont répartis dans trois régions géographiquement distinctes, à savoir: région du Nord-Ouest du pays Buganda/Cibitoke et Gihanga/Bubanza, région nord à Busiga/Ngozi et la région de Mosso/Rutana. Dans la région Nord-Ouest, on y trouve deux types de calcaires: des travertins dans toute la plaine (à Gihanga et à Cibitoke) et des calcaires métamorphiques dans les collines au Nord de Bubanza. Dans la région de Busiga (Ngozi), on y trouve des calcaires travertins sur la rive droite du marais Kagisa. Dans la région de Mosso, on y trouve des calcaires dolomitiques appelés «calcaires de Musasa ». Les essais faits par l'ISABU ont confirmé que la chaux et les engrais chimiques issus des roches calcaires dolomitiques de Mosso (Murama et de Butare) donnent de bons résultats dans l'agriculture. Présentant les résultats des analyses quantitatives et qualitatives des calcaires dolomitiques des gisements du Burundi, le présentateur a renseigné sur un stock estimé à 100.000 tonnes (avec une teneur d'environ 45 % de CaO et 1% de MgO) à Busiga ; 2,2 MT (avec une teneur d'environ 40,32% de CaO et 2,2 % de MgO) à Gihanga-Cibitoke et un stock estimé à 9 MT (avec une teneur d'environ 29,6 % de CaO et 19,8 % de MgO) à Mosso.

1.2.3. Utilisation agricole de la dolomie au Burundi : Evolution des statistiques dans l'espace et dans le temps

Ce thème a été présenté par Monsieur Sibomana Venant, Directeur de la Fertilisation des Sols au MINEAGRIE. Selon l'orateur, la dolomie utilisée au Burundi est produite par des usines locales et la matière première provient principalement des provinces de Cibitoke et Rutana. Actuellement, six usines (ITRACOM, STONE SOCIETY, AB GEOSCIENCE, ESE NGENDAKUMANA, EFCCO, DOLO PRODUCTION COMPANY) installées à Bujumbura ont signé des contrats de fournitures de la dolomie dans le cadre du Programme National de Subvention des Engrais au Burundi (PNSEB) et du Projet Pilote Dolomie de IFDC.

A titre informatif, le potentiel de production annuelle de la dolomie de ces usines pour la période 2024-2025 est estimé à 158 400 tonnes. La distribution de la dolomie se fait chaque saison agricole suivant le calendrier agricole établi par le MINEAGRIE au niveau de 368 zones de distribution dans le pays. Les bénéficiaires de la dolomie sont ceux qui ont pu payer l'avance une somme de 5000 BIF pour un sac de 50 kg. Avant le PNSEB, le niveau d'utilisation de la dolomie au niveau national n'atteignait pas 2000 tonnes par an. Ce n'est qu'en 2011 que la distribution a atteint 4 070 tonnes. Au cours des 5 dernières années, il est observé une évolution des quantités de dolomie distribuée selon les provinces du pays. A l'échelle nationale, les quantités de dolomie distribuées au cours des 5 dernières années ont passé de 9000 Tonnes à 38000 Tonnes par an. Clôturant sa présentation, le présentateur a parlé de trois défis majeurs rencontrés dans le secteur dolomie : le retard dans la livraison et la distribution de cet amendement, le fait que les usines de production de la dolomie soient installées loin des sites d'extraction et l'existence de très peu de partenaires dans le secteur dolomie.

1.2.4. Acquis de la recherche sur la chaux/dolomie au Burundi : Expériences de l'ISABU et de la FACAGRO/FABI-Université du Burundi

Ce thème a été présenté par Prof Kaboneka Salvator. Dans sa présentation, il a montré une longue liste de travaux de recherches sur la chaux/dolomie qui ont été exécutés par l'ISABU et la FACAGRO/FABI-UB (près de 40 travaux). Des résultats de certaines études ont été présentés pour montrer l'importance agronomique de l'application la chaux/dolomie. On peut citer les cas de résultats des études suivantes :

- Coût agronomique de l'inaction : réponse du soja aux doses croissantes de dolomie (kg/ha) (FABI, 2021) ;
- Effet combiné Fiente-Chaux-DAP (Sol de Gisozi – prairie à Eragrostis + haricot) ;
- Comparaison Fiente de poule-Amendements calcaires ;
- Essai de chaulage du maïs (T/ha) sur un kaolisol humifère allique (m=75 %) de Gisozi/Mugamba (Shehata N. et JJ Schalbroek, 1984) ;
- Essai de chaulage de la Pomme de terre (T/ha) (arrière effet) sur un kaolisol humifère allique (m=75 %) de Gisozi/Mugamba (Shehata N. et J.J. Schalbroek, 1984) ;
- Essai de chaulage du Petit pois (T/ha) sur un kaolisol humifère moyennement allique (m=42 %) de Munanira/Mugamba (ISABU, 1984) ;
- Arrière effet du chaulage sur le blé (T/ha) en rotation avec la pomme de terre sur un hygroxéro-ferralsol humique légèrement allique (m=49 %) de Kajondi/Bututsi (Rufyikiri G. et P. Hennebert, 1993) ;
- Essai chaulage des rotations manioc-manioc et patate-douce-maïs-haricot (T/ha) sur un hygroxéro-ferralsol humique allique (m=76 %) du Kirimiro (Rufyikiri G. et P. Hennebert, 1993) ;
- Combinaison chaulage/Phosphore de la rotation sorgho-pomme de terre-blé (T/ha) sur un kaolisol humifère de Mahwa/Bututsi (Shehata N. 1992).

Il apparaît des résultats de ces études que l'application de la chaux/dolomie, en association avec d'autres amendements, est d'une contribution importante dans l'augmentation des rendements agricoles des cultures sous analyses et/ou dans l'amélioration des propriétés chimiques des sols.

1.2.5. Contribution de l'International Fertilizer Development Centre (IFDC) à la connaissance de l'état des lieux de l'acidité des sols au Burundi et à sa correction par application de la dolomie.

Ce thème a été présenté par Monsieur Nduwimana Oscar de l'IFDC et chef de Projet Dolomie. Une bonne matière de cette présentation est centrée sur deux points principaux : la cartographie d'acidité des sols- collaboration IFDC et ISABU et la correction de l'acidité des sols à travers le Projet Pilote Dolomie.

Pour contribuer à la connaissance de l'état d'acidité et de fertilité des sols burundais, IFDC a contribué dans la production des cartes d'acidité et de la fertilité produites en 2021 et validées en 2022. Il a souligné que ces cartes de 2021 représentent l'actualisation des cartes produites en 2013. La carte de 2013 renseigne qu'à l'échelle

nationale, 27 % des sols cultivés ont un pH < 5 et 66 % des sols cultivés ont pH < 5,5. Selon cette carte, l'acidité est très marquée dans la région de la Crête Congo-Nil. Quant aux cartes produites en 2021, elles donnent non seulement des informations à l'échelle nationale, mais aussi par zones agroécologiques et par provinces. Elles renseignent que pour l'ensemble du pays, 23,3 % des sols cultivés sont très fortement acides (pH < 5) ; 50,6 % des sols cultivés sont fortement acides (5 < pH < 5,5) ; 21,1 % des sols cultivés sont acides (5,6 < pH < 6) ; 5 % des sols cultivés sont faiblement acides (6,1 < pH < 6,5) ; 1,1 % des sols sont neutres (6,6 < pH < 7,5) et que 0,1 % des sols cultivés sont neutres (pH > 7,5).

Il est indiqué que l'acidification a des effets sur la fertilité biologique du sol (disparition des microorganismes du sol et de la biodiversité en générale), fertilité chimique (non assimilabilité de la plupart d'éléments nutritifs comme N, P, K, S, Zn, B ; excès en H, Al, Fe et Mn ; faible CEC) et sur la fertilité physique (modification de la texture et structure du sol). Dans le contexte du Burundi, les cartes produites par l'ISABU sous financement de l'IFDC en 2013 et 2021 ont montré une carence en phosphore assimilable (85% en 2013 et 98% en 2021), en potassium (30% en 2013 et 90% en 2021), en calcium (68% en 2013 et 45,6% en 2021) et en oligo-éléments (71 % en soufre, > 95% en bore). Au sujet de la contribution de l'IFDC dans la correction de l'acidité des sols du Burundi, il est rapporté que les activités pertinentes sont réalisées, à travers le projet PAGRIS dans sa composante projet pilote dolomie (2023A-2025B) dont l'exécution est en commun accord entre IFDC et le MINEAGRIE à travers la DFS, par amendement calcocalc-magnésien. A titre d'exemples, le projet pilote dolomie est intervenu dans 15 provinces, dans 40 communes et sur 94 collines pour la saison agricole 2025 B. Le nombre de bénéficiaires est d'environ 90.000 ménages au total, avec 12 040 ménages en 2025B. Environ 288 champs de démonstration ont été installés (2025B) et autour de 20.100 hectares couverts. La quantité de dolomie distribuée est estimée à 37 357 tonnes au total. Le chaulage a conduit à l'évolution positive du pH dans les parcelles chaulées comparativement aux parcelles non chaulées. En termes de résultats relatifs aux rendements, il apparaît que le chaulage a entraîné une augmentation des rendements des cultures testées (maïs et pomme de terre).

1.2.6/1.2.7 Détermination de la dose de dolomie et du type de fumure organique efficace pour la correction de la forte acidité des sols du Burundi (2.6). Effets combinés de la dose de dolomie et des fumures organiques sur les rendements du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et du maïs (*Zea mays* L.) dans les Plateaux Centraux du Burundi (2.7).

Ce thème a été présenté par Prof Nijimbere Séverin, enseignant chercheur à la FABI. Il a commencé par souligner que les études dont il va présenter les résultats ont été faites dans le cadre du projet intitulé « Récupération agroécologique des sols fortement acides et appauvris en éléments nutritifs de la région d'altitude du Burundi pour accroître la production agricole (RASAB) ». Ces études ont été faites sur le haricot (variété Rufutamadeni : origine CIAT avec code CODMLB003) en rotation avec maïs (variété ZM 605) selon les saisons culturales: haricot 2023B, maïs en 2024A, haricot en 2024B, maïs en 2025A. L'expérimentation a été conduite sur un site sis dans le périmètre de la ferme didactique de la FABI à Zege (type de sols: Ferralsols, pH initial: 4,8) suivant un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets avec 3 répétitions où cinq types de fumure organique (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia*, compost de *Lantana camara*) et trois niveaux de dose de dolomie ont été appliqués (0 t/ha, 2 t/ha et 4 t/ha). Les résultats sur les effets de la dolomie et des matières organiques sur les propriétés du sol acide (après une saison) ont montré un accroissement du pH, une diminution de l'acidité totale et une augmentation du taux de saturation en bases avec la dose de dolomie pour tous les types de matière organique. L'application de la dolomie associée aux différentes matières organiques entraîne une augmentation du rendement du haricot et du maïs. L'étude a abouti à une conclusion selon laquelle le fumier de chèvre est meilleur pour la correction de l'acidité des sols au moment où le fumier de vache est meilleur pour le rendement du haricot et du maïs.

1.2.8 Evaluation de l'effet combiné du chaulage et de la fumure organique sur la nodulation du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides d'altitude du Burundi.

Ce thème a été présenté par Madame Nijimbere Béatrice de l'ISABU. Elle a juste présenté les résultats qu'elle a obtenus dans le cadre de ses travaux de recherche doctorale. Ces résultats portaient sur les axes de recherche suivants :

- Interaction fumure organique et dolomie sur la culture de haricot nain ;
- Chaulage et non chaulage sur le haricot volubile et nain ;
- Valeur fertilisante comparée de Fertikal sur la nodulation du haricot.

La recherche sur l'interaction fumure organique et dolomie sur la culture de haricot nain a été conduite en champ expérimental qui a été installé à Zege (même parcelles que celles présentées dans le paragraphe précédent par Prof Nijimbere Séverin). Dans cette expérimentation, 15 traitements ont été considérés. Ces traitements comprenaient cinq types de fumure organique (témoin, fumier de vache, fumier de chèvre, compost de *Tithonia diversifolia* et compost de *Lantana camara*) associés chaque fois aux différentes doses de chaux. Pour chaque traitement, 7 paramètres ont été mesurés : nombre de nodules/plant, masse de nodules (g)/plant, masse d'un nodule (g), masse racine/plant (g), masse foliaire/plant (g), masse nodule/masse racine (g) et R/S.

Les résultats ont montré que les traitements faits du fumier de vache et compost avec *Tithonia* et ont un nombre de nodules supérieur à la moyenne (quelle que soit la dose de dolomie appliquée). Pour la masse d'un nodule, le traitement fait de 10 t/ha de fumier de vache associée avec 2 t/ha de chaux vient en tête avec une masse de 37,18 mg. Pour les masses racinaire et foliaire, le traitement fait de 10 t/ha de fumier de vache plus 0 t/ha de chaux vient en premier position avec des valeurs de loin supérieures à la moyenne.

La recherche sur les effets du chaulage sur le rendement du haricot volubile et nain a été réalisée sur des sites situés à Cibitoke (Mabayi), Ngozi (Kiremba et Tangara) et Kayanza (Muruta, Matongo). Le dispositif expérimental comprenait chaque fois des parcelles avec application de la dolomie et des parcelles sans application de la dolomie. La quantité de dolomie à appliquer a été définie en fonction du pH du sol : 3,8 tonnes de dolomie/ha pour un pH de 4 à 4,5 et appliquer 2,2 t de dolomie/ha pour un pH de 4,6 à 5. Les résultats ont montré que pour chaque paramètre mesuré (chez le haricot volubile et chez le haricot nain), une valeur élevée est trouvée sur la parcelle chaulée. Les autres activités de recherche réalisées sur ces parcelles installées à Mabayi ont fait état d'une évolution positive du pH sur les parcelles chaulées et une évolution négative de pH sur les parcelles non chaulées.

1.2.9. Efficacité agronomique et efficience économique du chaulage sur la culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)

Ce thème a été présenté par Prof Kaboneka Salvator. Il porte sur les résultats d'un travail réalisé par Hatungimana Innocent dans le cadre de son mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (Option : Génie de l'environnement). Cette étude a été réalisée dans les parcelles de démonstration avec l'objectif d'évaluer l'efficacité agronomique et l'efficience économique du chaulage en milieu réel. Les expérimentations ont été menées sur le haricot volubile et le haricot nain sur des parcelles appartenant aux agri-chercheurs associés au Projet IFDC/PAGRI à Kiremba, Tangara en province de Ngozi, à Muruta, Matongo en province de Kayanza et à Mabayi en province de Cibitoke. Deux traitements simples étaient testés auprès des agri-chercheurs : 1 parcelle chaulée et une parcelle non chaulée. Les paramètres mesurés étaient: la hauteur, la longueur des racines, la biomasse racinaire, la biomasse aérienne, la biomasse totale, le rendement en graines, poids de 1000 graines et le rendement. Les résultats montrent un effet positif et significatif du chaulage sur ces paramètres considérés sauf sur le poids de 1000 graines.

Rien qu'en considérant le paramètre intégrateur qui est le rendement, l'on relève que pour le haricot volubile, la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,1 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC). La même comparaison analytique appliquée au haricot nain montre que la moyenne du rendement des parcelles chaulées (PC) est 2,6 fois plus élevée que celle obtenue dans les parcelles non chaulées (PNC). Relativement à l'efficience économique, les résultats analytiques montrent qu'auparavant, les bénéfices agronomiques obtenus grâce au chaulage justifient les coûts engagés pour cette pratique.

1.2.10. Dynamique de l'acidité du sol et détermination de la dose optimale de dolomie à recommander pour la culture du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) sur sols acides représentatifs des Plateaux Centraux du Burundi.

Ce thème a été présenté par Prof Kaboneka Salvator. Il porte sur les résultats d'un travail réalisé par Bukeyeneza Yves dans le cadre de son mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (Option : Génie de l'environnement). Cette étude vise à déterminer la dose optimale de chaux dolomitique nécessaire pour corriger l'acidité des sols d'altitude au Burundi et son impact sur le rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). A travers une série d'expérimentations en pots, ont été testées plusieurs combinaisons de substrats, incluant 3kg de sol et le fumier de bovins, le fertilisants organo-minéral FOMI-Imbura et la chaux dolomitique, en variant la quantité de dolomie appliquée. Les sols, prélevés dans les parcelles paysannes de la commune Gashikanwa (pH = 5,3) et Muruta (pH = 4,6) et à la ferme didactique de Zege (pH = 4,9), ont fait l'objet d'expérimentation. Les résultats obtenus ont montré que l'acidité du sol a un effet significatif sur la productivité de la culture test de haricot. Pour le sol de Gashikanwa, une dose de 750 kg/ha de dolomie a été identifiée comme optimale, tandis que pour Zege et Muruta, les doses optimales étaient respectivement de 2.000 kg/ha et 2.500 kg/ha.

Cette recherche souligne l'importance d'adapter les pratiques de chaulage en fonction des caractéristiques spécifiques des sols, afin d'améliorer la fertilité et d'augmenter les rendements agricoles. Les résultats de cette étude devraient servir de guide pour les agriculteurs et les décideurs, favorisant ainsi une agriculture plus durable au Burundi.

1.2.11. Evaluation de l'effet des différentes classes granulométriques de la dolomie sur la dynamique du pH, de l'acidité échangeable et de la disponibilité du P assimilable dans le sol.

Ce thème a été présenté par Niyonkuru Anicet. Il porte sur les résultats de son un travail réalisé dans le cadre de son mémoire de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (Option : Génie de l'environnement). L'étude s'est déroulée sur une période de 12 mois, couvrant quatre récoltes de haricot (septembre 2023, décembre 2023, février 2024 et juin 2024). Le dispositif expérimental utilisé était en randomisation totale avec trois répétitions et sept traitements : T0 (témoin intégral), T1 (1 mm), T2 (0,5 mm), T3 (0,25 mm), T4 (0,1 mm), T5 (0,05 mm) et T6 (granulométrie mixte, forme actuellement vendue sur le marché). Le traitement T5, correspondant à la dolomie à granulométrie fine (0,05 mm), atteint un pic de pH élevé dès la première récolte, passant du pH initial de 4,92 à 5,57, et cela trois mois après l'application. Le traitement T1, contenant une dolomie à granulométrie grossière (1 mm), montre une augmentation retardée du pH, observable en décembre (pH de 5,34), soit six mois après l'application. Le traitement T6, constitué d'une dolomie à granulométrie mixte, suit une tendance intermédiaire et maintient une efficacité relativement stable tout au long de l'expérimentation sur une période d'un an. Leur pH est respectivement 5,39 ; 5,46 ; 5,26 et 5,25.

Les traitements montrent une réactivité différente en fonction de leur granulométrie tout au long de la période d'expérimentation. De manière générale, les résultats obtenus indiquent que les traitements à texture fine (0,05 mm et 0,1 mm) réagissent rapidement, avec une tendance descendante en dents de scie pour les paramètres physico-chimiques et agronomiques mesurés. Au contraire, les traitements à texture grossière présentent un effet plus lent mais progressif, suggérant une dissolution lente.

Le rendement le plus élevé a été trouvé neuf mois après le chaulage dans le traitement T6 (7,74 g), tandis que le rendement le plus bas a été trouvé au même mois pour le traitement témoin (0,25 g). L'observation principale de cette étude est que le traitement à granulométrie mixte (T6) démontre un effet plus durable et équilibré sur la production du haricot, ce qui est recherché dans la pratique du chaulage.

1.3. Témoignages

En plus de ces présentations, les participants ont écouté deux témoignages illustrant les effets bénéfiques de l'application de la dolomie dans le secteur agricole burundais. Le premier témoignage a été présenté par Madame Kwizera Marie Goreth (agriculteur). Le deuxième témoignage a été présenté par Monsieur Simuzeye Rénovât (Directeur du Bureau Provincial de l'Environnement, Agriculture et de l'Élevage de Ruyigi).

Témoignage de l'agriculteur

Madame Kwizera Marie Goreth, un agriculteur de la colline Matara, commune Nyabiraba en province de Bujumbura, a partagé son expérience personnelle concernant l'utilisation de la dolomie dans ses champs. Avant d'adopter cette pratique, elle a décrit que les sols de ses champs étaient acides, ce qui limitait la croissance des cultures et réduisait considérablement ses rendements.

Après avoir entendu parler des avantages de la dolomie par la voix de l'IFDC, elle a décidé de l'essayer dans son champ. « Après avoir appliqué la dolomie, j'ai immédiatement remarqué une amélioration dans la qualité des sols de mes champs. Les plantes ont commencé à pousser plus vigoureusement, et les rendements ont augmenté par rapport aux années précédentes », a-t-elle déclaré avec enthousiasme. Kwizera Marie Goreth a également souligné que l'utilisation de la dolomie en combinaison avec la fumure organique a non seulement amélioré la fertilité de ses sols, mais a également réduit sa dépendance aux engrais chimiques, ce qui a eu un impact positif sur son budget et sur l'environnement.

Témoignage du Directeur du BPEAE de Ruyigi

Simuzeye Rénovât, Directeur du BPEAE de Ruyigi, a également pris la parole pour partager son point de vue sur l'importance de la dolomie dans le cadre des politiques agricoles de la province. Il a souligné que l'acidité des sols est un problème majeur qui affecte la productivité agricole dans la province de Ruyigi. « L'application de la dolomie est une solution durable qui répond non seulement aux défis de l'acidité des sols, mais qui contribue également à la sécurité alimentaire de notre province. Nous avons observé des résultats positifs dans plusieurs exploitations agricoles, et cela encourage notre administration à promouvoir davantage son utilisation », a-t-il déclaré. Monsieur Simuzeye a également mentionné les efforts de sensibilisation et de formation menés par les services techniques (agronomes tant communaux, zonaux et collinaires) pour informer les agriculteurs sur les avantages de la dolomie et les bonnes pratiques à adopter.

Ces témoignages illustrent clairement l'impact positif de la dolomie sur l'agriculture burundaise. Ils ont ainsi permis de mettre en lumière des expériences concrètes et des résultats tangibles, renforçant l'idée que la dolomie peut jouer un rôle clé dans l'amélioration des conditions de vie des agriculteurs et dans la durabilité de l'agriculture au Burundi.

1.4. Recommandations

Les présentations faites ont été suivies par des échanges (questions, commentaires, discussions) riches. De ces riches échanges ont émergé une bonne liste des recommandations. Au total 43 recommandations ont été formulées.

Parmi ces recommandations, onze (11) sont d'ordre général ; quatre (4) sont adressées aux enseignants-chercheurs et chercheurs ; huit (8) sont adressées aux agriculteurs ; huit (8) sont adressées aux décideurs politiques ; deux (2) sont adressées aux producteurs de dolomie ; quatre (4) sont adressées aux ONGs et autres institutions d'appui et six (6) sont adressées aux services décentralisés du MINEAGRIE. Toutes ces recommandations sont reprises dans les lignes ci-dessous.

Recommandations d'ordre général

1. Sensibilisation et Formation : continuer à organiser des sessions de sensibilisation et de formation pour les agriculteurs sur l'importance de l'utilisation de la dolomie et d'autres pratiques de correction de l'acidité des sols. Cela inclut des démonstrations pratiques sur l'application de la dolomie et ses effets sur les cultures.
2. Recherche et Développement : Encourager la poursuite des recherches sur les effets de la dolomie sur différents types de sols et cultures, en intégrant des études à long terme pour évaluer les impacts durables sur la fertilité des sols.
3. Collaboration Interinstitutionnelle : Renforcer la collaboration entre les institutions académiques, les institutions de recherche, les services publics (MINEAGRIE, OBM, ...), les ONGs, les producteurs de dolomie et les agriculteurs pour partager les connaissances et les ressources sur la gestion des sols acides et l'utilisation de la dolomie.
4. Mise en Place de Politiques : Proposer des politiques publiques favorisant l'utilisation de la dolomie et d'autres amendements pour la correction de l'acidité des sols, en tenant compte des spécificités locales.
5. Suivi et Évaluation : Établir un système de suivi et d'évaluation des pratiques agricoles liées à l'utilisation de la dolomie afin d'ajuster les recommandations et les stratégies en fonction des résultats observés.
6. Pratiques de conservation : Promouvoir des pratiques de conservation des sols pour prévenir l'érosion et maintenir la fertilité des sols à travers les structures existantes notamment les multiplicateurs des semences et les centres de rayonnements.
7. Plaidoyer pour des politiques favorables : Encourager un plaidoyer auprès des décideurs pour promouvoir des politiques favorables à l'utilisation de la dolomie et à la gestion durable des sols, en intégrant les résultats de la recherche.
8. Proposer des itinéraires techniques pour accompagner les agriculteurs dans la gestion intégrée de la fertilité des sols au Burundi.
9. Elaboration de directives techniques : Elaborer des directives techniques claires sur l'application de la dolomie, y compris les doses optimales et les méthodes d'applications adaptées aux différents types de sols.
10. Rendre disponible, en temps utile et en quantité suffisante, la dolomie aux points de distribution proches des agriculteurs de façon que la dolomie soit appliquée un mois avant le semis.
11. Décaler les périodes de paiement de la dolomie et des engrais pour que la dolomie soit distribuée avant les engrais.

Recommandations pour les Enseignants-Chercheurs et Chercheurs

12. Renforcer la recherche : Encourager des études supplémentaires sur l'impact à long terme de la dolomie sur la fertilité des sols et la productivité agricole, en intégrant des variables environnementales et socio-économiques.
13. Collaborations inter-institutions : Promouvoir des partenariats entre l'Université du Burundi, l'ISABU et d'autres institutions de recherche pour partager les résultats et les meilleures pratiques.

14. Formation continue : Mettre en place des programmes de formation sur les nouvelles techniques de gestion des sols et l'utilisation de la dolomie.
15. Publications et diffusion : Promouvoir la publication des résultats de recherche dans des revues scientifiques et les diffuser auprès des décideurs et des agriculteurs.

Recommandations pour les Agriculteurs

16. Sensibilisation et formation : Participer à des sessions de formation sur les avantages de l'utilisation de la dolomie et les méthodes d'application appropriées.
17. Adoption des pratiques de correction : Encourager l'utilisation régulière de la dolomie pour corriger l'acidité des sols et améliorer la productivité des cultures.
18. Formation sur les dosages : Participer à des formations sur les dosages optimaux de dolomie à appliquer selon les types de sols.
19. Partage d'expériences : Créer des plateformes de partage d'expériences entre agriculteurs sur l'utilisation de la dolomie et ses effets sur les rendements.
20. Utilisation de la matière organique : Encourager l'intégration de la matière organique avec la dolomie pour maximiser les effets bénéfiques sur la fertilité.
21. Diversification des cultures : Promouvoir la rotation des cultures, notamment avec des légumineuses, pour améliorer la santé des sols.
22. Evaluation des sols : Pour ceux le peuvent, faire analyser régulièrement leurs sols pour déterminer les besoins spécifiques en amendements.
23. Participation aux ateliers et fora : Participer activement à des ateliers et fora pour rester informés des nouvelles recherches et pratiques agricoles axées à l'utilisation de la dolomie.

Recommandations pour les décideurs politiques

24. Politiques de soutien : Élaborer des politiques qui encouragent l'utilisation de la dolomie et d'autres amendements pour améliorer la qualité des sols, en intégrant ces pratiques dans les programmes agricoles nationaux.
25. Soutien aux programmes de formation : Financer et soutenir des programmes de formation pour les agriculteurs sur l'utilisation de la dolomie.
26. Soutien à la recherche : Promouvoir le financement des projets de recherche sur les effets de la dolomie et autres amendements sur la fertilité des sols.
27. Infrastructures de distribution : Mettre en place des infrastructures de distribution de la dolomie en dehors du PNSEB pour faciliter la l'acquisition de la dolomie aux agriculteurs à tout moment, notamment dans les zones rurales éloignées des sites de production.
28. Accès aux ressources : Faciliter l'accès à la dolomie et à d'autres amendements pour les agriculteurs, en établissant des partenariats avec les producteurs de dolomie et à travers des programmes de subvention.
29. Suivi et évaluation : Créer un système de suivi pour évaluer l'impact des programmes de correction de l'acidité des sols sur la productivité agricole et la durabilité environnementale.

30. Mise à jour des données : Mettre à jour les données sur les gisements de calcaire existant au Burundi et l'évolution de l'utilisation de la dolomie pour mieux orienter les efforts d'exploitation.
31. Mettre en place un plan d'accompagnement des producteurs de dolomie pour garantir la qualité physico-chimique du produit.

Recommandations pour les Producteurs de Dolomie

32. Amélioration de la qualité : Investir dans des technologies pour harmoniser et améliorer la qualité de la dolomie produite, en s'assurant qu'elle répond aux normes agronomiques.
33. Diversification des produits : Explorer la possibilité de diversifier les produits dérivés de la dolomie pour répondre à d'autres besoins agricoles et environnementaux.

Recommandations pour les ONGs et autres institutions d'appui

34. Programmes de sensibilisation : Développer des programmes de sensibilisation sur l'importance de la correction de l'acidité des sols et l'utilisation de la dolomie dans les communautés agricoles.
35. Soutien à la recherche : Financer des projets de recherche sur les effets de la dolomie et d'autres amendements sur la durabilité des systèmes agricoles.
36. Partenariats locaux : Travailler en collaboration avec les autorités locales et les agriculteurs pour mettre en œuvre des projets pilotes sur l'utilisation de la dolomie.
37. Distribution de la Dolomie : Promouvoir l'accès à la dolomie pour les agriculteurs en établissant des partenariats avec les producteurs locaux et mettre en place des systèmes de distribution efficaces.

Recommandations pour les services décentralisés du MINEAGRIE

38. Coordination des efforts : Assurer la coordination entre les différents bureaux (Environnement, Agriculture, Élevage) pour une approche intégrée de la gestion des sols.
39. Formation des agents : Former les agents des services techniques de vulgarisation sur les techniques de correction de l'acidité des sols et l'utilisation de la dolomie tout en les équipant du matériel efficace notamment les pH-mètres pour faciliter l'encadrement des agriculteurs.
40. Évaluation des besoins locaux : Réaliser des études pour évaluer les besoins spécifiques des agriculteurs en matière de correction de l'acidité des sols dans chaque province.
41. Sensibilisation des agriculteurs : Organiser des ateliers de sensibilisation pour les agriculteurs sur les résultats de recherche concernant l'utilisation de la dolomie.
42. Suivi des cultures : Mettre en place un suivi des cultures pour évaluer l'impact de l'application de la dolomie sur les rendements et la qualité des produits.
43. Actualiser et multiplier le guide d'utilisation de la dolomie en l'adaptant au niveau de compréhension des agriculteurs.

2.5. Clôture du Forum

La clôture du Forum a été marquée par un discours prononcé par Monsieur Sibomana Venant, Directeur de la Fertilisation des Sols au MINEAGRIE. Il a d'abord remercié chaleureusement tous les participants, intervenants, et organisateurs pour leur contribution à la réussite de l'événement et pour les échanges qui ont témoigné de l'engagement de chacun à améliorer la fertilité de nos sols et à promouvoir des pratiques agricoles durables au Burundi. Par la suite, il a indiqué que les thèmes abordés ont mis en lumière l'importance de la dolomie, en tant qu'amendement, non seulement dans la correction de l'acidité des sols, mais aussi dans l'amélioration de la productivité agricole.

Les résultats des recherches présentés sont prometteurs et ouvrent la voie à de nouvelles pratiques agricoles qui pourraient transformer notre paysage agricole, a-t-il déclaré. Il a également souligné l'importance des témoignages écoutés dans l'adaptation des politiques et des stratégies pour répondre au mieux aux besoins des agriculteurs. Toujours dans ses propos, il a indiqué que les recommandations qui ont émergé des différentes discussions doivent guider nos actions futures. Il est impératif que nous travaillions ensemble, en tant que communauté, pour mettre en œuvre ces recommandations, a-t-il ajouté. Avant de clore son allocution, il a exprimé sa gratitude à l'Université du Burundi et à l'IFDC pour leur rôle déterminant dans l'organisation de ce Forum et à tous les partenaires et participants pour leur engagement et leur passion pour l'agriculture durable au Burundi. Pour clore, il a souhaité à tous un bon retour dans leurs ménages respectifs et beaucoup de succès dans leurs futures initiatives.

Rapporteurs:

Prof. Habonayo Richard (FABI/UB)

Monsieur Nzohabonayo Zacharie (IFDC/PAGRIS)

Monsieur Banyaka Jacques (DFS/MINEAGRIE)

Liste des Participants

Nom	Prénom	Organisation	Fonction	Téléphone
Ali	Kassim	BPEAE Muramvya	Directeur	69102266
Banyaka	Jacques	DFS/MINEAGRIE	Agronome	69718997
Bashishikare	Nestor	RBU 2000+	Agronome	69782079
Bigirimana	Justine	RTNB-TV	Journaliste	789381876
Bigirimana	M	UB/Communication	Journaliste	79991266
Bigirimana	Symphorien	RTNB	Journaliste	61401802
Bigiruwuhiriwe	Nestor	RT Isanganiro	Journaliste	61562348
Bikorimana	Fulgence	BNP TV	Journaliste	68985306
Bintunumukama	Africa	Akeza.Net	Journaliste	65881130
Birayi	Gordien	FABI/UB	Assistant Recherche	79066823
Bizindavyi	Albert	Tubura	Agronome	69891371
Biziyaremye	Georges	Floresta	Agronome	79593830
Bukeyenzeza	Yves	UB	Etudiant Master Sortant	68609484
Congera	Jean Marie	BPEAE Rumonge	Directeur	69327817
Coyitungiye	Philippe	BPEAE Rutana	Responsable PV	69491556
Gisaganga	Aristide	OBM	Directeur	68622160
Habonayo	Richard	FABI/UB	Enseignant/Chercheur	79905378
Habonimana	Concilia	Jacaranda	Agronome	79341211
Hakizimana	Ezéchiel	ISABU/LASPA	Chercheur	68738113
Hategekimana	Nathaniel	ADID	Chargé des Missions	79297906
Hatungimana	Innocent	UB	Etudiant Master Sortant	61132150
Havyarimana	Juvénal	BPEAE	Directeur	69095952
Iradukunda	Trinitas	UB	Etudiant Master Sortant	68919786
Irakoze	Jean Marie	BPEAE Makamba	Suivi Evaluation	61144468
Irakoze	Melchior	FABI/UB	Agronome	68793336
Kaboneka	Salvator	FABI/UB	Enseignant/Chercheur	79 952 816
Kameya	Ferdinand	ISABU	Doctorant UB	79446917
Kamikazi	L. Larissa	UB/Communication	Journaliste	61122121
Kankundiye	Clairia	Radio Indundi Culture	Journaliste	61122014
Kanyebete	Paul	ADISCO	Point Focal Dolomie	69108153
Karishanga	Dionise	BPEAE Cibitoke	Directeur	69079353
Katihabwa	Christmas	Akeza.Net	Journaliste	61009325
Kubwimana	Emile	BPEAE Ngozi	Directeur	69716150
Kwizera	M.Goreth	MINEAGRIE	Agronome	69781178
Minani	Dismas	DVFRD/MINEAGRIE	Directeur	69307495
Nahimana	Charles	UCODE-AMR	Directeur	61645035
Nahayo	Nobel	Doho Production Co	-	61230358
Ndahigejeje	J.	RTNB	Journaliste	79993372
Ndanga	Emery	FOPABU	Agronome	79547766
Ndarugiriye	Jean Marie	RTNB	Journaliste	62670646
Ndayikengurukiye	Médard	DPFAPNL/MINEAGRIE	Agronome	69652440
Ndayishimiye	Donatien	ZOA	Agronome	69110982
Ndayishimiye	Jean Marie	BPEAE	Production Végétale	61836277
Ndayishimiye	Sylvestre	BPEAE Bubanza	Directeur	69343712
Ndayizeye	Dieudonné	B-NP TV	Journaliste	69578199
Ndayongeje	Bella	RVE	-	62655484

Ndiraziha	Innocent	BNP Magazine	Journaliste	69461153
Nduwimana	Oscar	IFDC	Chef de Projet Dolomie	79053987
Nduwimana	Claudette	HCB	PF Projet Dolomie	61385564
Nduwimana	Célestin	EFCCO	Cadre	79003580
Ngendakumana	Evelyne	ABP	Journaliste	61018727
Ngiriyabandi	Astère	DFS	Agronome	67922267
Nibigira	Fabiola	RTNB	Journaliste	69355269
Nibigira	Méthode	BPEAE Bujumbura	Agronome	79403085
Nijimbere	Adolphe	Radio Indundi Culture	Journaliste	68041691
Nijimbere	Béatrice	UB	Etudiante/Doctorante	69962845
Nijimbere	Séverin	FABI	Enseignant/Chercheur	79403961
Niwivugire	Donathe	B-NP TV	Journaliste	79671191
Niyimpa	Jean Marie	BPEAE	Directeur	68058371
Niyondiko	Hermès	Doho Production Co LTD	-	61230358
Niyondiko	Jeannine	FABI/UB	Secrétaire	62831131
Niyonkuru	Olike	RT Isanganiro	Administration	69124078
Niyonkuru	Anicet	ISABU	Chercheur	79922702
Niyonsaba	Adolphe	BPEAE	Agronome	68012655
Niyonzima	Salvator	BPEAE Ngozi	Agronome	69169667
Niyubahwe	Gloriose	BPEAE	Agronome	68703672
Niyuhire	M. Chantal	ISABU	Chef de programme	69225511
Niyukuri	Jonathan	FABI/UB	Vice Doyen	62451057
Niyungeko	Chartier	Tubura	Génie Rural	61363838
Nizigiyimana	Désiré	UB	Etudiant Master Sortant	62875128
Nkuzimana	G.	BPEAE	Agronome	69173017
Nkurunziza	Gilbert	Burundi Eco	Journaliste	61890218
Nsabimana	Constantin	UB/Communication	Photographe	69065733
Nsavye	Christian	RTV Isanganiro	Journaliste	76209140
Nshimirimana	J.Claude.	Radio Nationale	Journaliste	79577245
Ntakirutimana	Vianney	BPEAE Rutana	Agronome	61055925
Ntandikiye	Franck	RTNB-TV	Journaliste	71906872
Ntibazikwigira	Godefroid	Twitezimbere	Directeur Technique	64005800
Ntiyantetereje	Joël	UB	Etudiant Master Sortant	71202624
Nzohabonayo	Zacharie	IFDC	Agronome	79900740
Rivuzimana	Léonidas	BPEAE Kirundo	Directeur	69413658
Sibomana	Venant	DFS/MINEGRIE	Directeur	67786894
Simbananiye	R.	BPEAE Muramvya	Agronome	79241706
Simuzeye	Rénovat	BPEAE Ruyigi	Directeur	69401526
Sindayikengera	Georges	OAP		69387791
Sinzihora	M.	BPEAE Kayanza	Productions Végétales	69308957
Sinzobatohana	Pierre	Primature	Conseiller	69365757

