

Restauration fonctionnelle des Plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières : effets sur la productivité du maïs dans la plaine de Lubumbashi

John BANZA MUKALAY



COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBOUX AGRO-BIO TECH

**Restauration fonctionnelle des plinthosols par sous-
solage profond et amendement à base de matériaux de
termitières : effets sur la productivité du maïs dans la
plaine de Lubumbashi**

John BANZA MUKALAY

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en
Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique

Promoteurs :

Prof. Gilles COLINET (ULiège – Gembloux Agro-Bio Tech)

Prof. Emery KASONGO LENGE MUKONZO (UNILU, R.D. Congo)

Année civile : 2026

Citation : Banza, M.J. (2026). Restauration fonctionnelle des plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières : effets sur la productivité du maïs dans la plaine de Lubumbashi. Thèse de doctorat. Gembloux Agro-Bio Tech – Université de Liège, Belgique.

Photo de couverture : Culture de maïs (*Zea mays* L.) en plein développement sur un Plinthosol restauré par sous-solage et amendement avec des matériaux de termitières, illustrant le contexte expérimental de cette thèse (Lubumbashi, Haut-Katanga, RDC).
© John Banza Mukalay

Copyright

Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation Commerciale – Partage dans les Mêmes Conditions (CC BY-NC-SA).

Vous êtes autorisé(e) à reproduire, distribuer, communiquer au public, modifier ou adapter cette œuvre, sous réserve du respect des conditions suivantes :

- Attribution (BY) : vous devez mentionner de manière appropriée le nom de l'auteur original, conformément aux indications fournies par celui-ci ou par le titulaire des droits, sans suggérer une quelconque approbation ou soutien de leur part à votre utilisation de l'œuvre ;
- Pas d'Utilisation Commerciale (NC) : cette œuvre ne peut en aucun cas être utilisée à des fins commerciales ;
- Partage dans les Mêmes Conditions (SA) : si vous modifiez, transformez ou adaptez cette œuvre, vous devez diffuser l'œuvre dérivée exclusivement sous une licence identique à la présente.

À chaque réutilisation ou diffusion de cette œuvre, les termes de la licence doivent être clairement portés à la connaissance du public.

Toute dérogation à l'une de ces conditions requiert l'autorisation préalable du titulaire des droits.

Les dispositions de la présente licence ne portent en aucun cas atteinte aux droits moraux de l'auteur, tels que définis par la législation en vigueur.

© John Banza Mukalay, 23 mars 2026

*À la mémoire de mes grands-parents Thomas KIKENKE KINENKINDA,
Thérèse BANZA MUKALAY et Valérie ILUNGA WA NKULU, ainsi que de
mon frère Cédrick KIKENKE WA MBUYU*

Résumé

Les plinthosols figurent parmi les sols tropicaux les plus étendus mais également les plus contraignants pour la production agricole, en raison de la présence d'horizons plinthitiques riches en oxydes de fer, souvent indurés, acides et pauvres en bases échangeables. Dans la région de Lubumbashi (Sud-est de la République démocratique du Congo), ces contraintes limitent la profondeur exploitable, la disponibilité hydrique et la fertilité chimique, réduisant fortement la productivité des cultures.

Dans ce contexte, cette thèse vise à analyser la restauration fonctionnelle des plinthosols à travers une approche intégrée combinant (i) un sous-solage mécanique destiné à fragmenter les niveaux plinthitiques discontinus et à accroître la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire, et (ii) un épandage en surface de matériaux issus de termitières géantes inactives construites par *Macrotermes falciger*, suivi de leur incorporation lors de la préparation culturale. L'étude a été conduite sur un agroécosystème de 660 ha structuré en blocs et repose sur : (i) une synthèse critique des processus pédogénétiques et des contraintes agronomiques liées à la plinthite ; (ii) une caractérisation spatiale des propriétés physiques et chimiques des sols, complétée par une analyse multi-profondeurs des propriétés physico-chimiques et hydrauliques ; (iii) une analyse spatiale des rendements du maïs et de leurs déterminants fonctionnels ; et (iv) une modélisation biophysique (APSIM) couplée à la télédétection Sentinel-2 afin de relier les modifications du sol à la dynamique de croissance (LAI, Leaf Area Index) et au rendement du maïs grain.

L'analyse approfondie de la littérature montre que la plinthite constitue un héritage pédogénétique structurant, agissant comme un verrou physique et chimique exerçant une contrainte persistante sur le fonctionnement hydrique et la fertilité des sols tropicaux, dont les contraintes ne peuvent être levées sans interventions raisonnées agissant conjointement sur la structure et la chimie du sol. À l'échelle du site étudié, cet héritage se manifeste par une organisation pédologique fortement contrastée.

Nos résultats montrent une forte hétérogénéité spatiale et verticale de l'organisation pédologique. L'épaisseur de sol exploitable varie fortement au sein du périmètre, depuis des zones très peu profondes (< 9 cm), nécessitant une intervention mécanique complémentaire, jusqu'à des blocs où la profondeur utile dépasse 70 cm, offrant un potentiel agronomique nettement plus élevé. Les sols présentent une large gamme de pH, allant de conditions fortement acides (pH < 5) à des valeurs proches de la neutralité (pH = 6,5–7,2), voire une alcalinité légère localisée (pH proche de 8). Le carbone organique total et le phosphore assimilable demeurent relativement faibles, tandis que les teneurs en cations basiques disponibles (Ca, Mg, K), globalement élevées, mais fortement hétérogènes spatialement, traduisent une redistribution partielle induite par les interventions. En revanche, les éléments traces métalliques associés à la plinthite (Al, Fe, Mn, Cu) conservent une variabilité marquée et constituent localement des contraintes chimiques persistantes. La stratification verticale des nutriments est globalement atténuée, bien que le carbone organique et le phosphore restent préférentiellement concentrés dans les horizons de surface.

Une amélioration des propriétés physiques et hydrodynamiques des horizons superficiels est également observée, caractérisée par une diminution de la densité apparente et une augmentation de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, bien que la conductivité hydraulique à saturation demeure limitée dans les horizons cuirassés profonds.

Nos résultats suggèrent que, au sein de la zone racinaire restaurée (0-40 cm), l'organisation fonctionnelle est principalement structurée par trois processus pédogénétiques majeurs : la régulation acido-basique du profil, impliquant le pH et les bases échangeables ; la complexation de l'aluminium par la matière organique ; et la régulation de la disponibilité du phosphore par le fer.

Ces transformations s'accompagnent d'une forte variabilité spatiale des rendements en maïs grain, compris entre 2,3 et 11,1 t ha⁻¹ selon les blocs, valeurs nettement supérieures à la moyenne régionale estimée à 0,77 t ha⁻¹ sous systèmes traditionnels sur sols fortement altérés, dont les plinthosols constituent une composante majeure. Elles se situent également au-dessus de celles généralement rapportées dans des systèmes améliorés comparables. Les analyses de corrélation et les modèles de régression pas à pas identifient le carbone organique total, le calcium, le pH et la profondeur exploitable comme les principaux déterminants positifs du rendement, tandis que le fer, le cuivre et le manganèse apparaissent comme les facteurs limitants majeurs.

Les simulations réalisées avec le modèle APSIM reproduisent fidèlement les dynamiques de croissance du maïs ($R^2 = 0,85-0,93$; $NSE = 0,50-0,77$) ainsi que les rendements observés ($R^2 = 0,91$; $NSE \geq 0,80$). Elles indiquent que les blocs les plus performants présentent des dynamiques de développement foliaire caractérisées par un LAI maximal plus élevé et une sénescence plus progressive après le pic. Ces dynamiques sont associées à des rendements plus élevés, traduisant des conditions hydriques et nutritionnelles plus favorables durant la phase de remplissage des grains.

Dans l'ensemble, nos résultats montrent que la restauration des plinthosols repose sur la combinaison d'interventions mécaniques et d'amendements, conduisant à une amélioration importante, mais spatialement différenciée de la fonctionnalité des sols et de la productivité du maïs. Cette approche intégrée constitue une voie crédible pour une intensification plus résiliente des systèmes agricoles dans les paysages tropicaux à sols fortement altérés.

Mots-clés : Plinthosols, sous-solage, matériaux de termitières, propriétés physico-chimiques, rétention en eau du sol, capacité au champ, point de flétrissement permanent, conductivité hydraulique à saturation, profondeur exploitable, géostatistique, APSIM, Leaf Area Index (LAI), rendement du maïs, télédétection, Sentinel-2, Lubumbashi (RDC).

Abstract

Plinthosols are among the most widespread tropical soils but also among the most constraining for agricultural production due to the presence of iron oxide-rich plinthitic horizons, often indurated, acidic, and poor in exchangeable bases. In the Lubumbashi region (southeastern Democratic Republic of Congo), these constraints limit effective rooting depth, water availability, and chemical fertility, thereby severely restricting crop productivity.

In this context, this thesis aims to analyse the functional restoration of Plinthosols through an integrated approach combining (i) mechanical subsoiling designed to fragment discontinuous plinthitic layers and increase the soil depth functionally exploitable by the root system, and (ii) surface application of materials derived from inactive giant termite mounds constructed by *Macrotermes falciger*, followed by their incorporation during soil preparation. The study was conducted on a 660-ha agroecosystem structured into blocks and is based on: (i) a critical synthesis of pedogenetic processes and agronomic constraints related to plinthite; (ii) spatial characterization of soil physical and chemical properties, complemented by multi-depth analyses of physicochemical and hydraulic properties; (iii) spatial analysis of maize grain yield and its functional determinants; and (iv) biophysical modelling using APSIM coupled with Sentinel-2 remote sensing to link soil modifications to crop growth dynamics (Leaf Area Index, LAI) and grain yield.

The literature review highlights that plinthite represents a structuring pedogenetic legacy acting as both a physical and chemical constraint on hydrological functioning and soil fertility in tropical systems, whose limitations cannot be overcome without coordinated interventions targeting both soil structure and chemistry. At the study site, this legacy results in a highly contrasted pedological organization.

Our results reveal strong spatial and vertical heterogeneity of soil organization. Effective soil depth varies considerably across the perimeter, from very shallow areas (< 9 cm), requiring additional mechanical intervention, to blocks where usable depth exceeds 70 cm, offering significantly higher agronomic potential. Soil pH ranges from strongly acidic conditions (pH < 5) to near-neutral values (pH 6.5–7.2), with locally slight alkalinity (pH close to 8). Total organic carbon and available phosphorus remain relatively low, whereas exchangeable base cations (Ca, Mg, K) are generally elevated but highly spatially heterogeneous, reflecting partial redistribution induced by the interventions. In contrast, trace metallic elements associated with plinthite (Al, Fe, Mn, Cu) maintain marked variability and locally persist as chemical constraints. Vertical nutrient stratification is globally attenuated, although organic carbon and phosphorus remain preferentially concentrated in surface horizons.

Improvements in surface soil physical and hydrodynamic properties are also observed, including reduced bulk density and increased water retention at field capacity and permanent wilting point, although saturated hydraulic conductivity remains limited in deeper indurated horizons.

Within the restored rooting zone (0–40 cm), soil functional organization appears primarily structured by three key pedogenetic processes: (i) acid–base regulation involving soil pH and exchangeable bases; (ii) aluminium complexation by organic matter, reducing its toxicity; and (iii) regulation of phosphorus availability through interactions with iron.

These transformations are accompanied by substantial spatial variability in maize grain yields, ranging from 2.3 to 11.1 t ha⁻¹ across blocks—values markedly higher than the regional average of approximately 0.77 t ha⁻¹ under traditional farming systems established on strongly weathered soils dominated by Plinthosols. They also exceed yields typically reported in comparable improved systems. Correlation analyses and stepwise regression models identify total organic carbon, calcium, soil pH, and exploitable soil depth as the main positive determinants of yield, while iron, copper, and manganese emerge as major limiting factors.

APSIM simulations accurately reproduce maize growth dynamics ($R^2 = 0.85–0.93$; NSE = 0.50–0.77) and observed grain yields ($R^2 = 0.91$; NSE ≥ 0.80). The most productive blocks exhibit higher maximum LAI values and more gradual post-peak senescence, associated with improved water and nutrient conditions during the grain-filling phase.

Overall, the results demonstrate that Plinthosol restoration relies on the combined effects of mechanical intervention and biogenic amendment, leading to a substantial yet spatially differentiated improvement in soil functionality and maize productivity. This integrated approach represents a credible pathway toward more resilient agricultural intensification in tropical landscapes characterized by strongly weathered soils.

Keywords : Plinthosols; subsoiling; termite mound materials; physico-chemical soil properties; soil water retention; field capacity; permanent wilting point ; saturated hydraulic conductivity; effective rooting depth; geostatistics; APSIM; Leaf Area Index (LAI); maize yield; remote sensing; Sentinel-2; Lubumbashi (DRC).

Remerciements

La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans le soutien, l'encadrement et les contributions de nombreuses personnes et institutions, auxquelles j'adresse ma profonde reconnaissance.

Je souhaite tout d'abord exprimer mes sincères remerciements à mes promoteurs de thèse, le Professeur Gilles Colinet et le Professeur Emery Kasongo, pour la confiance qu'ils m'ont accordée, la qualité de leur encadrement scientifique et leur disponibilité constante tout au long de ce travail. Leurs conseils avisés, leur exigence scientifique et leur rigueur méthodologique ont été déterminants dans la structuration de cette recherche et dans l'approfondissement de ma réflexion.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Gilles Colinet pour la pertinence de ses orientations scientifiques, la finesse de son regard critique et la profondeur de ses analyses. Son expertise en science du sol, sa capacité à relier les processus pédologiques aux enjeux agronomiques et environnementaux, ainsi que son exigence scientifique ont joué un rôle central dans la solidité de ce travail. Je lui suis également reconnaissant pour la liberté intellectuelle qu'il m'a accordée, conjuguée à un encadrement à la fois structurant et stimulant. J'ajoute avec reconnaissance sa grande valeur humaine, son accueil chaleureux, son enthousiasme communicatif et son calme rassurant.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères au Professeur Emery Kasongo pour son accompagnement attentif depuis mon cycle d'ingénieur agronome, pour m'avoir transmis le goût de la recherche scientifique, et pour ses conseils éclairés tout au long de cette recherche. Son expertise du contexte pédologique et agronomique du Haut-Katanga, ainsi que sa connaissance fine des réalités de terrain, ont été précieuses pour assurer l'ancrage local et la pertinence appliquée de ce travail. Son soutien constant et sa confiance ont constitué un appui essentiel dans la conduite et l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie très sincèrement les membres de mon comité de thèse, le Professeur Jeroen Meersmans et le Professeur Joost Wellens, pour leur rigueur scientifique, leurs analyses critiques et leurs suggestions constructives. Je suis particulièrement reconnaissant au Professeur Jeroen Meersmans pour son accompagnement méthodologique, notamment en cartographie et en évaluation de l'incertitude, ainsi que pour la qualité des échanges scientifiques lors de nos séances de travail. Mes remerciements vont également au Professeur Joost Wellens pour ses idées innovantes et son expertise en modélisation des cultures, qui ont été déterminantes dans la conduite des simulations et dans l'interprétation des résultats. Je leur suis reconnaissant pour leur implication à la fois en tant que membres du comité de thèse et membres du jury.

Je remercie chaleureusement les membres du jury, la Professeure Aurore Degré (Présidente), la Professeure Ludivine Lassois et le Professeur Georges Martial Ndzana, pour l'attention portée à ce travail, la qualité de leur lecture et la pertinence

de leurs remarques et questionnements, qui ont contribué à renforcer la rigueur scientifique et la portée de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur – Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD), Belgique, pour le soutien financier déterminant apporté à cette recherche à travers l'octroi d'une bourse doctorale. Ce financement a rendu possible la réalisation de ce travail dans des conditions scientifiques et matérielles favorables.

Je remercie également le Programme d'Appui à la Coopération pour le Développement (PACODEL), à travers la bourse d'Impulsion du PACODEL – Université de Liège (ULiège), qui m'a permis de structurer et de consolider mon projet doctoral. Mes remerciements vont au Professeur Jan Bogaert, ainsi qu'aux gestionnaires Madame Françoise Navez, Madame Valérie Voyeux et Madame Manon Van de Weghe pour leur accompagnement administratif et institutionnel.

Je remercie le Professeur Yanick Useni Sikuzani, Doyen de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kolwezi, pour ses conseils constructifs et son encadrement scientifique depuis mon cycle d'ingénieur agronome. Je remercie également les autorités de l'Université de Kolwezi pour m'avoir accordé les facilités nécessaires à la finalisation de cette thèse, en particulier le Recteur, le Professeur Yvon Mwendu Huhongo.

Mes remerciements s'adressent également aux Professeurs Michel Mazinga Kwey, Antoine Kanyenga Lubobo, Robert Monga, et Philippe Kasongo pour leur soutien et leurs conseils.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'Université de Liège (Gembloux Agro-Bio Tech) et aux laboratoires associés pour l'environnement scientifique stimulant et les infrastructures mises à disposition.

Je tiens également à remercier chaleureusement les techniciens de laboratoire de Gembloux Agro-Bio Tech, Emilie Marit, Pauline Biron, Aurore Houtart, Catherine Paquet, Jean-Charles Bergen, Florent Bachelart, Raphaël Tarantino et Stéphane Becquevort, pour leur assistance technique précieuse lors des analyses physico-chimiques et hydrodynamiques des sols. Leur rigueur et leur professionnalisme ont contribué de manière significative à la qualité des données produites dans le cadre de cette thèse.

Je remercie l'ensemble de l'équipe de l'axe Échange Eau–Sol–Plante pour les moments partagés lors des différentes activités de l'axe. J'adresse également mes remerciements à l'Assistante Sibylle Comelieu pour sa bonne humeur et sa grande disponibilité malgré les multiples tâches académiques.

Je remercie sincèrement l'entreprise MMG pour l'opportunité qui m'a été offerte de mener cette étude sur le site agricole de FarmCo Sarl, ainsi que pour le soutien logistique et l'accès aux infrastructures nécessaires à la réalisation des travaux de terrain. Je tiens à exprimer une reconnaissance particulière au Chef de travaux, Ingénieur Déo Mwamba Muloy, à l'Ingénieur Célestin Nkulu et à Monsieur Eric Mulongo pour avoir facilité l'accès au site d'étude et pour leur collaboration précieuse tout au long des activités de terrain.

Je remercie également les gestionnaires de la maison Nord-sud, en particulier Madame Michelle Francotte et Madame Alix Raway, pour l'accueil et les conditions de séjour en Belgique. Je remercie également l'ensemble des cohabitants et collègues doctorants de la Maison Nord-Sud pour les échanges scientifiques, les discussions stimulantes, le soutien moral et les nombreux moments de convivialité partagés, notamment lors des vendredrinks. Je tiens à citer ici, avec reconnaissance, Sorel, Bill, Gaël, Alex, Joseph, Bintou, Naomie, Lisette, Sagesse, Julien, Charles, René, Médard Mpanda, John Kikuni, Dr. Rodrigue, Dr. Patient, ainsi que toutes les autres personnes non mentionnées nommément mais dont la présence et le soutien ont marqué ce parcours. Mes remerciements s'adressent également à Audrey Kengmo pour sa bienveillance et la qualité des interactions partagées durant mes séjours en Belgique.

Je remercie également toutes les personnes qui n'ont cessé de m'encourager dans la recherche scientifique, notamment le Professeur Désiré Mujike, le Professeur Mukalay Hozana, le Professeur Héritier Khoji, le Professeur Serge Langunu, le Professeur Nghonda, le Professeur Nathan Kasanda, le Professeur Mununga, le Professeur Laurent Kidinda, le Professeur Tabu, le Professeur Audrey Tshibangu, le Chef de Travaux Franco Mwamba, le Chef de Travaux Gaillard Mayamba, le Chef de Travaux David Sebagenzi, le Chef de Travaux Mick Assani, le Chef de Travaux Erick Seya, le Chef de Travaux Biamungu, le Chef de Travaux Adolphe Nsomue, le Chef de Travaux Mufind Kayakez, le Chef de Travaux Michel Mwamba, le Chef de Travaux Francis Kabwe, le Chef de Travaux Ben Tshibuyi, le Chef de Travaux Esoma, Ir Martine Karul, Ir Laetitia Kamin, Master Ines Lumonga, ainsi que Master Placide Kamanda.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à mon ami et frère Franck Kanyenga pour son soutien constant et sa fidélité au fil des épreuves de la vie. Sa présence et sa solidarité ont été une force précieuse bien au-delà du cadre académique.

Je tiens à adresser une pensée toute particulière à la personne qui partage ma vie. Son soutien constant, sa patience et sa compréhension ont été une source essentielle de force et de sérénité tout au long de ce parcours doctoral.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à ma famille, et tout particulièrement à mes parents, Jules Mbuyu Kinekinda et Lylie Ilunga wa Kayumba, ainsi qu'à mes frères et sœurs Djoudjou Musenge, Patrick Mbuyu, Viviane Ilunga, Julio Mbuyu, Jeef Kayumba, Issa Monga, Isaac Kikenke, Elie Ilunga et Lydia Banza, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants. Leur confiance, leur compréhension et les valeurs qu'ils m'ont transmises ont constitué une source essentielle de motivation et de persévérance tout au long de ces années de travail doctoral.

À toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse, je renouvelle mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Table des matières	ix
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xxi
Liste des acronymes et abréviations	xxiii
Chapitre 1.....	1
Introduction générale.....	1
1.1. Contexte général : enjeux agricoles et contraintes pédologiques dans la région de Lubumbashi, province du Haut-Katanga	3
1.2. La plinthite : genèse, caractéristiques et implications agronomiques	5
1.3. Opportunité de valorisation des matériaux de termitières géantes.....	7
1.4. Approche intégrée de gestion des sols plinthitiques	10
1.5. Question de recherche	11
1.6. Hypothèse et objectifs de recherche.....	11
1.7. Structure de la thèse	13
Chapitre 2.....	17
La plinthite dans les pédopaysages des régions tropicales : formes évolutives et pratiques de gestion (synthèse bibliographique)	17
2.1. Résumé.....	19
2.2. Abstract	19
2.3. Introduction.....	20
2.4. Mécanismes et facteurs de formation de la plinthite et de ses formes associées	21
3.4.1. Climat	21
2.4.2. Nature du matériau d'origine.....	22
2.4.3. Topographie.....	23
2.4.4. Autres facteurs	24

2.5. Morphologie et propriétés physicochimiques et minéralogiques de la plinthite.....	25
2.5.1. Morphologie et propriétés physiques	25
2.5.2. Compositions chimiques	26
2.5.3. Compositions minéralogiques	27
2.6. Classification, distribution spatiale de la plinthite et formes pédogénèse associées	27
2.7. Implications agro-environnementales de la plinthite et de ses formes apparentées	30
2.8. Gestion des sols plinthitiques.....	31
2.9. Conclusion.....	34
Chapitre 3	37
Milieu d'étude et méthodologie.....	37
3.1. Milieu	39
3.1.1. Localisation du site d'étude	39
3.1.2. Conditions climatiques	40
3.1.3. La végétation	41
3.1.4. Contexte géologique.....	42
3.1.5. Description pédologique.....	43
3.1.6. Caractéristiques, contraintes et dynamiques du système agricole du Haut-Katanga	48
3.2. Méthode.....	49
3.2.1. Préparation du terrain	50
3.2.2. Échantillonnage des sols.....	51
3.2.3. Analyse au laboratoire.....	53
3.2.4. Données agro- météorologiques	55
3.2.5. Conduite de la culture et détermination de rendement	57
3.2.6. Interpolation spatiale des propriétés du sol et du rendement.....	58
3.2.7. Traitement des images Sentinel-2 et extraction du LAI	61
3.2.8. Simulations	63
3.2.9. Méthodes statistiques générales.....	66
Chapitre 4	73
Soil fertility and maize response to subsoil deep tillage and termite mound amendments in strongly weathered plinthic soils.....	73
4.1. Avant-propos	75
4.2. Abstract	75
4.3. Introduction	76
4.4. Methodology	77
4.4.1. Site description	77

4.4.2. Sampling and laboratory analysis.....	79
4.4.3. Cross-validation.....	80
4.4.4. Determination of yield.....	81
4.5. Results.....	83
4.5.1. Assessment of the effectiveness of subsoiling on soil depth.....	83
4.5.2. Spatial variation in soil chemical properties after subsoiling and spreading of termite mound material.....	84
4.5.3. Physicochemical characterization of soil profiles.....	88
4.5.4. Influence of subsoiling on bulk density and water dynamics in soil profiles...	90
4.5.5. Spatial variation in grain maize yield after subsoiling and spreading termite mound material.....	92
4.5.6. Interactions between soil parameters and maize yield.....	93
4.5.7. Performance of grain maize yield regression models derived from stepwise linear regression.....	95
4.6. Discussion.....	97
4.6.1. Analysis of the performance of the interpolation model used.....	97
4.6.2. Assessment of the effectiveness of subsoiling on soil depth.....	97
4.6.3. Spatial variation in soil chemical properties.....	98
4.6.4. Physicochemical and hydric characterization in soil profiles.....	100
4.6.5. Spatial variation in grain maize yield.....	102
4.6.6. Optimization of grain maize yield: regression models and analysis.....	103
4.7. Conclusion.....	105
Chapitre 5.....	109
Restoring Functional Soil Depth in Plinthosols: Effects of Subsoiling and Termite Mound Amendments on Maize Yield.....	109
5.1. Avant-propos.....	111
5.2. Abstract.....	111
5.3. Introduction.....	112
5.4. Materials and Methods.....	114
5.4.1. Study Sites.....	114
5.4.2. Sampling and laboratory analysis.....	117
5.4.3. Yield determination.....	120
5.4.4. Spatial analysis of yield.....	120
5.4.5. Statistical analyses.....	122
5.5. Results.....	125
5.5.1. Distribution of soil physicochemical properties at 0–40 cm.....	125
5.5.2. Relationships between soil properties and identification of dominant pedogenic processes.....	127
5.5.3. Spatial variation in grain maize yield after subsoiling and spreading termite mound material:.....	129
5.5.4. Correlations between soil properties (0–40 cm) and average maize yield.....	129
5.5.5. Maize yield modeling: multiple linear regression with stepwise selection.....	131

5.6. Discussion	132
5.6.1. Distribution and functional significance of physicochemical properties at 0–40 cm.....	132
5.6.2. Organization of soil properties and dominant pedogenic processes.....	135
5.6.3. Spatial variability in yield after subsoiling and amendment	136
5.6.4. Influence of soil properties on maize yield variability	138
5.6.5. Stepwise regression: depth as a direct determinant of yield.....	143
5.7. Conclusions	145
Chapitre 6	147
Simulation of the growth and yield of maize (<i>Zea mays</i> L.) on a loosened plinthosol amended with termite mound material in the Lubumbashi region	147
6.1. Avant-propos	149
6.2. Abstract	149
6.3. Introduction	150
6.4. Materials and Methods	152
6.4.1. Study sites.....	152
6.4.2. APSIM Model description.....	153
6.4.3. Parametrization and Calibration	154
6.4.4. Cross-validation.....	162
6.4.5. Simulation runs.....	164
6.4.6. Data analysis.....	164
6.5. Results	165
6.5.1. Performance of the APSIM model for LAI simulation	165
6.5.2. Evaluation of APSIM model performance in cross-validation of maize grain yield.....	168
6.5.3. Performance of the APSIM model in predicting yields	169
6.6. Discussion	170
6.6.1. Evaluation of the accuracy of LAI derived from Sentinel-2 and its simulation with APSIM	170
6.6.2. Evaluation of the performance of the APSIM model for simulating maize grain yields	171
6.7. Conclusions	172
Chapitre 7	175
Discussion générale	175
7.1. Comprendre les dynamiques pédogénétiques pour éclairer les contraintes des plinthosols	177

7.2. Organisation spatiale, processus fonctionnels et effets intégrés du sous-solage et des matériaux de termitières sur les plinthosols du site d'étude	179
7.3. Réponses physiques et hydriques des profils plinthitiques améliorés sous l'effet du sous-solage et des matériaux de termitières	184
7.4. Dynamiques de rendement et déterminants agronomiques dans un plinthosol restructuré par le sous-solage et les matériaux de termitières	187
7.5. Contribution du modèle APSIM à l'interprétation des dynamiques sol-plante dans des plinthosols restaurés par sous-solage et matériaux de termitière	191
7.6. Portée agronomique, écologique et économique de la restauration des plinthosols	194
7.7. Limites de l'étude.....	196
Chapitre 8.....	201
Conclusion générale et perspectives	201
8.1. Conclusion générale.....	203
8.2. Perspectives.....	206
Annexes A.....	213
Description des profils pédologiques du site d'étude	213
Annexes B.....	235
Matériels supplémentaires du chapitre 4	235
Annexes C.....	241
Matériels supplémentaires du chapitre 5	241
Annexes D.....	249
Matériels supplémentaires du chapitre 6	249
Références bibliographiques	257
Liste des publications entre 2021 et 2026	306

Liste des figures

Figure 1-1 : Formes de la plinthite observées à Lubumbashi (photos : Banza M.J). (a) Plinthite non indurée à l'état initial, caractérisée par une accumulation superficielle de nodules et fragments ferrugineux riches en oxydes de fer. (b) Forme évoluée et indurée (pétroplinthite ou cuirasse ferrugineuse), résultant du durcissement irréversible de la plinthite après des cycles répétés d'humectation et de dessiccation. (c) Profil pédologique illustrant un horizon plinthitique sous-jacent, marqué par une différenciation texturale et structurale limitant la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire.6

Figure 1-2 : Termitière géante inactivée construite par *Macrotermes falciger* dans les paysages de la plaine de Lubumbashi (photo : Banza M.J).8

Figure 1-3 : Schéma conceptuel général de la thèse illustrant la progression logique entre le contexte régional, les contraintes pédologiques associées aux Plinthosols, l'approche intégrée expérimentée, l'hypothèse centrale et les validations empiriques et modélisées développées dans les différents chapitres. 15

Figure 2-1 : Fragments de pétroplinthite (ironstone) formées par durcissement irréversible de la plinthite sous l'effet de cycles répétés de mouillage et de séchage. Les agrégats ferrugineux, riches en oxydes de fer, présentent une structure vacuolaire et une forte cohérence, pouvant être isolées du sol environnant sous forme de blocs durcis (Crédit photo : Banza M.J).23

Figure 2-2 : Distribution des sols à plinthite dans le monde (Nahon, 2003).29

Figure 2-3 : Inversion du relief dans un paysage en érosion : le durcissement de la plinthite exposée produit un bouclier protecteur contre la poursuite de l'érosion (FAO, 2001). 30

Figure 3-1 : Localisation du site d'étude sur la Ferme FarmCo (Haut-Katanga, RDC), montrant le périmètre d'étude délimité sur une image satellitaire Google et son positionnement à l'échelle nationale, provinciale et régionale.40

Figure 3-2 : Carte géologique de l'ex-Province du Katanga montrant la distribution des principales formations précambriennes (Kundelunguien, Roan, Kibarien et complexes granitiques), ainsi que la localisation de Lubumbashi. Cette carte illustre le cadre lithologique régional à l'origine des manteaux d'altération profonds et des formations plinthitiques observées dans la zone d'étude (Kasongo, 2008).43

Figure 3-3 : Carte pédologique simplifiée de la RDC (incluant Haut-Katanga), montrant la distribution spatiale des principaux Groupes de Référence de sols selon la classification WRB (2022). La localisation de la région de Lubumbashi est indiquée

afin de situer la zone d'étude dans son contexte pédologique régional. Source adaptée de Van Engelen et al. (2006).44

Figure 3-4 : A : ramassage et transport des fragments de plinthite après passage de la sous-soleuse (ripper) ; B : stockage des blocs de plinthite extraits hors des parcelles cultivées après l'opération de sous-solage ; C : excavation d'une termitière utilisée pour la préparation du matériau d'amendement appliqué au sol ; D: Vue aérienne par drone montrant les zones où les termitières ont été rasées (taches blanchâtres caractéristiques) ; et E : Champ de maïs en phase de croissance active, reposant sur un profil pédologique amélioré à la suite des opérations de sous-solage et de l'amendement aux matériaux de termitières (crédit photo Banza M.J.).51

Figure 3-5 : Modules et moteur d'APSIM (Keating et al., 2003; McCown et al., 1996).64

Figure 3-6 : Schéma conceptuel général de la méthodologie de la thèse.70

Figure 4-1: Left: Location of the study site (FarmCo) in Lubumbashi area, Haut-Katanga Province, Democratic Republic of Congo. Right: STRM-DEM (30 m resolution) showing the topographic variability across the study area.78

Figure 4-2 : Drone image showing levelled termite mounds (white patches), B: collection and transport of plinthite fragments after subsoiling, and C: plinthite stored outside the cultivated plots (photo credit: John Banza M.).79

Figure 4-3 : Soil sampling plan for the study area.80

Figure 4-4 : Spatial distribution of maize grain yield sampling plots across the study area. Sampling plots are shown within each block (B1–B10).82

Figure 4-5 : Methodological workflow for soil characterization and crop yield analysis.83

Figure 4-6 : Spatial variation in soil thickness across the study area after subsoiling. B denotes the different blocks (B1–B10).84

Figure 4-7 : Spatial variation of soil pH measured in KCl (left) and in water (right) in the 0–10 cm layer after subsoiling and application of termite mound material. B denotes the blocks (B1–B10).85

Figure 4-8 : Spatial distribution of total organic carbon (TOC) in the 0–10 cm soil layer after subsoiling and application of termite mound material. B denotes the blocks (B1–B10).85

Figure 4-9 : Spatial variation of available soil nutrients in the 0–10 cm layer after subsoiling and application of termite mound material: (a) P, (b) Ca, (c) Al, (d) Cu, (e) K, (f) Fe, (g) Mg, and (h) Mn. B denotes the blocks (B1–B10).87

Figure 4-10 : Spatial distribution of grain maize yield across the study area after subsoiling and amendment with termite mound material. Left: 2022–2023 growing season; right: 2023–2024 growing season. B denotes the blocks (B1–B10).92

Figure 4-11 : Descriptive analysis of grain maize yield across the study area for the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. Boxes represent the interquartile range, horizontal lines indicate median values, and points correspond to individual yield observations..... 93

Figure 4-12 : Correlation and distribution matrix illustrating relationships between soil properties and grain maize yield for the 2022–2023 (Rdt1) and 2023–2024 (Rdt2) growing seasons. Pearson correlation coefficients (r) are represented by a colour gradient indicating both magnitude and sign (positive or negative). Asterisks denote levels of statistical significance (* p <0.05; ** p <0.01; *** p <0.001). 94

Figure 4-13 : Principal component analysis (PCA) correlation circle illustrating the relationships between soil properties and maize grain yields (Rdt1 and Rdt2). The first two principal components explain 50.2% of the total variance (PC1 = 27.6%, PC2 = 22.6%). Variables positioned close to each other indicate positive correlations, whereas variables oriented in opposite directions indicate negative relationships. .. 95

Figure 4-14 : Relationships between observed and predicted grain maize yields obtained from stepwise linear regression models based on yield map pixel values (a) and field-measured yields (b) for the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. Bar charts display the standardized beta coefficients ($\pm 95\%$ confidence intervals) of the explanatory variables included in the models: (c) and (d) correspond to pixel-based models, whereas (e) and (f) correspond to models based on field-measured yields for the two seasons, respectively. Solid lines represent fitted regression relationships, and the dashed line represents the 1:1 reference line..... 96

Figure 5-1 : Location of the study site, FarmCo farm in Lubumbashi in the province of Haut-Katanga. 115

Figure 5-2 : A: Plinthite blocks extracted and deposited off-site after subsoiling; B: excavation of a termite mound used as a source of soil amendment material; C: Maize field in full growth after subsoiling and amendment with termite mound material (photo credit Banza M.J.). 116

Figure 5-3 : Meteorological characteristics recorded at the study site during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. 117

Figure 5-4 : Soil sampling plan for the site showing the ten experimental blocks (B1–B10) and the spatial distribution of sampling points within each block. 118

Figure 5-5 : Conceptual diagram illustrating changes in root-accessible volume before and after integrated subsoiling and amendment with termite mound materials in plinthosols of the Lubumbashi region. 119

Figure 5-6 : Distribution of soil physicochemical properties at 0–40 cm after subsoiling and amendment with termite mound materials at the study site. Each point

corresponds to an individual observation ($n = 50$), while the width of the violin represents the probability density of the values for each variable analyzed. 126

Figure 5-7 : Hierarchical classification of physicochemical properties at 0–40 cm. The dendrogram represents the hierarchical classification of soil properties measured at this depth. The distance matrix was calculated using metric $1-|r|$, based on Pearson’s correlation coefficient, and groupings were performed using the average linkage method. Colored rectangles indicate the main clusters of soil properties corresponding to dominant pedogenic and functional processes discussed in the text. 128

Figure 5-8 : Spatial distribution of grain maize yield after subsoiling and addition of termite mound material. Left: 2022–2023 growing season and right: 2023–2024 growing season. B = blocks (B1–B10)..... 129

Figure 5-9 : Correlation matrix between mean maize yield (Yield_mean) and physicochemical properties at 0–40 cm. Each cell represents the Pearson correlation coefficient (r), illustrated by a color gradient (blue = positive correlation, red = negative correlation, white = no relationship). Asterisks indicate the level of statistical significance: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ 130

Figure 5- 10 : Final regression model explaining average maize yield ($n = 20$). (a): relationship between observed and predicted average yield. (b): standardized beta coefficients of the selected variables, with their 95% confidence intervals. The 20 observations correspond to the 10 blocks for which the yield was obtained at two depths (0–10 cm and 0–40 cm). For each block, the yield used in the model is the average of the two growing seasons, ensuring the statistical independence of the data and avoiding any pseudo-replication..... 132

Figure 6-1: On the (left), petroplinthite exposed on the soil surface before land improvement works; on the (right), the same site after land preparation for maize cultivation in Lubumbashi (photo credit: John BANZA M.)..... 151

Figure 6-2 : Location of the study site, FarmCo farm, in Lubumbashi, in the province of Haut-Katanga. 153

Figure 6-3 : Meteorological characteristics of the site covering the study period. 154

Figure 6-4 : Temporal dynamics of reference evapotranspiration (ET_0) from 2016 to 2024. The blue line represents daily ET_0 values calculated from meteorological observations, while the boxplots with black circles show the monthly distribution (median, inter-quartile range, and extreme values/outliers). The x-axis illustrates monthly variability. 155

Figure 6- 5 : Yield harvest plots. 156

Figure 6-6 : Flowchart of the APSIM model construction, calibration, and validation process. 164

Figure 6-7 : Observed vs. simulated LAI (APSIM) for calibration (Cal) and validation (Val). Each black circle represents one observed–simulated data pair. The solid line: linear fit; dashed line: 1:1 (ideal agreement)..... 165

Figure 6-8 : Temporal evolution of simulated and observed LAI during maize growth and model performance across blocks. The solid line indicates the linear regression, and the dashed line the 1:1 line. n represents the number of valid observations derived from cloud-free Sentinel-2 images (Simple Ratio), and sd denotes the standard deviation. 167

Figure 6-9 : Relationship between simulated and observed maize grain yield in the blocks. The solid line represents the linear regression line, and the broken line represents the 1:1 line, the best-fit line. 169

Figure 8- 1: Schéma conceptuel intégratif synthétisant l’architecture logique de la thèse, depuis la contrainte pédologique initiale liée à la plinthite, l’hypothèse centrale d’une restauration fonctionnelle par intervention intégrée (sous-solage et amendement par matériaux de termitières), jusqu’à la réorganisation physico-chimique du profil, l’identification des déterminants du rendement et leur validation par modélisation (APSIM couplé aux données Sentinel-2). Le schéma montre le rôle central de la reconfiguration physico-chimique des Plinthosols dans l’amélioration de la productivité du maïs. 205

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Classes de sols caractérisées par la présence de plinthite (Soil Survey Staff, 2014).....	28
Tableau 3-1 : Principales caractéristiques des grands groupes de sols du Haut-Katanga.	45
Tableau 3-2 : Comparaison des méthodes d'interpolation évaluées.	58
Tableau 4-1 : Physicochemical properties of soil profiles after mechanical subsoiling and amendment with termite mound materials.	89
Tableau 4-2 : Bulk density (BD), saturated hydraulic conductivity (Ksat), field capacity water content (DUL), and wilting point water content (LL) in soil profiles across the study site.....	91
Tableau 6-1 : Sowing and harvest dates in the blocks. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound material. B0: control without subsoiling and amendment with termite mound material.	156
Tableau 6-2 : Soil properties of the site used in the simulations: saturation water content (Ksat), drained upper limit (DUL), lower limit of available soil water (LL), plant available water capacity (PAWC), bulk density (BD), saturated hydraulic conductivity (Ksat), and total organic carbon (TOC). Blocks 1 to 10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound materials. Block 0: control without subsoiling or amendment with termite mound materials.	158
Tableau 6-3 : Soil particle size distribution of blocks used for simulations. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound material. B0: control without subsoiling or amendment with termite mound material.	159
Tableau 6-4 : Number of Sentinel images used per month and per year in the LAI estimate.	160
Tableau 6-5 : Input parameters used for calibrating the APSIM model for the SC719 maize variety and fertilization, accompanied by their descriptions and values. °Cd: degree day.	162
Tableau 6-6 : Summary of APSIM model performance indicators in cross-validation on LAI. R ² coefficient of determination; NSE = Nash–Sutcliffe efficiency; RMSE = root mean square error; MAE = Mean Absolute Error; n = number of blocks.	165
Tableau 6-7 : Performance metrics of APSIM model: cross-validation with 2/3 calibration and 1/3 validation. R ² = coefficient of determination; NSE = Nash–Sutcliffe efficiency; RMSE = root mean square error; MAE = Mean Absolute Error; n = number of measures.	168

Tableau 6-8 : Measured and simulated maize grain yield in the blocks. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound materials. B0: control without subsoiling and amendment with termite mound materials. (-) indicates that no yield measurement or simulation was available for that block during the corresponding growing season. 170

Liste des acronymes et abréviations

Ap	: Horizon de surface cultivé
AB	: Horizon de transition
APSIM	: Agricultural Production Systems sIMulator
ANOVA	: Analyse de variance
BD	: Bulk Density (Densité apparente)
B0–B10	: Blocs expérimentaux
CEC	: Capacité d'Échange Cationique
CC / DUL	: Capacité au Champ (33 kPa)
EDTA	: Ethylenediaminetetraacetic Acid
HCA	: Hierarchical Cluster Analysis
GIS	: Geographic Information System
GPS	: Global Positioning System
ICP-OES	: Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry
K	: Potassium
Ksat	: Conductivité hydraulique à saturation
LAI	: Leaf Area Index (Indice de surface foliaire)
MAE	: Erreur Absolue Moyenne
Mg	: Magnésium
MO	: Matière Organique
NPK	: Engrais Azote–Phosphore–Potassium
NSE	: Nash–Sutcliffe Efficiency
PFP / LL	: Point de Flétrissement Permanent (1500 kPa)
OM	: Organic Matter
pH KCl	: pH mesuré dans une solution de chlorure de potassium
pH H ₂ O	: pH mesuré dans l'eau
PCA	: Principal Component Analysis
PTF	: Pedotransfer Functions
R ²	: Coefficient de détermination
RDC	: République Démocratique du Congo
RMSE	: Root Mean Square Error
RU	: Réserve Utile
SC719	: Variété de maïs utilisée
TOC	: Total Organic Carbon (Carbone organique total)
VIF	: Variance Inflation Factor
WRB	: World Reference Base for Soil Resources

Chapitre 1

Introduction générale

1.1. Contexte général : enjeux agricoles et contraintes pédologiques dans la région de Lubumbashi, province du Haut-Katanga

Malgré son vaste potentiel agroécologique et l'abondance de ses ressources naturelles, la République Démocratique du Congo (RDC) demeure l'un des pays les plus pauvres au monde, où l'insécurité alimentaire persiste à un niveau préoccupant (Akilimali et al., 2024; Angélique et al., 2022; Kazadi et al., 2024; Mbunga et al., 2023; Tabaglio et al., 2023). Le pays dispose pourtant d'environ 80 millions d'hectares de terres arables, dont moins de 10 % sont effectivement exploitées (World Bank, 2018). Cette faible mise en valeur des terres agricoles, conjuguée à la dégradation des sols, à la faiblesse des infrastructures, à l'accès limité aux intrants et aux technologies agricoles, ainsi qu'à la mauvaise gouvernance des ressources naturelles, a conduit à une stagnation prolongée de la production nationale (Mulimbi et al., 2023b; Otchia, 2014). En conséquence, près de 27,7 millions de Congolais sont aujourd'hui en situation d'insécurité alimentaire (WFP & FAO, 2025).

Ces contraintes sont particulièrement marquées dans le sud-est du pays, notamment dans la région de Lubumbashi (province du Haut-Katanga), où la productivité agricole demeure inférieure au potentiel des cultures. Parmi les principales cultures vivrières, le maïs (*Zea mays* L.) occupe une place centrale dans les systèmes de production et constitue la principale source d'énergie alimentaire pour la majorité de la population (Chausse et al., 2012; Tabu et al., 2016, 2023a, 2024). Toutefois, malgré son importance socio-économique, la production locale reste insuffisante pour couvrir la demande croissante liée à l'urbanisation rapide. Entre 2000 et 2019, les importations alimentaires nationales ont été multipliées par six (FAO et al., 2022), et la province du Haut-Katanga dépend désormais fortement des flux céréaliers provenant d'Afrique australe, notamment de Zambie (Tshomba et al., 2020). Selon Tabu et al., (2023a), la production locale ne couvre qu'environ un tiers de la demande, avec des rendements moyens ne dépassant pas 1 t ha^{-1} (Nyembo et al., 2018). Cette situation accentue la vulnérabilité économique et alimentaire de plus de deux millions d'habitants (Useni et al., 2024), dans un contexte où les importations pèsent lourdement sur les devises nationales (Badibanga & Ulimwengu, 2020).

Les études conduites dans la région de Lubumbashi ont identifié la dégradation des sols comme l'un des principaux facteurs limitant la productivité agricole (Banza et al., 2019; Kasongo et al., 2013; Kasu-Bandi et al., 2019). Les paysages sont dominés par des sols fortement altérés, à faible fertilité chimique (Camacho et al., 2021; Koppe et al., 2021; Maroneze et al., 2014; Sanchez, 2018), où l'on observe fréquemment l'occurrence de la plinthite, soit en surface, soit à faible profondeur, limitant la dynamique hydrique du profil (Alexandre, 2002; De Dapper & Malaisse, 1979). Ces formations plinthitiques coexistent souvent avec une forte densité de termitières géantes (Adhikary et al., 2016; Mujinya et al., 2010), deux caractéristiques majeures structurant les paysages pédologiques du Haut-Katanga (Alexandre, 2002).

Au-delà de ces spécificités régionales, la faible productivité agricole en RDC s'inscrit dans un cadre plus large de dégradation des terres observé à l'échelle de

l'Afrique centrale. Ce phénomène, largement documenté dans les zones tropicales humides et subhumides, se manifeste par l'érosion hydrique des horizons superficiels, la diminution des stocks de carbone organique, la compaction des sols et l'acidification progressive liée à l'exploitation continue sans restitution suffisante des nutriments (Ngongo et al., 2009). Ces processus réduisent la capacité des sols à assurer leurs fonctions de production, de régulation hydrique et de stockage du carbone, altérant ainsi leur résilience face aux contraintes climatiques et anthropiques. Dans certaines régions minières du sud-est de la RDC, l'exploitation artisanale et industrielle contribue également à la perturbation physique des sols et à la contamination locale par des éléments traces métalliques (Mpundu et al., 2013; Muyumba et al., 2015; Shutcha et al., 2019), accentuant les risques de dégradation fonctionnelle des agroécosystèmes et les contraintes pour la production agricole.

Par ailleurs, la variabilité climatique accrue, marquée par l'irrégularité des précipitations et la fréquence des sécheresses intra-saisonniers, accentue la vulnérabilité des systèmes de production pluviaux, particulièrement sur sols à faible capacité de rétention en eau (IPCC, 2023). À ces facteurs biophysiques s'ajoutent des contraintes structurelles telles que la faible mécanisation, l'accès limité aux intrants de qualité, le raccourcissement des périodes de jachère sous pression démographique et l'insuffisance des infrastructures de stockage et de commercialisation.

Ainsi, l'insécurité alimentaire et la stagnation des rendements ne résultent pas uniquement de la pauvreté intrinsèque des sols, mais d'une combinaison de facteurs environnementaux, climatiques, techniques et institutionnels. Dans ce contexte multifactoriel, certaines contraintes pédologiques spécifiques, telles que la présence de plinthite à faible profondeur dans les paysages du Haut-Katanga, agissent comme des verrous structurels supplémentaires, limitant fortement la profondeur exploitable du sol et la dynamique hydrique. Au-delà d'une lecture centrée sur la seule fertilité, ces contraintes traduisent une altération plus globale du fonctionnement édaphique, affectant simultanément l'organisation structurale, les flux hydriques et les processus biogéochimiques. Cette approche fonctionnelle rejoint le cadre conceptuel de la « santé des sols » (soil health), qui considère la capacité du sol à assurer durablement ses fonctions productives et régulatrices comme un indicateur intégrateur de son état (Doran & Zeiss, 2000; Lal, 2016).

1.2. La plinthite : genèse, caractéristiques et implications agronomiques

La plinthite (du grec *plinthos*, signifiant brique) est un matériau argileux riche en fer et en aluminium, pauvre en humus, contenant des grains de quartz et d'autres minéraux (WRB, 2022). Morphologiquement, elle se manifeste sous forme de marbrures ou de nodules ferrugineux rougeâtres à brunâtres, correspondant à des concentrations localisées d'oxydes de fer encore non indurées ou faiblement indurées au sein de la matrice du sol, et présente la particularité de durcir irréversiblement après des cycles répétés d'humectation et de dessiccation (Daniels et al., 1978; Dos Santos et al., 2018; Eze et al., 2014; Martins et al., 2018a; Soil Survey Staff, 2014; WRB, 2022). À l'état humide, elle offre une résistance ferme à très ferme à la rupture et une cimentation modérée (Chardon et al., 2018; Santos et al., 2022; Soil Survey Staff, 2014). Après durcissement irréversible, la plinthite évolue vers une pétroplinthite (communément appelée cuirasse ferrugineuse), forme indurée, massive et continue, pouvant être affleurante, sub-affleurante ou enfouie au sein du profil selon l'histoire géomorphologique locale (Chardon et al., 2018; Ogg et al., 2022; WRB, 2022). Lorsque cette concentration ferrugineuse atteint un niveau diagnostique au sein d'un horizon, celui-ci est qualifié d'horizon plinthitique, constituant un critère déterminant dans la classification des Plinthosols selon la WRB (2022).

Sa formation résulte de processus pédogénétiques complexes de ségrégation et de concentration du fer, liés aux fluctuations de la nappe phréatique et à des conditions de drainage restreintes dans des matériaux parentaux riches en fer (Dos Anjos et al., 1995; Garcia et al., 2013; Roquin et al., 1990; Yoboue et al., 2019; Zhao et al., 2021). Ces processus aboutissent à une différenciation texturale et structurale marquée, affectant négativement les propriétés hydriques et mécaniques des sols et, par conséquent, les performances agricoles (Sanchez, 2018; Santos et al., 2023). Les différentes formes observées sur le terrain sont illustrées à la Figure 1-1.

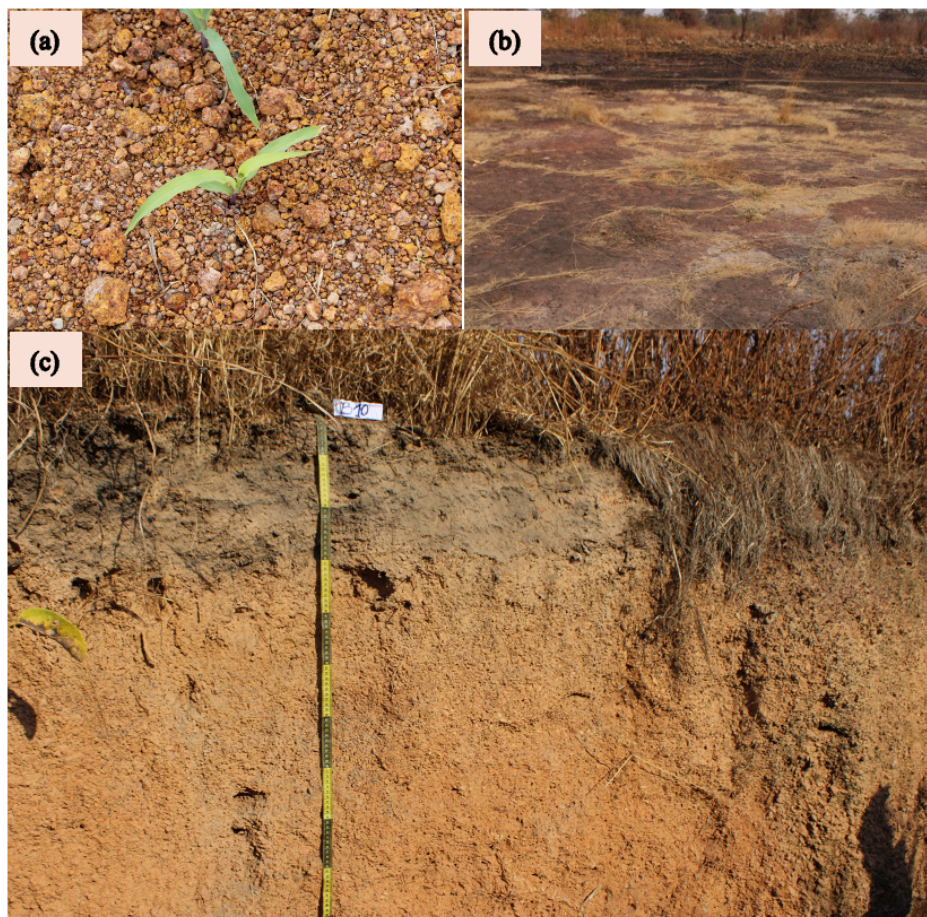


Figure 1-1 : Formes de la plinthite observées à Lubumbashi (photos : Banza M.J). (a) Plinthite non indurée à l'état initial, caractérisée par une accumulation superficielle de nodules et fragments ferrugineux riches en oxydes de fer. (b) Forme évoluée et indurée (pétroplinthite ou cuirasse ferrugineuse), résultant du durcissement irréversible de la plinthite après des cycles répétés d'humectation et de dessiccation. (c) Profil pédologique illustrant un horizon plinthitique sous-jacent, marqué par une différenciation texturale et structurale limitant la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire.

Sur le plan agronomique, la plinthite induit plusieurs contraintes physiques majeures : elle réduit la profondeur utile du sol, limite la circulation de l'eau et de l'air, et restreint le volume racinaire exploitable par les cultures (Cooper et al., 2020; Kumar et al., 2019; Lin et al., 2018; Liu et al., 2020; Oluwatosin et al., 2020; Pereira-De-Oliveira et al., 2019). Ces caractéristiques expliquent pourquoi les plinthosols sont classés parmi les sols marginaux pour l'agriculture tropicale (Kumar et al., 2019; Kumar et al., 2018; Martins et al., 2018a; Patel et al., 2015; Sanchez, 2018; Santos et al., 2022).

Les effets agronomiques de la plinthite sont doubles : d'une part, elle réduit la capacité d'ancrage et d'absorption racinaire (de Moraes et al., 2006; Liu et al., 2020; Sarkar & Bandyopadhyay, 2018; Stiles et al., 2001; Wildemeersch et al., 2015; Yaro et al., 2006), et d'autre part, elle altère les flux hydriques verticaux, entraînant des stress hydriques saisonniers (Ezeaku & Anikwe, 2006). À ces contraintes s'ajoutent les difficultés de mécanisation dues à la présence de fragments ferrugineux durcis (pétoplinthite), rendant le travail du sol particulièrement pénible (Santos et al., 2023).

Les tentatives classiques d'amélioration telles que le labour profond, le drainage ou les apports chimiques ont rarement conduit à une amélioration durable de la productivité de sols plinthitiques (Dos Santos et al., 2018; Du Preez et al., 2001; Leite et al., 2024; Loke et al., 2014; Malafaia et al., 2016; Martins et al., 2018b). Fatondji & Ibrahim (2018) et Ibrahim & Fatondji (2020) soulignent que la mise en culture des sols plinthitiques requiert une approche technologique intégrée, combinant connaissance pédologique, gestion physique et fertilisation raisonnée.

Au Nigéria, Wildemeersch et al. (2015) ont montré qu'une meilleure conservation des eaux et des sols (techniques du zaï + fumier ou demi-lunes + fumier) pouvait augmenter la production de mil jusqu'à $0,7 \pm 0,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ sur plinthosols, bien que les améliorations observées demeurent limitées à court terme.

Outre ces contraintes liées à la plinthite, la présence massive de termitières géantes dans les paysages du Haut-Katanga ouvre de nouvelles perspectives de gestion pédologique.

1.3. Opportunité de valorisation des matériaux de termitières géantes

Les termitières géantes inactives, principalement construites par *Macrotermes falciger* et présentant une morphologie conique à dôme, constituent un élément structurant du paysage de la plaine de Lubumbashi et représentent un potentiel pédologique encore largement sous-exploité (Alexandre, 2002; Erens et al., 2015; Ilunga et al., 2023; Malaisse, 2011; Mujinya et al., 2013). Une illustration typique de ces structures est présentée à la Figure 1-2. On y recense en moyenne 7 termitières par hectare, avec une hauteur moyenne d'environ 5 m, un diamètre de 15 m et un volume avoisinant 256 m^3 (Erens et al., 2015; Mujinya et al., 2014). Certaines structures atteignent même jusqu'à 820 m^3 , comme observé récemment dans la région par Malaisse, (2011) et Ou et al. (2025).



Figure 1-2 : Termitière géante inactivée construite par *Macrotermes falciger* dans les paysages de la plaine de Lubumbashi (photo : Banza M.J).

Ces édifices biogéniques résultent d'une pédoturbation intense induite par l'activité des termites (Ilunga et al., 2023; Jouquet et al., 2016, 2020; Mujinya et al., 2010), qui modifient profondément la composition et la structure du sol. Les termites sont reconnus comme des "ingénieurs d'écosystèmes", capables de redistribuer verticalement les particules fines et les éléments nutritifs en prélevant des matériaux issus d'horizons plus profonds, souvent enrichis en argiles et en bases échangeables (Jouquet et al., 2015; Mills et al., 2009; Seymour et al., 2014). Lors de la construction des monticules, ces matériaux sont mélangés à de la matière organique et à des sécrétions salivaires, ce qui favorise la biocimentation et la concentration locale de nutriments. Ce transport vertical et cette sélection granulométrique expliquent la concentration relative de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et d'autres éléments dans certaines parties du monticule, notamment dans la zone centrale inférieure où s'accumulent les fractions fines et les nutriments (Erens et al., 2015; Isabelle et al., 2014).

Les matériaux issus de ces termitières sont ainsi chimiquement enrichis par rapport aux sols environnants, présentant des teneurs plus élevées en argile, une réaction plus alcaline, et des concentrations accrues en nutriments tels que l'azote (N), le phosphore (P), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+), le sodium (Na^+) et le nitrate (NO_3^-) (Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2015; Rajeev & Sanjeev, 2011; Seymour et al., 2014). Cet enrichissement inclut fréquemment la présence de carbonates de calcium (CaCO_3), susceptibles de jouer un rôle tampon dans les sols acides tropicaux. Le CaCO_3 réagit avec les protons (H^+), induisant une élévation du pH et une diminution de la solubilité de l'aluminium et du manganèse sous leurs formes toxiques, mécanisme largement documenté dans les environnements fortement altérés (Abe et al., 2011; Rajeev & Sanjeev, 2011; Tilahun et al., 2012).

De nombreuses études ont montré que l'incorporation de matériaux de termitières induit des modifications significatives des propriétés physico-chimiques du sol. Ces

transformations se traduisent notamment par une stabilisation accrue de la structure, une augmentation de la perméabilité et de la capacité de rétention en eau, un renforcement de la capacité d'échange cationique, ainsi qu'une atténuation partielle de l'acidité du sol (Ackerman et al., 2007; Adhikary et al., 2016; Chisanga et al., 2020; Isabelle et al., 2014; Li et al., 2017; Seymour et al., 2014). L'enrichissement en cations basiques des monticules résulte principalement de processus biogéniques liés à l'activité des termites (de Lima et al., 2018; Harit et al., 2017). Les termites du genre *Macrotermes* concentrent activement le calcium à partir des matériaux végétaux ingérés (bois et litière riches en Ca), lesquels sont ensuite redistribués et incorporés dans la structure des monticules au cours des processus de construction et de bioturbation, contribuant ainsi à l'enrichissement local en bases échangeables (Jouquet et al., 2020; Mujinya et al., 2010; Trapnell et al., 1976).

Leur incorporation stimule également l'activité microbienne et favorise les interactions biologiques bénéfiques dans le sol (Brauman, 2000; Duponnois et al., 2005, 2006; Enagbonma & Babalola, 2019). Au-delà de la fertilité immédiate, ces effets contribuent au maintien des services écosystémiques associés aux sols tropicaux, notamment la régulation hydrique, la stabilité structurale et la résilience face aux épisodes de sécheresse ou d'érosion (Abe et al., 2011; Apori et al., 2020; Duponnois et al., 2005; López-Hernández et al., 2006; Mamo & Wortmann, 2009; Tilahun et al., 2012).

Dans des contextes de sols fortement dégradés ou physiquement contraints, tels que les plinthosols du Haut-Katanga, ces monticules peuvent être considérés comme des « réservoirs fonctionnels » de fertilité, capables de restaurer localement certaines propriétés édaphiques altérées. Leur mobilisation raisonnée dans les systèmes de culture peut ainsi être envisagée comme un levier de restauration des fonctions du sol, en contribuant au rétablissement des capacités de production, de régulation hydrique et de stockage du carbone.

Des résultats empiriques confirment ces effets positifs. Au Niger Garba et al. (2011) ont montré que l'ajout de matériaux de termitière dans des sols sableux augmentait la teneur en argile et en carbone organique, améliorait la rétention en eau (à la capacité au champ et au point de flétrissement), et stimulait la croissance et la productivité de la tomate. Les plants cultivés sur sol amendé présentaient une hauteur, un nombre de feuilles et une biomasse significativement supérieure à ceux du témoin non amendé. De même, à Brazzaville, Kpangba et al. (2020) ont observé que l'application de terre de termitière sur trois cultivars de la morelle noire augmentait la biomasse aérienne et racinaire ainsi que le rendement total.

Dans la zone périurbaine de Lubumbashi, cependant, la demande croissante en matériaux de construction entraîne l'exploitation systématique des termitières pour la fabrication de briques. Cette pratique constitue aujourd'hui l'usage dominant des matériaux de termitières, tandis que leur valorisation agricole demeure marginale chez les petits exploitants (Adhikary et al., 2016; Erens et al., 2015). Cette dynamique urbaine conduit à la disparition progressive de ces structures biogéniques sans valorisation agronomique préalable.

Dans ce contexte, l'enjeu ne réside pas uniquement dans la reconnaissance de la richesse chimique des monticules et porte sur l'évaluation de leur potentiel en tant que vecteurs de restauration fonctionnelle des sols, en particulier dans les systèmes agricoles confrontés à des contraintes physiques et chimiques sévères. L'intégration des matériaux de termitières dans des stratégies de gestion des sols est susceptible d'influencer l'organisation structurale et le statut chimique des horizons superficiels, tout en soutenant durablement les services écosystémiques essentiels, notamment la régulation hydrique, la dynamique des nutriments et la production primaire.

Ainsi, l'abondance des termitières géantes dans la région de Lubumbashi, combinée à leur richesse chimique et à leurs propriétés d'amendement, offre des perspectives prometteuses pour une valorisation durable dans la gestion des sols à plinthite, notamment dans les systèmes de culture du maïs. Cependant, malgré de nombreux travaux démontrant les effets localisés des matériaux de termitières sur la fertilité des sols, peu d'études ont évalué leur intégration dans des systèmes agricoles mécanisés à grande échelle, ni analysé leurs interactions avec les pratiques physiques telles que le sous-solage. Cette recherche vise à combler cette lacune en proposant une approche combinée, contextualisée aux environnements tropicaux fortement altérés dominés par des plinthosols dans le sud-est de la RDC.

1.4. Approche intégrée de gestion des sols plinthitiques

Face à la pression démographique croissante et aux contraintes physiques et chimiques des sols tropicaux fortement altérés, notamment des plinthosols, la province du Haut-Katanga est confrontée à la nécessité d'une intensification durable de la production agricole locale, en particulier celle du maïs (*Zea mays* L.), afin de réduire sa dépendance vis-à-vis des importations alimentaires. Dans cette perspective, une approche intégrée de gestion des sols a été expérimentée dans la plaine de Lubumbashi. Elle repose sur la combinaison d'une intervention mécanique profonde (sous-solage) et d'un apport biogénique local (matériaux de termitières nivelées), visant à agir conjointement sur les contraintes structurales et sur le statut chimique des plinthosols.

Nafi et al. (2020) ont démontré que le travail du sol, associé à l'incorporation de résidus organiques, peut accroître les stocks de nutriments dans les plinthosols. De même, plusieurs études confirment les effets bénéfiques du sous-solage sur la productivité agricole à travers l'amélioration de la structure du sol et la réduction de la compaction : Al-Irhayim et al. (2025) et Ramadhan & Alfaris (2023) en Iraq, Wang et al. (2024a) en Chine, ainsi qu' Ishtiaq et al. (2022) au Pakistan, ont rapporté des gains significatifs de rendement sur divers types de sols. Bogunovic et al. (2025), travaillant sur des Stagnosols sujets au compactage en Croatie, ont observé des rendements de biomasse de maïs atteignant 25,06 t h⁻¹ sous sous-solage, soit 11 à 19 % supérieurs à ceux obtenus sous labour conventionnel ou chisel.

L'approche mise en œuvre dans la région de Lubumbashi s'articule autour de deux interventions complémentaires :

- L'excavation partielle des horizons cuirassés afin de fragmenter les niveaux indurés limitant la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire ;
- Le déblaiement et l'épandage des matériaux de termitières géantes sur les parcelles sous-solées, dans le but d'aplanir uniformément le terrain, d'améliorer la structure du sol et d'enrichir la couche arable en éléments nutritifs.

Cette double intervention, combinant une ressource biogénique locale et une technique mécanique de restructuration du profil, peut être interprétée comme une innovation agroécologique majeure pour la restauration fonctionnelle des sols à plinthite. Elle s'inscrit dans une perspective d'intensification durable visant à articuler productivité agricole, préservation des ressources pédologiques et valorisation raisonnée des matériaux naturels disponibles localement.

Dans le cadre de cette étude, le terme « durable » est appréhendé selon une approche multidimensionnelle. Il renvoie : (i) à une dimension temporelle, comprise comme la capacité potentielle des interventions à produire des effets qui se maintiennent au-delà d'une seule campagne culturale, sans préjuger de leur stabilité à long terme ; (ii) à une dimension environnementale et écologique, relative au maintien des fonctions édaphiques essentielles, notamment la régulation hydrique, la stabilité structurale et la dynamique biogéochimique des nutriments ; et (iii) à une dimension agronomique, traduite par une amélioration reproductible de la productivité du maïs sans dégradation progressive des propriétés physico-chimiques du sol.

1.5. Question de recherche

Dans ce contexte, la présente recherche s'articule autour d'une question centrale :

Dans quelle mesure et par quels mécanismes la combinaison du sous-solage profond et de l'amendement à base de matériaux de termitières contribue-t-elle à la restauration fonctionnelle des Plinthosols et influence-t-elle, en conséquence, la productivité du maïs grain dans la plaine de Lubumbashi ?

Cette question guide l'ensemble des analyses expérimentales, spatiales et des simulations biophysiques menées dans le cadre de cette étude.

1.6. Hypothèse et objectifs de recherche

La présente étude repose sur l'hypothèse générale selon laquelle l'association du sous-solage mécanique profond et de l'amendement par des matériaux de termitières géantes est susceptible de restaurer partiellement le fonctionnement édaphique des Plinthosols, en agissant conjointement sur leurs propriétés physiques, chimiques et hydrodynamiques, et de se traduire par une amélioration de la productivité du maïs grain.

Cette réponse agronomique potentielle résulterait principalement (i) d'une restructuration du statut chimique des horizons superficiels, marquée par une élévation relative du pH, du carbone organique total et des cations basiques disponibles, associée à une atténuation partielle des contraintes liées aux éléments

traces métalliques hérités de la plinthite, ainsi qu'à une organisation hydrique plus fonctionnelle favorisant le stockage et la redistribution de l'eau dans le profil ; et (ii) d'une reconfiguration structurale du profil pédologique, combinant la levée partielle des contraintes mécaniques et la modification des conditions chimiques, conduisant à une augmentation de la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire dans les secteurs où la plinthite est discontinue.

Il est en outre posé que ces transformations physiques, chimiques et hydriques, bien que spatialement hétérogènes, peuvent être intégrées de manière cohérente dans une approche de modélisation biophysique couplée à la télédétection, permettant de relier l'état fonctionnel des Plinthosols restaurés aux dynamiques de croissance du maïs et au rendement en grain.

L'objectif général de cette recherche est d'analyser la restauration fonctionnelle des Plinthosols à travers une approche intégrée combinant le sous-solage mécanique et l'amendement par des matériaux de termitières géantes, dans les conditions agroécologiques de la région de Lubumbashi. Plus précisément, l'étude vise à caractériser les effets de ces pratiques sur les propriétés physiques, chimiques et hydrodynamiques du sol, et à examiner leurs relations avec la productivité du maïs grain.

Les objectifs spécifiques poursuivis sont les suivants :

1. Établir une synthèse critique des connaissances sur la plinthite et les plinthosols (formes évolutives, propriétés pédologiques, contraintes agronomiques) et analyser les stratégies de gestion rapportées dans les paysages tropicaux, afin de définir le cadre conceptuel de l'étude ;
2. Évaluer les effets du sous-solage profond et de l'amendement par des matériaux de termitières sur la fertilité des sols à plinthite fortement altérés, ainsi que sur la réponse agronomique du maïs grain et ses relations avec les propriétés du sol ;
3. Examiner l'évolution verticale et spatiale des propriétés du sol, en particulier dans la zone fonctionnellement exploitable par le système racinaire (0–40 cm) après restauration, afin d'analyser les effets du sous-solage et de l'amendement par des matériaux de termitières sur le fonctionnement des Plinthosols et sur la réponse du rendement en maïs grain ;
4. Simuler la croissance et le rendement du maïs cultivé sur plinthosol, sous l'effet combiné du sous-solage et de l'amendement par les matériaux de termitières, à l'aide d'un modèle agronomique adapté, afin de relier les modifications des propriétés du sol aux dynamiques de croissance de la culture.

Ces hypothèses et objectifs s'inscrivent dans une démarche d'analyse intégrée des interactions entre les contraintes pédologiques inhérentes aux plinthosols, les pratiques de gestion mises en œuvre et la réponse agronomique du maïs. La compréhension de ces interactions repose sur un cadre conceptuel associant la dynamique physico-chimique des sols à plinthite, les processus biogéochimiques liés aux matériaux de termitières, et le fonctionnement du système sol–plante.

Ainsi, cette recherche vise à répondre à un double enjeu scientifique et agronomique : (i) mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques et structuraux à l'origine de la faible productivité des Plinthosols, et (ii) évaluer, à travers une expérimentation de terrain et une approche de modélisation, le potentiel d'une stratégie intégrée associant sous-solage et amendements biogéniques de termitières pour la restauration fonctionnelle et la valorisation agronomique des Plinthosols du Haut-Katanga.

1.7. Structure de la thèse

La présente thèse s'inscrit dans une démarche intégrée visant à comprendre et à améliorer le fonctionnement des plinthosols tropicaux dans la région de Lubumbashi, à travers la combinaison du sous-solage mécanique profond et de l'amendement biogénique à base de matériaux de termitières géantes. Elle est structurée en huit chapitres qui s'enchaînent de manière progressive, depuis la problématique générale jusqu'aux perspectives opérationnelles, en articulant analyses pédologiques, agronomiques, hydrodynamiques, spatiales et de modélisation.

Le **chapitre 1** introduit le cadre général de la recherche. Il présente le contexte agroécologique de la région de Lubumbashi, marqué par la forte présence de sols à plinthite et par des contraintes sévères à la production agricole. Ce chapitre expose la problématique scientifique et agronomique liée à la faible productivité des plinthosols, les limites des pratiques traditionnelles de gestion des sols, ainsi que l'intérêt potentiel des interventions combinées de sous-solage et d'amendement biogénique. Les hypothèses de recherche, les objectifs généraux et spécifiques, ainsi que les questions scientifiques structurantes y sont clairement définis.

Le **chapitre 2** propose une synthèse bibliographique approfondie sur la plinthite et les plinthosols dans les pédopaysages tropicaux. Il examine les processus pédogénétiques impliqués dans la formation de la plinthite, ses propriétés morphologiques, physiques, chimiques et minéralogiques, ainsi que sa distribution dans les régions tropicales. Ce chapitre analyse également les contraintes agronomiques associées (faible profondeur exploitable, acidité, toxicité aluminique et manganique, limitations hydriques) et passe en revue les principales stratégies de gestion rapportées dans la littérature (amendements organiques et minéraux, agroforesterie, techniques de conservation des sols, sous-solage, etc.), en discutant leurs effets et leurs limites en matière de restauration fonctionnelle.

Le **chapitre 3** décrit le site d'étude et les méthodes mobilisées. Il présente le contexte climatique, géologique et pédologique du périmètre expérimental (660 ha), ainsi que l'organisation du dispositif. Il détaille les protocoles de terrain (description des profils, prélèvements perturbés et non perturbés), les analyses de laboratoire (propriétés physico-chimiques, granulométrie, propriétés hydrauliques), la détermination du rendement en maïs grain, ainsi que les traitements statistiques. Il précise enfin l'utilisation de la télédétection Sentinel-2 pour l'estimation de l'indice de surface foliaire (LAI) et l'intégration de ces données dans le modèle APSIM.

Le **chapitre 4** examine les effets du sous-solage et de l'amendement par matériaux de termitières sur les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques du sol, ainsi

que sur les rendements du maïs. Il analyse et cartographie la variabilité spatiale du pH, du carbone organique, du phosphore, des bases échangeables et des éléments traces dans l'horizon superficiel (0–10 cm), et décrit la distribution spatiale des rendements en maïs grain. Il intègre également une analyse verticale des propriétés physiques (densité apparente, conductivité hydraulique à saturation, rétention en eau) issue des profils pédologiques. Enfin, ce chapitre identifie les principaux facteurs associés à la variabilité des rendements à l'échelle de la couche superficielle, en combinant les informations issues des cartes de rendement (données pixel) et les observations de terrain.

Le **chapitre 5** se focalise sur le rôle de la profondeur fonctionnellement exploitable (0–40 cm), telle qu'atteinte dans les secteurs où la plinthite est discontinue, dans la productivité du maïs sur plinthosols restaurés. Il met en relation cette profondeur, la distribution des propriétés du sol et les rendements observés, montrant que l'extension du volume d'exploration racinaire constitue un levier déterminant pour l'accès aux nutriments. Le chapitre discute les principaux processus fonctionnels mis en évidence (régulation acido-basique, complexation de l'aluminium par la matière organique, fixation du phosphore par les oxydes de fer), tout en soulignant la persistance de certaines contraintes liées à la plinthite. Il identifie enfin les facteurs contrôlant la variabilité du rendement dans la zone effectivement restaurée du profil.

Le **chapitre 6** présente la modélisation biophysique de la croissance et du rendement du maïs à l'aide du modèle APSIM, couplé aux données de télédétection Sentinel-2. Il analyse la capacité du modèle à reproduire les dynamiques temporelles du LAI et les rendements observés, et discute la manière dont les modifications structurelles, hydriques et chimiques du sol se traduisent en trajectoires de croissance différenciées entre blocs. Ce chapitre démontre l'intérêt du couplage modélisation–télédétection comme outil d'aide à la décision pour les systèmes agricoles tropicaux contraints.

Le **chapitre 7** propose une discussion intégrée des résultats. Il croise les observations pédologiques, hydrodynamiques, géochimiques, agronomiques et de modélisation afin de construire une lecture fonctionnelle du système sol–plante dans les plinthosols restaurés. Ce chapitre montre la coexistence de zones en cours de restauration et de secteurs encore dominés par la contrainte plinthitique, et discute les implications de cette hétérogénéité spatiale pour la gestion future des sols.

Enfin, le **chapitre 8** présente la conclusion générale et les perspectives. Il synthétise les principaux résultats, confirme la pertinence de l'approche intégrée combinant sous-solage et matériaux de termitières, et discute les implications agronomiques, écologiques et opérationnelles de la recherche. Des pistes sont proposées pour l'optimisation des interventions, l'adaptation aux contextes locaux et le développement de stratégies de gestion durable des plinthosols en Afrique tropicale. L'articulation conceptuelle de la thèse, depuis le contexte régional jusqu'à la validation par modélisation, est synthétisée dans la Figure 1-3.

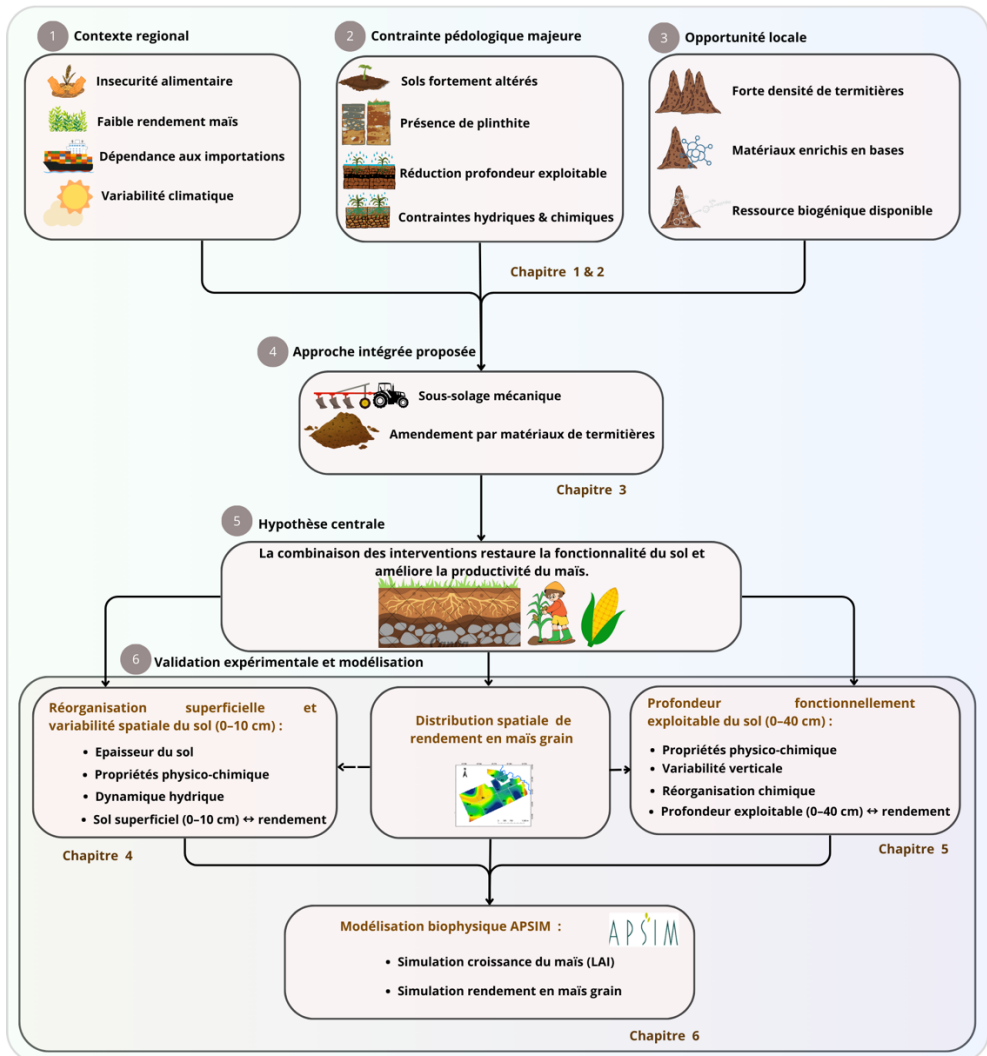


Figure 1-3 : Schéma conceptuel général de la thèse illustrant la progression logique entre le contexte régional, les contraintes pédologiques associées aux Plinthosols, l'approche intégrée expérimentée, l'hypothèse centrale et les validations empiriques et modélisées développées dans les différents chapitres.

Chapitre 2

La plinthite dans les pédopaysages des régions tropicales : formes évolutives et pratiques de gestion (synthèse bibliographique)*

*Ce chapitre est en préparation pour publication

Banza M. J., Useni S. Y., Meersmans J., Wellens J., Bogaert J., Kasongo L.M. E., Colinet G. (2026). La plinthite dans les pédopaysages des régions tropicales : formes évolutives et pratiques de gestion (synthèse bibliographique).

2.1. Résumé

L'objectif de cette étude est de réaliser une méta-analyse des sols plinthitiques dans les pédopaysages des régions tropicales. Il ressort du parcours bibliographique que la plinthite se forme principalement dans la ceinture tropicale, mais peut s'étendre jusqu'aux régions semi-arides et arides. Elle est plus fréquente dans les matériaux issus de l'altération des roches basiques, se développant sur des terrains plats ou en pente douce. La plinthite est caractéristique des zones présentant un mauvais drainage des sols et elle durcit de manière irréversible en pétroplinthite après des cycles répétés de mouillage à l'eau et de séchage à la lumière du soleil. Toutefois, son durcissement est accéléré par des activités naturelles et anthropiques telles que la désertification et la déforestation.

La plinthite peut adopter différentes formes, telles que concrétionnaire, vésiculaire, cellulaire ou plate, avec une teinte variant de 10R à 7,5YR. Sa taille dépasse 2 mm, et elle présente une consistance dure à l'état sec. Sa minéralogie est principalement composée de kaolinite, de mica et de quartz. Elle est également un produit pédogène riche en fer et pauvre en humus, avec une faible capacité d'échange cationique ($< 15 \text{ cmole (+) kg}^{-1}$) et une saturation en bases inférieure à 50%.

Diverses études soulignent que la plinthite et ses formes apparentées posent des problèmes, allant de légers à graves, rendant les sols peu propices aux activités agricoles. En réponse, chercheurs et agriculteurs ont développé diverses pratiques de gestion, notamment l'agriculture biologique avec parfois l'ajout d'engrais minéraux, des techniques de travail conservateur du sol, des méthodes de travail du sol (billonnage, zaï, etc.), l'utilisation de polymères macromoléculaires comme amendements organiques, ainsi que des agents chimiques pour inverser le processus de durcissement. L'agroforesterie et la culture de couverture font également partie des approches adoptées. Cependant, l'impact de ces pratiques sur les propriétés des sols plinthitiques varie, avec souvent des effets minimes sur le rendement des cultures à court terme. Des résultats positifs sont généralement observés à long terme.

Mots-clés : Plinthite, Pétroplinthite, Latérite, Pédopaysage, Tropiques

2.2. Abstract

The objective of this study was to conduct a meta-analysis of plinthic soils across tropical pedolandsapes. The literature review indicates that plinthite predominantly forms within the tropical belt, but may also extend into semi-arid and arid regions. It is more frequently associated with weathered basic rocks and typically develops on flat to gently sloping terrains. Plinthite is characteristic of poorly drained environments and undergoes irreversible hardening into petroplinthite following repeated cycles of waterlogging and drying under solar exposure. This hardening process is further accelerated by both natural and anthropogenic disturbances, notably desertification and deforestation.

Plinthite occurs in various morphological forms, including concretionary, vesicular, cellular, and platy structures, with hues ranging from 10R to 7.5YR. Its particle size

generally exceeds 2 mm, and it exhibits a hard consistency in the dry state. Mineralogically, plinthite is dominated by kaolinite, mica, and quartz. It represents a pedogenic material rich in iron and poor in organic matter, characterized by a low cation exchange capacity ($< 15 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) and a base saturation typically below 50%.

Numerous studies highlight that plinthite and related materials impose constraints ranging from moderate to severe, rendering soils poorly suited for agricultural production. In response, researchers and farmers have developed a range of management practices, including organic farming sometimes supplemented with mineral fertilizers, conservation tillage techniques, specific soil management practices (e.g., ridging, zaï), the use of macromolecular polymers as organic amendments, and chemical agents aimed at reversing the hardening process. Agroforestry systems and cover cropping have also been implemented. However, the effects of these practices on plinthic soil properties remain variable, with limited short-term impacts on crop yields. Positive outcomes are generally reported over longer time scales.

Keywords: Plinthite; Petroplinthite; Laterite; Pedolandscape; Tropics

2.3. Introduction

Les régions tropicales représentent la majeure partie des terres agricoles propices à diverses cultures telles que les céréales, les légumineuses, les racines, les légumes, etc. Cependant, ces régions font face à une forte croissance démographique, entraînant la nécessité d'une production agricole accrue sur des terres qui se dégradent rapidement (Sanchez, 2018). La plinthite est parmi les formes majeures de dégradation des sols, souvent marginalisée, mais qui constitue une des contraintes les plus sérieuses pour la productivité agricole (Asiamah & Dedzoe, 1999). Cette productivité doit augmenter pour contribuer à la sécurité alimentaire dans un contexte où la prévalence de la sous-alimentation mondiale a augmenté à environ 9,9 % en 2020, contre 8,4 % un an auparavant (FAO, 2021).

L'origine de la plinthite est liée aux fluctuations de la nappe phréatique et aux restrictions de drainage dans un matériau parental riche en fer (Dos Anjos et al., 1995; Garcia et al., 2013; Giorgis et al., 2014; Rellini et al., 2015; Wildemeersch et al., 2015; Zhao et al., 2021). Du point de vue génétique, la plinthite se forme par la ségrégation du fer, soit *in situ* (à partir d'autres horizons fortement altérés), soit *ex-situ* (à partir de sols adjacents situés en positions topographiques plus élevées) (Costantini & Priori, 2007; Soil Survey Staff, 2014; Tardy et al., 1997).

Également connue sous le nom de latérite dans le passé, la plinthite est une accumulation souterraine d'(hydro)oxydes de fer, d'argile kaolinique, de quartz, et est pauvre en humus (Brogowski & Kwasowski, 2012; Jones et al., 2013; Legros, 2013). Elle durcit de manière irréversible en pétroplinthite lors d'expositions répétées à l'eau et à la lumière du soleil (Eghbal et al., 2012; Martins et al., 2018a, 2018b; Soil Survey Staff, 2014; WRB-IUSS, 2015), associée étroitement aux horizons

plinthitiques. Ces derniers se présentent sous forme nodulaire, réticulée, plate ou colonnaire, avec une couleur variant de rouge foncé à rouge jaunâtre ou brun foncé (Jien et al., 2010). Les sols plinthitiques, impénétrables par l'eau et l'air, limitent le développement des racines (de Moraes et al., 2006; Liu et al., 2020; Sarkar & Bandyopadhyay, 2018; Stiles et al., 2001; Wildemeersch et al., 2015; Yaro et al., 2006). Cela entraîne le perchage de l'eau, provoquant la perte de matériaux du sol adjacent et contribuant à la pauvreté en bases et en éléments essentiels (Brogowski & Kwasowski, 2012). Avec la dégradation de la couverture végétale, l'érosion expose le matériau plinthitique à la surface, déclenchant le durcissement et la cimentation (Yaro et al., 2006), réduisant considérablement le volume effectif du sol disponible pour le stockage des nutriments (Eswaran et al., 1990).

La plinthite est répandue dans les régions tropicales et subtropicales caractérisées par des précipitations abondantes et des températures élevées (Aide et al., 2004; D'Amore et al., 2004; Nahon, 2003; Stiles et al., 2001; WRB-IUSS, 2015), notamment dans la zone de transition de la forêt tropicale à la savane, où ces sols étaient autrefois plus humides (Jones et al., 2013). La FAO estime que la superficie totale des sols plinthitiques s'élève à environ 60 millions d'hectares (WRB-IUSS, 2015).

Malgré sa prévalence, la plinthite n'a pas reçu une attention adéquate de la part des scientifiques (Oluwatosin et al., 2020). Ainsi, une revue des travaux existants sur les sols à plinthite serait cruciale pour développer des stratégies de gestion durable de cette contrainte à l'utilisation des terres (Asiamah, 1999; Oluwatosin et al., 2020; Wang et al., 2020).

L'objectif de cette étude est de réaliser une méta-analyse des plinthosols dans les pédopaysages tropicaux, avec une exploration approfondie de leur origine, développement, distribution, propriétés, taxonomie, ainsi que des pratiques de gestion durable identifiées dans la littérature.

2.4. Mécanismes et facteurs de formation de la plinthite et de ses formes associées

3.4.1. Climat

La plinthite se développe principalement dans la ceinture tropicale, située entre les latitudes 30°N et 30°S, où les conditions nécessaires à sa formation, connue sous le terme de "plinthisation", sont généralement réunies en raison de la saturation intermittente en eau des horizons. Cependant, des études indiquent que la plinthite peut également se trouver dans des régions semi-arides et arides (Gilkes et al., 2003; Legros, 2013). Parallèlement, des chercheurs ont identifié la plinthite dans des climats chauds et humides caractérisés par des précipitations abondantes et une courte saison sèche, tels que dans l'ouest de l'Inde, en Afrique de l'Ouest et en Amérique du Sud (Nahon, 2003; Widdowson, 2009; WRB-IUSS, 2015). Les variables climatiques, en particulier la température et les précipitations, sont signalées comme les facteurs prédominants influençant l'altération chimique des sols. La température, selon Volkoff (1998), impacte les réactions des oxydes de fer dans le sol, soutenant ainsi la

théorie de l'origine hydrothermale de certains oxydes de fer. Une augmentation de la température favorise la décomposition des matériaux parentaux riches en fer et en manganèse, stimulant ainsi la formation de la plinthite (Asiamah, 1999; Asiamah & Dwomo, 2010; Carvalho et al., 1991; Daniels et al., 1978; Eswaran et al., 1990; Nahon, 2003; Roquin et al., 1990).

Sous des climats alternants entre saisons humides et sèches (Malaisse, 1997), le fer peut être réduit pendant les périodes de saturation hydrologique, se déplaçant ensuite par illuviation et diffusion-convection pour former des zones d'épuisement et d'accumulation (Jacobs et al., 2002). Pendant la saison sèche, le fer précipite et cristallise dans les zones d'accumulation, aboutissant à la cimentation de la plinthite (FAO, 2001). La diminution de la profondeur de la nappe phréatique à ce stade favorise une cristallisation accrue des minéraux de fer, conduisant au durcissement de la plinthite en pétroplinthites (Dos Anjos et al., 1995).

Des précipitations excessives entraînent le lessivage du profil du sol par l'éluviation des cations basiques. Les sols sujets au lessivage ont tendance à être plus acides, favorisant la genèse de la plinthite dans des conditions chaudes prévalant dans les régions tropicales (Sanchez, 2018). Lorsque la teneur en eau du sol est proche de la capacité au champ, la plinthite devient ferme ou très ferme, atteignant une dureté maximale lorsque la teneur en humidité est inférieure au point de flétrissement permanent (Jacobs et al., 2002).

2.4.2. Nature du matériau d'origine

Giorgis et al. (2014) identifient un profil plinthitique reposant sur un socle paléoprotérozoïque composé principalement de roches granodioritiques liées au cycle magmatique de l'Éburnéen en remontant vers le saprolite dans la Balkouin, au Burkina Faso. Nahon (2003) affirme que les plinthites conservent les textures, structures et volumes des minéraux de la roche mère, expliquant ainsi leur épaisseur, notamment les saprolites. Des recherches ont établi une corrélation entre la formation de plinthite à la quantité de Fe extractible par le dithionitecitrate-bicarbonate dans le matériau parental. La seule caractéristique qui distingue la plinthite de tous les autres matériaux riches en oxydes de fer est sa capacité à durcir de manière irréversible lors de mouillages et de séchages répétés (Figure 2-1), en particulier lorsqu'elle est exposée au soleil (Dos Anjos et al., 2019; Garcia et al., 2013; Kumar et al., 2018; Nafi et al., 2020; Pereira-De-Oliveira et al., 2019; Rellini et al., 2015; Sarkar & Bandyopadhyay, 2018), avec des variations saisonnières redox (le Roux & du Preez, 2008; Ogunwole et al., 2001; Zhao et al., 2021). Selon Daniels et al. (1978), ce durcissement irréversible est dû à la cimentation de la plinthite par l'oxyde de fer.



Figure 2-1 : Fragments de pétroplinthise (ironstone) formées par durcissement irréversible de la plinthise sous l'effet de cycles répétés de mouillage et de séchage. Les agrégats ferrugineux, riches en oxydes de fer, présentent une structure vacuolaire et une forte cohérence, pouvant être isolées du sol environnant sous forme de blocs durcis (Crédit photo : Banza M.J).

Quesada et al. (2011) ainsi que WRB-IUSS (2015) notent que la plinthise est plus fréquente dans les matériaux d'altération des roches basiques que dans ceux des roches acides, en raison de la richesse en fer des roches basiques. Cependant, l'essentiel est que la présence d'une quantité suffisante de fer, soit provenant du matériau d'origine lui-même, soit apportée par les eaux d'infiltration ou les eaux souterraines ascendantes, est cruciale pour déclencher la plinthisation (Rellini et al., 2015).

En effet, le matériau parental exerce une influence significative sur la texture d'un profil de sol altéré, en particulier celle de la plinthise (Osher & Buol, 1998). Asiamah (1999) suggère que la plinthise se forme généralement dans le sous-sol riche en argile, en particulier de la kaolinite, fréquemment caractérisée par des quantités modérées à élevées d'oxydes de fer "libres". Costantini & Priori (2007) ont rapporté environ 98% de l'argile dispersible totale dans la plinthise.

2.4.3. Topographie

Le rôle de la topographie dans les formations de plinthise et de ses formes apparentées réside dans son impact sur la distribution spatiale et temporelle de l'eau dans les paysages (Eze et al., 2019). Des études telles que celle de Seibert et al. (2007) ont établi des corrélations significatives entre les indices topographiques examinés et les propriétés du sol. Par exemple, l'épaisseur de la couche organique et de l'horizon

E lessivé a montré une augmentation respective avec l'indice topographique et la zone de pente ascendante.

La plinthisation, ou la formation de la plinthite, se produit dans des sols où les horizons d'altération sont saturés d'eau pendant une partie de l'année (Aide et al., 2004). Ces sols sont donc souvent associés à des positions plus basses du paysage, souvent caractérisées par un mauvais drainage (Asiamah & Dedzoe, 1999; Brogowski & Kwasowski, 2012; Fritsch et al., 2007; Wildemeersch et al., 2015; Zhao et al., 2021). Osher & Buol (1998) ont observé des quantités significatives de plinthite dans des sols situés dans des positions paysagères mal ou assez mal drainées au Pérou. La position topographique d'un sol dans un paysage influe sur la rétention prolongée de l'eau, les sols sur les pentes inférieures ayant une capacité plus élevée à retenir l'humidité par rapport aux pentes moyennes et supérieures (Ikazaki et al., 2018).

Des études de Daniels et al. (1978) suggèrent que la plinthite est principalement limitée aux paysages plats ou légèrement ondulés, où le mouvement horizontal au-dessus de l'horizon B supérieur n'a pas été observé, et la plinthite nodulaire semble être associée à des paysages en pente douce. Volkoff (1998) ajoute que la plinthite est également présente dans des paysages montagneux et ondulés, souvent avec des pentes convexes.

2.4.4. Autres facteurs

D'autres facteurs naturelles et anthropiques, tels que la suppression de la couverture végétale, peuvent favoriser le développement de la plinthite (Eze et al., 2014) en déclenchant l'érosion du sol de surface et exposant la plinthite à l'air libre (FAO, 2001; WRB-IUSS, 2007). La suppression de la végétation et de la couverture du sol entraîne un réchauffement du sol, accélérant ainsi l'oxydation et la plinthisation, conduisant à la formation de la pétroplinthite à partir de la plinthite molle. Plusieurs études montrent que les activités dominantes de déforestation contribuent à une modification de la structure spatiale du paysage (Panagos et al., 2013; Rivas et al., 2021; Sikuzani, 2019; Sikuzani et al., 2020; Tanaka et al., 2021).

Dos Anjos et al. (1995) ajoute que la réaction du sol (pH) est un facteur critique qui influence la formation de plinthite dans les sols. À des valeurs de pH plus faibles, le fer et le manganèse ont tendance à être plus solubles (Silva, 1969), favorisant ainsi l'accumulation de leurs produits d'altération dans le sol, l'une des conditions préalables à la formation de la plinthite (Widdowson, 2009).

Par ailleurs, Wang et al. (2020) ont étudiés les propriétés de trois profils des plinthosols en relation avec leur l'origine à Jiujiang, Wuhan et à Yueyang en Chine, et ont constaté que, à Jiujiang, la plinthite avait une origine dans les sédiments éoliens, tandis qu'à Wuhan et Yueyang, elle avait une origine alluviale. La différence d'origine des sols a affecté les propriétés hydrauliques du sol, le contenu en macroagrégats du profil Jiujiang étant relativement plus élevé que celui des profils Yueyang et Wuhan.

2.5. Morphologie et propriétés physicochimiques et minéralogiques de la plinthise

2.5.1. Morphologie et propriétés physiques

Les caractéristiques essentielles de la plinthise résident dans l'accumulation, la forme, la couleur et la consistance des hydroxydes et oxydes de fer qui lui confèrent une teinte distincte par rapport à la matrice du sol. Les formes de la plinthise sont décrites comme concr tionnaires, vésiculaires, cellulaires, et plates (WRB, 2022). Elle peut être séparée de la matrice du sol et résister au roulement entre les doigts (Jones et al., 2013). Les concrétions de plinthise sont assez cohérentes pour être facilement isolées du sol environnant, se développant à la fois dans et au-dessus des horizons marbrés réticulaires. Après plusieurs cycles de mouillages et de séchages, la plinthise, initialement molle, durcit de manière irréversible en pans durs ou en agrégats irréguliers, formant ainsi la p troplinthise, également appelée ironstone (Soil Survey Staff, 2014). La p troplinthise se présente souvent sous forme de gravier l che ou légèrement cimenté (Eswaran et al., 1990), avec une densité spécifique variant de 2,5 à 3,6 Mg m⁻³ (FAO, 2001).

La plinthise affiche des teintes allant de rose, rouge, ocre ou marron, souvent tachetée et striée. Ces variations de couleur résultent des oxydes de fer et de manganèse à différents stades d'hydratation, se produisant dans un sol bien développé avec les horizons A, B, et C, ayant subi des processus d'éluviation et illuviation (Asiamah & Dedzoe, 1999).

Toutefois, Daniels et al. (1978) ont développé un guide permettant d'identifier et de distinguer sur le terrain la plinthise des matériaux similaires qui ne durcissent pas de manière irréversible. Selon ce guide, les teintes de la plinthise varient de 10R   7,5YR ; sa taille est supérieure à 2 mm, sa consistance est dure à sec, mais peut être cassée, et ferme à l'état humide.

La contrainte des plinthosols est fortement liée à la profondeur, à l'épaisseur, et au drainage limité résultant de l'horizon plinthitique (de Moraes et al., 2006). La forme et la quantité de plinthise sont cruciales car elles affectent la perméabilité du sol et induisent le perchage de l'eau. Par exemple, la plinthise plate peut percher l'eau lorsque son pourcentage en volume atteint 10%, tandis que la plinthise nodulaire, bien que n'entrant pas facilement l'eau, peut indiquer des horizons sous-jacents de perméabilité plus faible et propices au perchage de l'eau (Daniels et al., 1978; Shaw et al., 1997). Blume et al. (1987) ont observé une nappe d'eau perchée ou secondaire pendant les périodes de fortes précipitations et de faible évapotranspiration, notant que l'écoulement de subsurface vers le bas de la pente se produit principalement au-dessus et à l'intérieur de l'horizon plinthitique.

Ezeaku & Anikwe (2006), ajoutent que la conductivité hydraulique saturée d'un horizon plinthitique est significativement plus faible que ce qui serait indiqué par la taille des particules, la structure, ou la minéralogie des argiles seule.

2.5.2. Compositions chimiques

La formation de la plinthite est orchestrée par des éléments clés tels que Si, l'Al, le Fe et le Mn, issus de l'altération de roches ignées, métamorphiques, et sédimentaires courantes. Les principaux composants de la plinthite mature comprennent l'oxyde de fer (Fe_2O_3), l'alumine (Al_2O_3) et la silice (SiO_2), révélant un processus complexe de fersiallisation et de ferrallisation (Davies, 1997; Ngon Ngon et al., 2009; Roquin et al., 1990; Soil Survey Staff, 2014). Les sesquioxydes et leurs oxydes hydratés dominant, suivis de substances kaolinitiques (Giorgis et al., 2014). Ils sont généralement pauvres en métaux alcalins et alcalino-terreux. Plusieurs travaux ont montré que la plinthite contient moins de bases échangeables (Costantini & Priori, 2007; Garcia et al., 2013; Yaro et al., 2006).

Les sols à plinthite se caractérisent par une pauvreté en métaux alcalins et alcalino-terreux, avec des niveaux réduits de bases échangeables, une capacité d'échange cationique faible ($< 15 \text{ cmole (+) kg}^{-1}$), une saturation en bases inférieure à 50%, et des concentrations très faibles en calcium et en potassium échangeables dans les sols de surface et les sous-sols. La réaction du sol est généralement acide en surface et très acide en profondeur, selon Volkoff (1998) et FAO (2001).

La formation de la plinthite nécessite la mobilisation et l'accrétion d'oxydes de Fe dans des conditions réduites, avec des sols soumis à une nappe phréatique fluctuante. Un apport externe de Fe, provenant des zones d'altération sur la pente supérieure, est également important (Payton et al., 1992). Initialement, le Fe s'accumule sous forme de ferrihydrite, puis se transforme en goethite, cristallisant finalement en limonite et hématite après séchage final (Miguel et al., 2013). Fauzi & Stoops (2004) soulignent que la formation de la plinthite, en partie postérieure à l'illuviation des argiles, est un processus d'oxydation-réduction impliquant la diffusion dans des conditions aérobies variées. La richesse en oxyde de fer confère aux sols plinthitiques une structure stable (Ngon Ngon et al., 2009).

La plinthite est riche en fer présent sous diverses formes, mais l'hématite et la goethite prédominent (de Oliveira et al., 2020; Ouédraogo et al., 2020; Volkoff, 1998). D'autres formes incluent la lépidocrocite, la magnétite, l'ilménite, et la limonite. Le fer peut représenter jusqu'à 100 g kg^{-1} dans les plinthosols, et la pétroplinthite peut même dépasser 300 g kg^{-1} (Soil Survey Staff, 2014; WRB-IUSS, 2007).

L'aluminium, quant à lui, se présente sous forme d'hydrates d'alumine et d'aluminosilicates. Des variétés telles que la gibbsite, la boehmite, la diaspore, et la diachrite amorphe sont des composants d'alumine dans la plinthite. Selon la FAO (2001) la plupart des plinthosols ont des teneurs élevées en fer et/ou en aluminium, avec des proportions variant de plus de 80 % d'oxydes de fer avec peu d'aluminium (environ 40%). Ces teneurs élevées en fer, parfois dépassant 100 g kg^{-1} , contribuent à la stabilité et à la structure caractéristique de la plinthite (WRB-IUSS, 2007).

2.5.3. Compositions minéralogiques

La plinthite se compose principalement de kaolinites, d'oxydes et d'oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium (Roquin et al., 1990; Yoboue et al., 2019). Ces minéraux résultent de l'altération des minéraux silicatés parentaux, constituant ainsi des minéraux authigéniques secondaires (Nahon, 2003). Tanner & Khalifa (2010) décrivent la plinthite comme des croutes de fer formées par l'oxydation et la précipitation d'oxydes de fer solubles ou colloïdes transportés à la surface. Une grande partie de la minéralogie de la plinthite est constituée de silicates ferromagnésiens et de minéraux oxydés tels que l'olivine, le pyroxène, et la magnétite, qui, lors de l'altération, fournissent une source de fer ferreux et ferrique (Widdowson, 2009). Ce fer peut être mobilisé, évacué, ou oxydé et fixé dans le profil d'altération.

Dans la plinthite, diverses formes minéralogiques de manganèse, telles que la lithiophorite et la birnessite, ont été identifiées, tandis que la fraction argileuse est dominée par la kaolinite, suivie par la goethite, la gibbsite et des oxydes de titane, tels que l'anatase, l'ilménite et le leucoxène (Bilong, 1992; FAO, 2001; Garcia et al., 2013; Yoboue et al., 2019). Ainsi, la plinthite peut présenter une variété de minéraux, reflétant les conditions qui prévalaient avant ou pendant sa formation (Eswaran et al., 1990).

2.6. Classification, distribution spatiale de la plinthite et formes pédogénèse associées

La terminologie liée aux produits d'altération des gisements minéraux a suscité une certaine confusion entre géologues et pédologues, avec des termes tels que latérite, ferricrete, duricrust, régolithe et plinthite utilisés de manière interchangeable pour décrire des matériaux identiques ou similaires (Beauvais, 2009; Eze et al., 2014; le Roux & du Preez, 2008; Tanner & Khalifa, 2010).

Au cours du XXe siècle, le terme latérite s'était élargi pour englober tout sol tropical riche en oxydes de fer, et la latéralisation était considérée comme le processus typique opérant dans les sols tropicaux (Jones et al., 2013). Widdowson (2009) tente de distinguer la latérite des ferricretes en soulignant que ces derniers ont tendance à se développer préférentiellement dans les positions caténaire inférieures, dépendant de l'accumulation mécanique de débris riches en fer érodés depuis des positions plus élevées du paysage. Cependant, cette distinction peut être difficile à établir.

Au milieu du XXe siècle, tout sol tropical rouge était considéré comme "latéritique", mais au fil du temps, les scientifiques ont cherché à différencier la latérite, un matériau trouvé dans ou sous les sols, des sols tropicaux riches en fer, en introduisant le terme "latosol" pour décrire ces derniers (Davies, 1997). Malgré ces efforts, il persiste des confusions et des associations erronées avec des sols profondément altérés des tropiques, notamment les oxisols (Eswaran et al., 1990).

Aujourd'hui, le terme "latérite" a été remplacé par "plinthite", utilisé universellement par les pédologues et les géographes pour décrire tous les sédiments pédochimiques et géochimiques terrestres enrichis en fer, très pauvres en matière

organique, et que l'on trouve près de la surface de la Terre (Alexandre, 2002; Eze et al., 2014). Ce changement de terminologie a été introduit au début des années 1960 (Eswaran et al., 1990), mettant fin à certaines discussions sur la définition universelle et facilitant le développement de nouvelles frontières dans les études sur les plinthites (Showers, 2002).

La difficulté majeure dans l'identification de la plinthite réside dans la distinction entre les matériaux qui durcissent irréversiblement lorsqu'ils sont exposés et ceux qui ne le font pas (Daniels et al., 1978). Pour remédier à cela, la Base de Référence mondiale pour les Ressources en Sols de l'Union Internationale des Sciences du Sol (WRB-IUSS) et la Taxonomie des Sols du Ministère Américain de l'Agriculture (USDA) ont développé des critères pour identifier un horizon plinthitique.

D'après la WRB-IUSS (2015), les plinthosols sont des sols contenant au moins 25 % de la plinthite dans les 100 premiers centimètres du profil, entravant la percolation et la pénétration des racines. Ils portent des noms traditionnels tels que les sols latéritiques d'eau souterraine et les sols latéritiques d'eau perchée. Ces sols sont associés dans les régions tropicales à des sols tels que les Ferralsols, les Alisols, les Acrisols et les Lixisols (FAO, 2001; Quesada et al., 2011).

Selon la Soil Survey Staff (2014), la plinthite est constituée de plusieurs horizons, tels qu'un épipédon, un horizon cambique, un horizon argilique, un horizon oxique ou un horizon C. Bien qu'elle se forme normalement sous la surface, elle peut également apparaître à la surface dans des zones de suintement à la base d'une pente. Les plinthites sont classées dans différentes catégories selon les systèmes de classification, tels que présenté dans le tableau 2-1 ci-dessous.

Tableau 2-1 : Classes de sols caractérisées par la présence de plinthite (Soil Survey Staff, 2014).

Grands groups	Ordre
Plinthaquepts	Inceptisols
Plinthaquox	Oxisols
Plinthaqualfs	Alfisols
Plinthoxeralfs	Alfisols
Plinthustalfs	Alfisols
Plinthaquults	Ultisols
Plinthohumults	Ultisols
Plinthudults	Ultisols
Plinthustults	Ultisols

Cependant, certains chercheurs utilisent les systèmes de classification USDA (Soil Taxonomy) et de la FAO-WRB pour compléter et suggérer de nouvelles classifications des sols plinthitiques dans leurs pays respectifs (Dos Anjos et al., 2007; Oluwatosin et al., 2020).

En ce qui concerne la distribution spatiale des plinthites et ses formes apparentées, celles-ci couvrent environ un tiers de toutes les terres émergées (Figure 2-2). La WRB-IUSS (2015) estime qu'il y a environ 60 millions d'hectares de plinthosols dans le monde. Ces sols sont plus communs dans les tropiques humides, notamment dans l'Est du bassin de l'Amazone, le bassin central du Congo, et certaines parties de l'Asie du Sud-est (WRB-IUSS, 2007). Dans le Haut-Katanga, République démocratique du Congo, les travaux de De Dapper & Malaisse (1979) identifient une cuirasse latéritique dans les dépressions fermées marécageuses des dembos, tandis que ceux de Alexandre (2002) ont signalé sa présence dans les roches précambriennes, notamment aux environs de Lubumbashi, à Luilu et dans les dembos, ainsi que dans les profils sableux à Kiniama, à Kinkolobwe, à Kisa Moyal et à Ditanto. Cette présence de cuirasse latéritique suggère des conditions pédoclimatiques qui ont favorisé la formation de la plinthite dans ces zones.

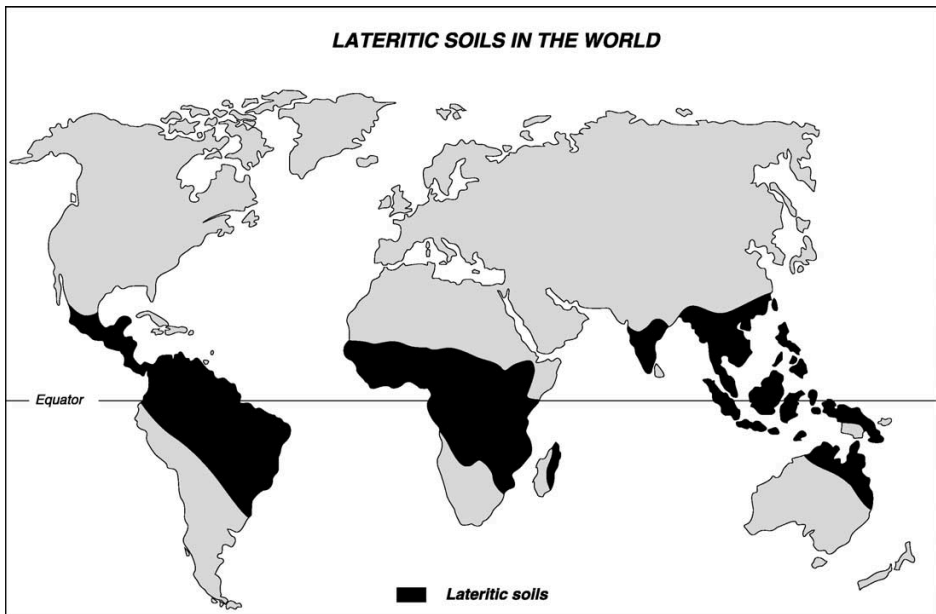


Figure 2-2 : Distribution des sols à plinthite dans le monde (Nahon, 2003).

Les vastes zones intertropicales où les plinthites affleurent indiquent des changements paléoclimatiques vers des conditions plus sèches qui ont entraîné la perte de la couverture végétale. Dans ces régions, la plinthite est présente dans la plupart des sols de savane à des profondeurs variables, et elle peut également se trouver sous une végétation d'arbustes sclérophytiques, selon les observations Volkoff (1998) et Oluwatosin et al. (2020).

Dans la zone soudano-sahélienne, des zones étendues avec des pisolithes et de la pétroplinthite sont identifiées, où la pétroplinthite forme des chapeaux durs sur des éléments de paysage soulevés/exposés (WRB-IUSS, 2015). Widdowson (2009) et Jones et al. (2013) ajoutent que la pétroplinthite est généralement dominante dans la zone de transition de la forêt tropicale à la savane, spécifiquement dans les anciennes

zones qui étaient beaucoup plus humides. Ces zones comprennent des dépressions topographiques telles que d'anciennes rivières, des marécages, des fonds de vallée et des flancs de vallée.

La plinthisite, qui se trouvait autrefois à une certaine profondeur, a durci et a été exposée sous la forme d'une épaisse calotte de pierre de fer qui résiste à l'érosion. Cette situation entraîne une inversion du relief d'origine et expose différentes zones d'altérations. Les zones de dépression où la plinthisite s'est formée sont protégées de l'érosion par leurs chapeaux de pierre de fer. Avec le temps, ces zones deviennent les parties les plus hautes du paysage, agissant comme une couverture protectrice contre l'érosion du sol sous-jacent (FAO, 2001; Jones et al., 2013; Laurent et al., 2017; O'Brien et al., 2019). Cette dynamique est illustrée dans la Figure 2-3.

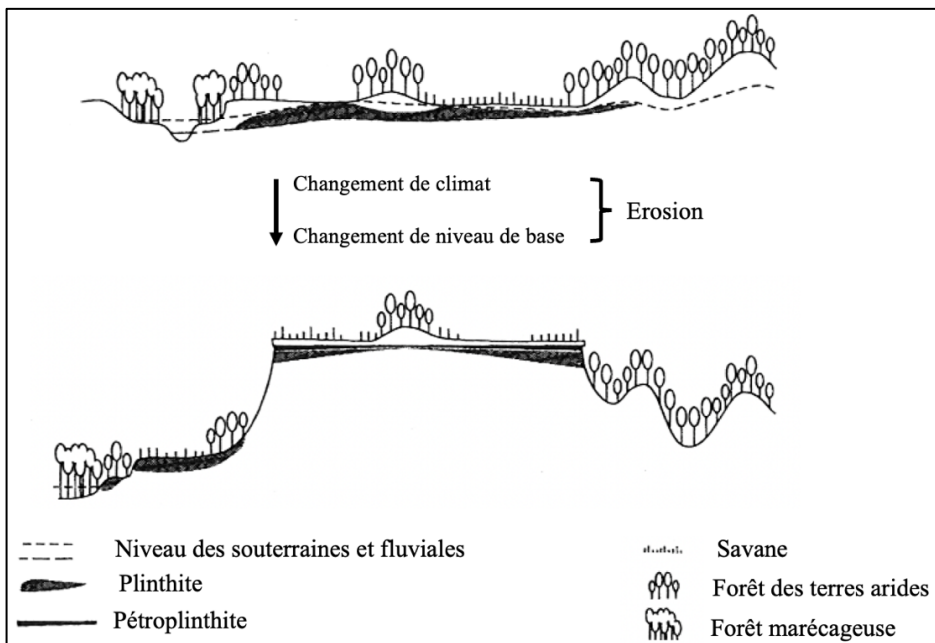


Figure 2-3 : Inversion du relief dans un paysage en érosion : le durcissement de la plinthisite exposée produit un bouclier protecteur contre la poursuite de l'érosion (FAO, 2001).

2.7. Implications agro-environnementales de la plinthisite et de ses formes apparentées

La tendance à la baisse du rendement des cultures est attribuée à plusieurs facteurs, notamment la diminution du carbone organique et des réserves d'éléments nutritifs dans le sol, ainsi que des stress biotiques et abiotiques tels que l'augmentation de la température et la variabilité des précipitations, liée à des conditions météorologiques changeantes et à la suppression des microorganismes bénéfiques, la pollution de l'environnement. Ce problème est particulièrement aigu dans les sols plinthitiques des

climats tropicaux et subtropicaux, qui sont souvent caractérisés par une faible disponibilité en nutriments (Costantini & Priori, 2007; Garcia et al., 2013).

Plusieurs études montrent que la plinthe et les formes apparentées peuvent constituer des problèmes légers à graves pour les activités agricoles sur les sols où elles sont présentes (Garcia et al., 2013; Soil Survey Staff, 2014). Ces sols se caractérisent par leur consistance ferme, leur faible teneur en matière organique et en bases échangeables, ainsi que des conditions de lixiviation poussée, ce qui les rend peu propices à la production végétale (Garcia et al., 2013). La formation d'ironman, résultant du durcissement irréversible de la plinthe, réduit le potentiel agricole du sol en restreignant la circulation de l'air et de l'eau, en affectant la zone trophique, la fertilité et en provoquant fréquemment l'engorgement des cultures (Bilong, 1992; Brogowski & Kwasowski, 2012; Daniels et al., 1978; de Moraes et al., 2006; Dos Santos et al., 2018; Jien et al., 2010; Wang et al., 2020). Daniels et al. (1978) soulignent que les racines ne pénètrent ni dans la plinthe nodulaire ni dans la plinthe platinée, mais suivent les zones plus friables environnantes, laissant des parties du sol nues ou conduisant à une dégradation de la couverture végétale. Hounkpatin et al. (2018) ont constaté une diminution de 0,7 à 19,5 tonnes par hectare de carbone organique du sol sur une période de 29 ans dans les couches à plinthe, à des profondeurs de 30 à 100 cm au Burkina Faso.

Eswaran et al. (1990a) soulignent que la présence de la plinthe a des effets directs et indirects sur les cultures. Les effets directs se manifestent lorsque la plinthe inhibe directement la croissance et le développement des racines, tandis que les effets indirects surviennent lorsque les nutriments sont précipités chimiquement, devenant ainsi indisponibles pour l'absorption par les cultures. Par ailleurs, la teneur élevée en fer des sols plinthitiques conduit à l'immobilisation du phosphore, limitant ainsi sa disponibilité pour les cultures (Mulaji, 2011; Plassard et al., 2015).

Cependant, les sols à plinthe sont également sujets à l'érosion accélérée, car le matériau restreint le mouvement descendant de l'eau, entraînant un déplacement latéral (de Moraes et al., 2006; Shaw et al., 1997). Asiamah & Dwomo (2010) indiquent que l'érosion peut enlever la couche arable, exposant les sous-sols riches en plinthe à la surface, les exposant à la chaleur et les durcissant de manière irréversible. L'exposition des horizons plinthitiques par des pratiques de gestion inappropriées peut entraîner une érosion rapide du sol, modifiant le paysage et conduisant à l'abandon de terres par les agriculteurs (Oluwatosin et al., 2020; Payton et al., 1992). Le taux d'érosion est estimé entre 50 et 100 tonnes par hectare par an dans ces types de sols (Eswaran et al., 1990).

2.8. Gestion des sols plinthitiques

Face aux multiples contraintes qu'offrent les sols plinthitiques et leurs formes associées, les scientifiques et les agriculteurs développent plusieurs stratégies de leur gestion en élaborant des techniques qui empêchent leur extension latérale et leur durcissement ultérieur, favorisant ainsi une meilleure production agricole.

Martins et al. (2018a) ont étudié l'influence de différents traitements chimiques et périodes d'immersion sur la réversibilité du durcissement de la plinthite au Brésil. Aucun impact significatif sur la stabilité structurelle de ces matériaux n'a été observé, démontrant la non-réversibilité du processus de durcissement. Une autre étude menée par Martins et al. (2018b), a évalué l'effet de différentes périodes de séchage sur le durcissement de la plinthite au Brésil. Les résultats ont révélé une corrélation entre les niveaux élevés de fer et/ou d'aluminium et la dureté accrue des échantillons de plinthite et de pétroplinthite. Toutefois, Jones et al. (2013) signalent que dans certains cas, les concrétions de plinthite ne sont pas suffisamment concentrées pour former une couche continue, mais durcissent de manière irréversible sous forme de pisolites dans une couche dense de nodules. De telles couches peuvent parfois être trouvées près de la surface grâce aux termites lors de la construction de leurs nids.

Patel et al. (2015) recommandent l'agriculture biologique pour restaurer la fertilité des sols plinthitiques. L'application d'engrais organiques notamment les fumiers, le lombricompost, les biofertilisants microbiens et le recyclage des résidus de culture jouent un rôle essentiel dans le cycle des éléments nutritifs des plantes, l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et l'augmentation de la productivité (Anguessin et al., 2021; Banza et al., 2019; Dutta et al., 2003; Ferreras et al., 2006; Karami et al., 2012; Kumar et al., 2018; Liu et al., 2020; Loke et al., 2012; Pale et al., 2021). Toutefois, Kumar et al. (2018) notent que malgré l'application d'importantes quantités d'engrais organiques, la teneur globale en carbone organique des sols plinthitiques n'augmente pas de manière significative, en raison de la minéralisation rapide du carbone organique dans les climats tropicaux et subtropicaux. Malafaia et al. (2016) ont expérimenté l'utilisation de boues de tannerie et d'irrigation avec des eaux usées domestiques pour améliorer la fertilité des sols plinthitiques au Brésil. Bien que cela ait augmenté le pH et les concentrations de certains nutriments comme P, K, Mg et Ca, les rendements de maïs n'ont pas atteint ceux obtenus avec des engrais minéraux seuls.

Les recherches de Du Preez et al. (2001) en Afrique du Sud ont révélé des impacts significatifs des pratiques de gestion des résidus sur la fertilité des sols plinthitiques. Le brûlage de la paille et le travail conservateur du sol, appliqués pendant 22 ans, ont entraîné une augmentation du pH, du potassium, du phosphore et du zinc par rapport aux parcelles sans brûlage et avec un travail conventionnel du sol. Une décennie plus tard, Loke et al. (2014) ont observé sur le même terrain une amélioration de 8% du rendement en grains de blé dans les parcelles avec la paille et le labour par rapport à celles avec la paille brûlée et sans labour, présentant principalement une augmentation de K, Ca, Mg, Na et CEC.

Parallèlement, une étude conduite par Nafi et al. (2020) a démontré que le travail du sol sur des billons, combiné à l'incorporation des résidus, a amélioré les stocks de nutriments des plinthosols en pentes. Au Nigéria, Wildemeersch et al. (2015) ont constaté une augmentation significative de la production de grains de millet jusqu'à $0,7 \pm 0,2 \text{ Mgha}^{-1}$ sur des terres marginales plinthosol avec des techniques de conservation des eaux et des sols (CES) telles que zaï + fumier, demi-lunes + fumier,

scarification + fumier, et contrôle + fumier. Cependant, ces pratiques n'ont apporté qu'une amélioration marginale à court terme de la qualité du sol.

L'étude de Wu et al. (2010) a montré une amélioration de la structure du sol et de la dissolution du sol dur en utilisant l'acide polypropylène, le polyéthylène alcoolique et le polycondensat urée-formaldéhyde. Cette application s'est montrée efficace en augmentant de 17,3% la teneur en agrégats du sol ; 41,8% la perméabilité du sol ; 11,2% la teneur en eau des sols durs par rapport au contrôle. Cependant, l'utilisation de polymères synthétiques soulève des questions importantes quant à leur faisabilité économique à grande échelle, notamment dans les contextes tropicaux à ressources limitées, ainsi que sur leurs implications environnementales potentielles (persistance des composés, risques de résidus et impacts écotoxicologiques). Ces éléments limitent leur transférabilité directe dans des systèmes agricoles extensifs et soulignent la nécessité d'évaluer leur durabilité à long terme.

Par ailleurs, il a été constaté que les amendements calciques peuvent améliorer la productivité des sols plinthitiques et de leurs formes associées en ajustant le pH (Asiamah & Dwomo, 2010). Cela a également un impact positif sur la disponibilité des nutriments immobilisés par le fer, qui est plus abondant dans la plinthite, lorsque les valeurs de pH augmentent. Dos Anjos et al. (1995) soulignent l'importance de contrôler la réaction du sol, un facteur critique influençant la formation de la plinthite dans les sols.

Eswaran et al. (1990) et Yaro et al. (2006) recommandent la réhabilitation des sols plinthitiques par la plantation d'arbres, bien que cela soit un processus lent et laborieux. Cette approche constitue une option pour une utilisation intensive des terres sur plusieurs générations. Cependant, les cultures souffriront de la sécheresse pendant la saison sèche (Rellini et al., 2015; WRB-IUSS, 2015). Pour atténuer ces défis, ils préconisent des mesures intensives de conservation des sols, telles que la construction de terrasses. Dans les unités pédologiques où la plinthite et la pétroplinthite sont proches de la surface, comme dans l'unité pédologique C (13-43 cm de profondeur) (Yaro et al., 2006).

Eze et al. (2014) indiquent que les agriculteurs possèdent une riche connaissance indigène sur la gestion des plinthosols, par exemple, la culture en tas pour la production d'ignames en Afrique de l'Ouest. Asiamah & Dwomo (2010) ont identifié des pratiques auprès des agriculteurs visant à maintenir l'épaisseur du sol exploitable, à éviter l'érosion et à garder les racines hors de portée des couches de plinthite, notamment la construction de digues en pierre au Burkina Faso et au Ghana, ainsi que la méthode de Zaï au Mali et au Sénégal. Des plus, ils ont identifié des pratiques communes dans toutes les communautés visitées dans ces pays. Il s'agit de la construction de monticules et de billons, la culture de couverture et le paillage sur les plinthosols.

Dos Santos et al. (2018) ont identifié quatre systèmes d'utilisation des plinthosols en Amazonie brésilienne, à savoir l'agriculture itinérante, les pâturages, la jachère mixte et la forêt secondaire, principalement pratiqués par de petits exploitants. Leur étude montre que les stocks de carbone organique du sol dans ces plinthosols varient entre 42,1 et 53,3 Mg C ha⁻¹ (0-100 cm). À titre comparatif, les stocks de carbone

dans les sols tropicaux forestiers non dégradés peuvent dépasser 70 à 120 Mg C ha⁻¹ sur la même profondeur, selon le type de sol et l'usage des terres (Batjes, 2016; Lal, 2004; Sanchez, 2018). Les valeurs rapportées pour les plinthosols apparaissent ainsi relativement modestes, ce qui reflète à la fois leur faible teneur intrinsèque en matière organique et les contraintes hydromorphes associées à la plinthite. Les auteurs indiquent que le changement d'utilisation des terres n'a pas significativement affecté les stocks de carbone, probablement en raison de pratiques agricoles non mécanisées limitant la perturbation des horizons superficiels, ainsi que de la dynamique temporelle relativement courte des systèmes étudiés.

Au-delà du stockage de carbone comme service de régulation climatique, ces faibles teneurs en matière organique influencent plusieurs services écosystémiques essentiels, notamment la stabilité structurale, la régulation hydrique, la capacité d'échange cationique et la disponibilité des nutriments (Stockmann et al., 2013). Cette contrainte organique constitue un facteur limitant majeur pour la productivité des petits exploitants opérant sur plinthosols.

2.9. Conclusion

Les sols plinthitiques, appauvris en matière organique et en bases échangeables, riches en fer et en kaolinite, présentent des défis inhérents tels qu'une faible capacité d'échange cationique, la présence de couches compactes, et une percolation limitée de l'eau, entraînant fréquemment des engorgements nuisibles aux cultures. La formation de pétroplinthite, résultant du durcissement irréversible de la plinthite, diminue considérablement le potentiel agricole de ces sols.

Face à ces défis, les scientifiques et les agriculteurs ont élaboré des stratégies de gestion visant à restreindre l'extension latérale et le durcissement ultérieur de ces sols, avec l'espoir d'améliorer la production agricole. Cependant, jusqu'à présent, les techniques de gestion de la plinthite identifiées n'ont pas toutes conduit à une optimisation significative de la productivité agricole, malgré certaines améliorations observées dans certains paramètres de fertilité des sols.

Ce constat souligne la nécessité de développer des techniques innovantes capables d'améliorer les propriétés de ces sols et d'induire une productivité accrue, répondant ainsi aux exigences d'une agriculture durable, en particulier dans le contexte actuel de sécurité alimentaire.

Chapitre 3

Milieu d'étude et méthodologie

3.1. Milieu

3.1.1. Localisation du site d'étude

Cette étude a été conduite sur le site agricole de l'entreprise FarmCo à environ 60 km à l'est de Lubumbashi. Le site est situé dans la vallée de la rivière Kifumanshi (Figure 3-1), le long de la route nationale reliant Lubumbashi à la cité de Kasenga. Lubumbashi, capitale de la province du Haut-Katanga, est localisée dans le sud-est de la République démocratique du Congo, à une altitude comprise entre 1 220 et 1 240 m. Deuxième ville du pays après Kinshasa, elle couvre une superficie d'environ 747 km² et constitue un centre économique majeur du fait de l'importance de son secteur minier. La région est, en effet, l'une des plus riches du monde en cuivre et cobalt ; ce qui a favorisé un essor industriel important au cours des dernières décennies.

Cette dynamique économique joue un rôle d'attraction pour la population provenant d'autres provinces, contribuant à une croissance démographique soutenue. On estime aujourd'hui que plus de deux millions d'habitants résident dans la ville et ses environs (Useni et al., 2024). Cette augmentation rapide de la population génère une pression accrue sur l'approvisionnement alimentaire, notamment en maïs grain, principale céréale consommée localement sous forme de farine.

La ferme FarmCo s'étend sur une superficie totale de 660 hectares, organisée en 10 blocs agricoles. Elle constitue l'une des plus grandes exploitations mécanisées de la région et joue un rôle important dans la production industrielle de maïs, destiné principalement à la transformation en farine pour la consommation locale. L'aménagement structuré du site, combiné aux pratiques agronomiques mises en place, en fait un terrain d'étude particulièrement pertinent pour l'analyse des interactions entre sols, pratiques culturales et rendements.

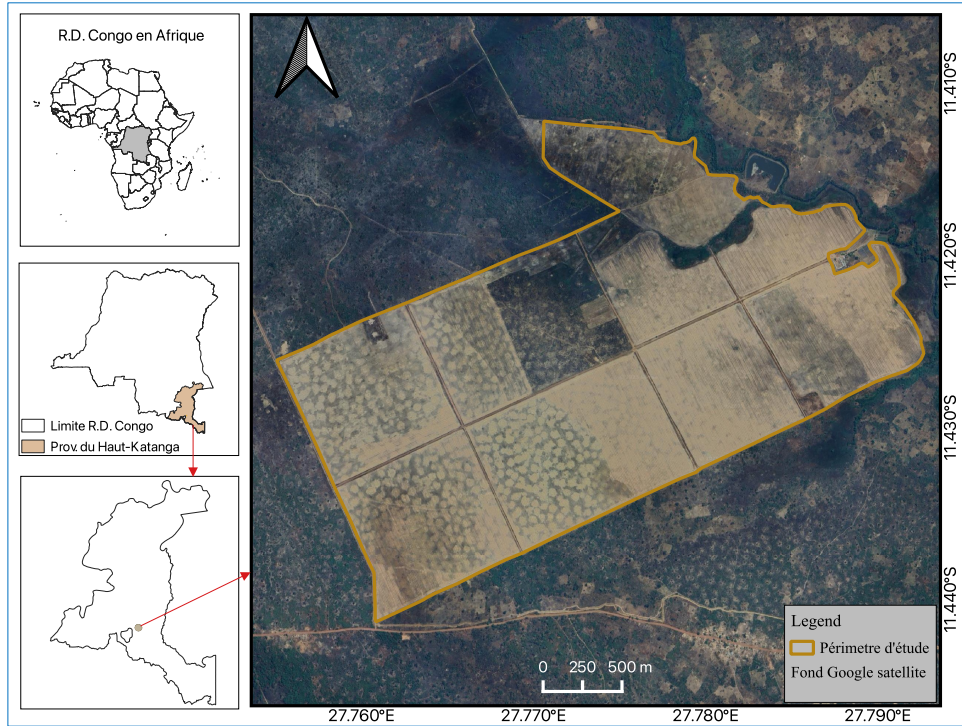


Figure 3-1 : Localisation du site d'étude sur la Ferme FarmCo (Haut-Katanga, RDC), montrant le périmètre d'étude délimité sur une image satellitaire Google et son positionnement à l'échelle nationale, provinciale et régionale.

3.1.2. Conditions climatiques

Le Haut-Katanga se situe dans une zone de transition climatique caractéristique des savanes zambéziennes et dominée par deux types climatiques définis par la classification de Köppen : Aw, correspondant au climat tropical à hiver sec, et C_w , désignant un climat subtropical humide présentant une saison sèche marquée (Malaisse, 1997). Plus précisément, la région de Lubumbashi est classée en climat subtropical humide à hiver sec de type C_{w6} , une variante du type C_w décrite par Assani, (1999). Ce climat est typique des hauts plateaux du sud-est de la République démocratique du Congo. Ce régime climatique est structuré autour de trois grandes périodes (Malaisse, 2011) :

- ✚ une saison des pluies de novembre à mars, caractérisée par l'essentiel des précipitations ;
- ✚ une saison sèche de mai à septembre, durant laquelle les pluies sont quasi absentes ;
- ✚ deux mois de transition, en avril et octobre, marquant l'alternance entre les deux saisons.

La pluviométrie annuelle affiche une variabilité importante. Les précipitations moyennes de la région sont estimées à environ 1 270 mm par an, mais les valeurs

observées peuvent fluctuer entre 650 et 1 550 mm, selon les années et les spécificités microclimatiques locales (Leblanc & Malaisse, 1978; Malaisse, 1997). Les températures suivent également une dynamique saisonnière contrastée. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 20,1 °C. Les minima, généralement enregistrés en juillet et août au cœur de la saison froide, peuvent descendre jusqu'à 8 °C, tandis que les maxima, mesurés principalement en septembre et octobre, atteignent fréquemment 32 à 33 °C (Malaisse, 2011).

Le régime des vents du Haut-Katanga résulte des grandes circulations atmosphériques tropicales. Durant la saison sèche, au moment du solstice d'hiver austral, un vaste anticyclone domine les hauts plateaux situés au sud du Tropique du Capricorne. Cette configuration génère un flux prononcé d'alizés de sud-est provenant de l'océan Indien, qui traversent le sud-est du Congo en perdant progressivement leur humidité avant d'atteindre le Haut-Katanga (Assani, 1999; Malaisse, 1997). Pendant la saison des pluies, le régime des vents s'inverse et s'alimente davantage dans les bassins du Kisangani, du Lualaba et de la cuvette congolaise, apportant une masse d'air humide typique de la mousson congolaise (Assani, 1999).

3.1.3. La végétation

La province du Haut-Katanga appartient à la région phytogéographique zambézienne et présente une mosaïque de formations végétales typiques des savanes Miombo. Selon la classification proposée par Malaisse (2011), quatre grands ensembles végétaux dominent le paysage :

- ✚ les forêts denses sèches,
- ✚ les forêts denses édaphiques,
- ✚ les forêts claires,
- ✚ et les savanes, qui constituent la formation la plus étendue.

Ces unités végétales résultent d'une combinaison de facteurs climatiques, édaphiques et topographiques qui façonnent une diversité d'habitats, depuis les plateaux bien drainés jusqu'aux bas-fonds saisonnièrement humides.

Les zones cuprifères situées autour de Lubumbashi présentent quant à elles une flore d'une grande originalité biogéographique. Ces milieux métallifères hébergent plus de 600 espèces végétales, dont une quarantaine sont strictement endémiques, adaptant leur physiologie aux concentrations élevées de métaux lourds qui caractérisent les sols cuprifères (Brookd et al., 1985). Cette richesse floristique exceptionnelle fait du Haut-Katanga un centre majeur de diversité végétale au sein de la région zambézienne.

Cependant, cette biodiversité est fortement menacée par la dégradation des milieux naturels. Les principales pressions identifiées incluent la déforestation, l'expansion agricole, l'exploitation minière et la croissance urbaine, qui contribuent à la fragmentation et à la disparition progressive des habitats (Useni et al., 2018).

Face à cette dynamique de dégradation, une nouvelle formation végétale s'est installée au cours des dernières décennies : les forêts de reboisement constituées essentiellement d'Eucalyptus et d'Acacia. Ces plantations ont été mises en place pour répondre à la demande croissante en bois-énergie et matériaux de construction, mais

également pour compenser en partie la perte de végétation naturelle (Sikuzani, 2019). Elles contribuent aujourd'hui à remodeler le paysage végétal du Haut-Katanga, bien qu'elles présentent une biodiversité beaucoup plus réduite que les formations naturelles qu'elles remplacent.

3.1.4. Contexte géologique

La région de Lubumbashi s'inscrit dans le contexte géologique de l'ex-Province du Katanga, caractérisée par une mosaïque de formations précambriennes dominées par les séries du Kundelunguien, du Roan et du Kibarien (Figure 3-2). La carte géologique régionale met en évidence la prédominance des formations schisto-gréseuses du Kundelunguien, des dolomies silicifiées du Roan et, localement, des intrusions granitiques du Kibarien dans l'environnement immédiat de Lubumbashi. Sous climat tropical humide à saisonnalité marquée, ces formations ont subi une altération chimique profonde, générant des manteaux d'altérites pouvant atteindre 10 à 20 m d'épaisseur (Alexandre, 2002). Cette altération intense a produit une succession verticale typique :

- ✚ un horizon superficiel meuble, riche en matière organique ;
- ✚ des niveaux ferrugineux discontinus (stone-lines, cuirasses, carapaces) ;
- ✚ un horizon bariolé caractérisé par l'alternance de zones décolorées (jaune-blanc) et enrichies en oxydes de fer (rouge) ;
- ✚ un horizon pallide dans les matériaux sableux ;
- ✚ des altérites profondes (saproлите ou lithomarge) conservant la structure du substratum.

Ces matériaux sont caractéristiques des environnements tropicaux soumis à des cycles alternés d'humectation et de dessiccation favorisant la mobilisation, la redistribution et la concentration du fer et de l'aluminium, processus déterminants dans la genèse des horizons plinthitiques.

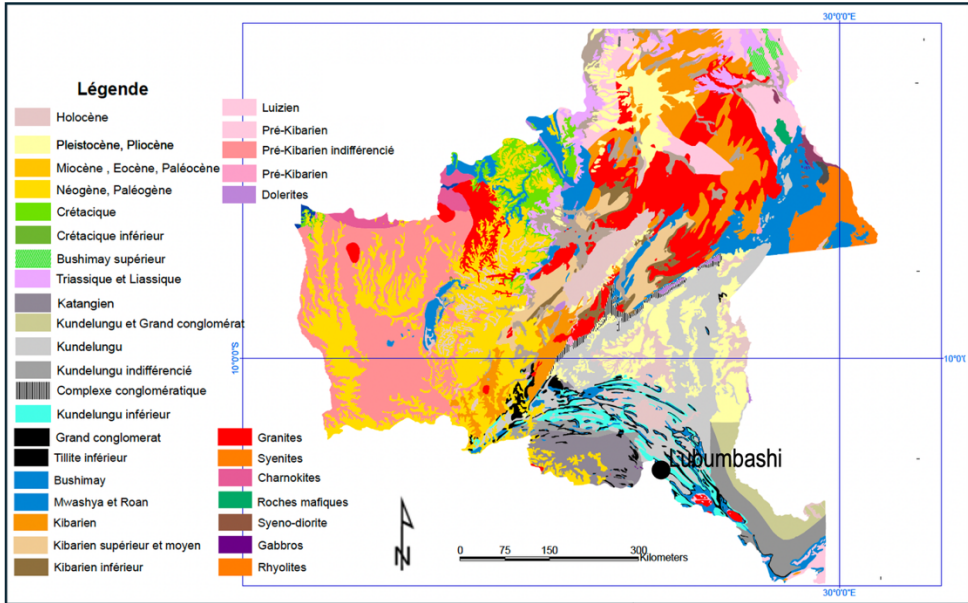


Figure 3-2 : Carte géologique de l'ex-Province du Katanga montrant la distribution des principales formations précambriennes (Kundelunguien, Roan, Kibarien et complexes granitiques), ainsi que la localisation de Lubumbashi. Cette carte illustre le cadre lithologique régional à l'origine des manteaux d'altération profonds et des formations plinthisques observées dans la zone d'étude (Kasongo, 2008).

3.1.5. Description pédologique

La région du Haut-Katanga se caractérise par une couverture pédologique étroitement liée à la structure géologique et à la dynamique géomorphologique des hauts plateaux zambéziens. Les paysages sont dominés par des surfaces d'aplanissement étagées, des glacis d'érosion et des vallées incisées qui ont favorisé la mise en place d'un ensemble de sols ferrallitiques et ferrugineux d'une grande complexité (Alexandre, 2002; Kasongo, 2008; Ngongo et al., 2009).

La répartition spatiale des principaux groupes de sols de la République démocratique du Congo, incluant l'actuel Haut-Katanga et la région de Lubumbashi, est illustrée à la Figure 3.3. Cette carte montre une forte hétérogénéité pédologique, reflétant l'influence conjointe du substrat géologique, du climat tropical saisonnier et des processus d'altération intense.

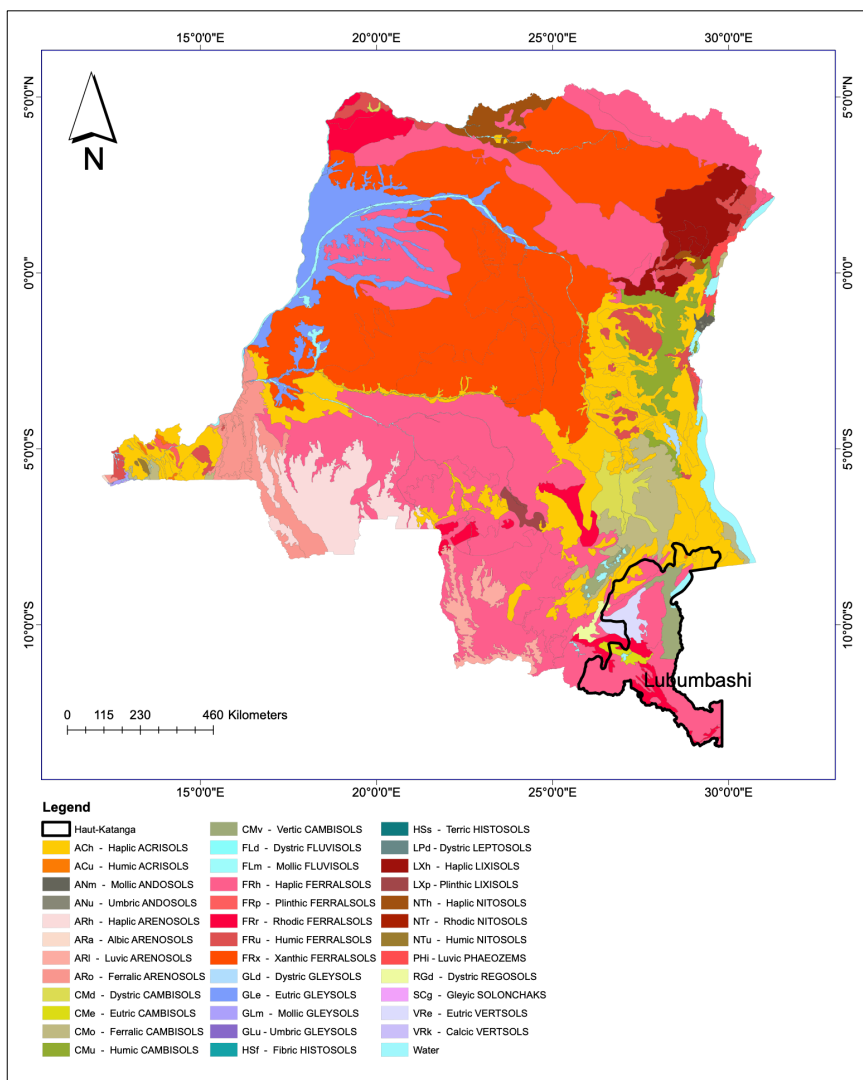


Figure 3-3 : Carte pédologique simplifiée de la RDC (incluant Haut-Katanga), montrant la distribution spatiale des principaux Groupes de Référence de sols selon la classification WRB (2022). La localisation de la région de Lubumbashi est indiquée afin de situer la zone d'étude dans son contexte pédologique régional. Source adaptée de Van Engelen et al. (2006).

3.1.5.1. Grands groupes de sols de la province du Haut-Katanga

Le Haut-Katanga présente une grande hétérogénéité pédologique. Selon Ngongo et al. (2009), les principaux Groupes de Référence rencontrés dans la région incluent les Ferralsols, Acrisols, Arenosols, Regosols, Cambisols, Vertisols, Fluvisols et

Gleysols. Le Tableau 3-1 synthétise leurs principales caractéristiques diagnostiques telles que définies par la classification de la FAO (WRB, 2022).

Tableau 3-1 : Principales caractéristiques des grands groupes de sols du Haut-Katanga.

Type de sol	Propriétés Morphologiques	Propriétés chimiques et physiques	Contraintes
Ferralsols	Sols profonds, rouges ou jaunes, fortement altérés ; horizons A-B bien développés ; structure micro-agrégée ; dominance de kaolinite. Certaines unités présentent un horizon plinthitique (Plinthic Ferralsols), caractérisé par la présence de plinthite susceptible de s'indurer en pétroplinthite.	Très faible CEC, pauvreté chimique, forte désaturation en bases ; bons drainage et stabilité structurale. Dans les variantes plinthitiques : enrichissement en oxydes de Fe et Al ; forte fixation du P par les oxydes de Fe ; conductivité hydraulique localement réduite.	Fertilité très faible ; nécessite des apports organiques ; faible rétention de nutriments. Dans les formes plinthitiques : restriction de la profondeur exploitable, limitation de l'enracinement et contraintes hydriques accrues.
Acrisols	Présence d'un horizon argilique (Bt) ; lessivage marqué de l'argile ; profil fortement différencié.	Acidité élevée ; forte tendance à l'aluminium échangeable ; faible saturation en bases.	Fertilité limitée ; toxicité aluminique ; besoins importants
Arenosols	Sols sableux très peu évolués ; horizons faibles ou absents ; texture grossière.	Très faible capacité de rétention d'eau ; très faible CEC ; faible teneur en MO.	Forte sensibilité à la sécheresse ; faible fertilité ; pertes rapides des nutriments.
Regosols	Sols jeunes, peu différenciés ; profils courts ; souvent issus de colluvions ou matériaux instables.	Fertilité variable selon le matériau parent ; faible structuration.	Sensibles à l'érosion ; faible profondeur utile ; potentiel moyen à faible.
Cambisols	Sols modérément développés avec début de formation d'horizons cambiques (Bw) ; texture variable.	Fertilité modérée ; meilleure capacité de rétention d'eau que les Ferralsols.	Agronomiquement favorables ; relativement productifs sous bonne gestion.

Restauration fonctionnelle des Plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières

Vertisols	Sols argileux riches en smectite ; fissuration en saison sèche ; formation de fentes profondes ; micro-relief gilgai.	Forte CEC ; bonne fertilité chimique ; forte plasticité ; gonflement/rétrécissement.	Difficultés de travail du sol ; fenêtres de labour très courtes ; engorgement saisonnier possible.
Fluvisols	Sols alluviaux jeunes ; stratifications ; profils peu différenciés ; matériaux déposés récemment.	Fertilité élevée ; dynamique hydraulique dépendante de la nappe et des crues.	Potentiel agricole très élevé ; bonne réponse aux cultures, surtout en bas-fonds.
Gleysols	Sols hydromorphes ; horizons gleyifiés (gris-bleu) ; saturation fréquente en eau ; taches de réduction/oxydation.	Mauvais drainage ; conditions anoxiques ; faible vitesse de minéralisation.	Limitations fortes : drainage indispensable ; risque d'asphyxie racinaire ; cultures adaptées à l'humidité.

Ces sols reposent sur un substrat cristallin précambrien constitué de gneiss, granites et schistes, auquel s'ajoutent des sédiments sableux pliopléistocènes. La plupart sont ferrallitiques, profonds, à horizons peu différenciés, avec des transitions diffuses entre horizons. Les sols rouges et jaunes dominent largement, souvent associés à des lithosols issus de cuirasses ferrugineuses ou de matériaux sableux (Ngongo et al., 2009).

La classification régionale s'appuie sur la notion de série pédologique définie par Sys & Schmitz (1959), correspondant à un ensemble de sols aux horizons différenciés présentant des caractéristiques morphologiques similaires.

Bien que la carte pédologique régionale identifie principalement des Ferralsols, certaines unités correspondent en réalité à des variantes plinthitiques (Plinthic Ferralsols). Il convient toutefois de noter que la représentation pédologique du Haut-Katanga présentée à la Figure 3-3 est dérivée de la carte pédologique de la République démocratique du Congo établie à l'échelle de 1:2 000 000. Localement, lorsque la plinthite constitue un horizon diagnostique continu et dominant à faible profondeur, ces sols peuvent relever du Groupe de Référence Plinthosols selon la WRB (2022). C'est dans ce contexte que s'inscrit la zone d'étude de Lubumbashi.

3.1.5.2. Sols dominants

La pédologie régionale se structure essentiellement autour de trois grands types de sols (Alexandre, 2002; De Dapper & Malaisse, 1979; Kasongo, 2008; Ngongo et al., 2009) :

1) Ferralsols (sols ferrallitiques)

Très répandus sur les plateaux (Kundelungu, Kibara, Bianco), ils se caractérisent par :

- ✚ une teinte rouge ou rouge-jaune (hématite, goethite) ;
- ✚ une faible CEC et une minéralogie dominée par la kaolinite ;
- ✚ une pauvreté en bases échangeables et en nutriments ;
- ✚ des horizons profonds, issus d'une altération très avancée.

Ils constituent des sols tropicaux anciens, chimiquement pauvres et particulièrement sensibles à la dégradation.

2) *Sols ferrugineux et formations latéritiques*

Dans les secteurs schisto-gréseux du Kundelunguien et au niveau des glacis, on observe une grande diversité de formations ferrugineuses :

- ✚ cuirasses latéritiques (massives, nodulaires, vermiformes, pisolithiques),
- ✚ stone-lines riches en nodules ferrugineux,
- ✚ carapaces ferrugineuses.

Ces niveaux témoignent d'une histoire pédogéomorphologique complexe, marquée par des alternances climatiques, des remaniements, et des phases d'induration.

3) *Sols hydromorphes localisés*

Dans les vallées de la Lufira et de la Kifumanshi, se développent :

- ✚ des sols alluviaux jeunes,
- ✚ des horizons gleyiques,
- ✚ des sols hydromorphes gris-bleu liés à la présence d'une nappe fluctuante.

Ces sols présentent une fertilité souvent meilleure que celle des Ferralsols, mais leur distribution est limitée.

Toutefois, autour de Lubumbashi, les sols présentent plusieurs particularités (Alexandratos & Bruinsma, 2012; Kasongo, 2008):

- 1) une forte présence d'horizons bariolés (mottled zone), liés aux fluctuations de la nappe ;
- 2) stone-lines abondantes, résultat de la concentration de nodules ferrugineux issus des altérites ;
- 3) de nombreuses cuirasses ferrugineuses, témoignant de cycles d'induration et de remaniement successifs ;
- 4) des altérites profondes sur siltites et shales, atteignant 12 à 16 m ;
- 5) des sols à plinthite et pseudo-plinthite dans certaines zones à nappe perchée, en particulier sur les glacis.

Les caractéristiques pédologiques de la région de Lubumbashi confèrent aux sols des contraintes agronomiques importantes, notamment une faible fertilité naturelle liée à la pauvreté chimique des Ferralsols, un risque marqué d'induration et de compaction dans les zones où la plinthite est présente, ainsi qu'une variabilité spatiale élevée des propriétés physico-chimiques (Ngongo et al., 2009). Ces limitations justifient pleinement les interventions agronomiques mises en œuvre dans les blocs

de FarmCo, telles que le sous-solage et l'apport de matériaux issus des termitières afin d'améliorer la structure et la productivité des sols.

3.1.5.3. Description des sols dans le site FarmCo

Le site d'étude couvre une superficie d'environ 660 hectares, subdivisée en dix blocs agricoles présentant une forte prédominance de Plinthosols, selon la classification de la FAO (WRB, 2022) et Nsakalabwe dans la Classification locale « Bemba ». Ces sols dérivent de formations ferrallitiques profondément altérées et se caractérisent par la présence de plinthis, sous forme de nodules ou de bancs latéritiques, dont la position dans le profil varie selon les blocs.

Un levé pédologique détaillé, réalisé avant les travaux de préparation profonde, a mis en évidence que plusieurs blocs (notamment B3, B7, B8, B9 et B10) présentaient des affleurements de cuirasse ferrugineuse en surface ou à très faible profondeur, parfois à moins de 10 cm. Dans les autres blocs, des niveaux cuirassés étaient également observés dans l'ensemble des profils étudiés, mais généralement à des profondeurs supérieures à 10 cm.

La présence de ces horizons cuirassés se traduit par une réduction de la profondeur effectivement exploitable, une augmentation locale de la résistance mécanique du sol et une forte hétérogénéité texturale. Ces contraintes limitent le développement racinaire ainsi que les flux hydriques verticaux en l'absence d'interventions mécaniques adaptées.

Ainsi, les sols du site se caractérisent par une forte variabilité spatiale liée à la distribution des horizons plinthitiques, localement indurés en cuirasse ferrugineuse, et au degré d'altération latéritique. Cette organisation pédologique conditionne le fonctionnement hydrodynamique du profil, limite l'exploration racinaire et module la performance agronomique, ce qui justifie le recours à des interventions intégrées combinant sous-solage et amendement par matériaux biogéniques sur le site expérimental FarmCo.

3.1.6. Caractéristiques, contraintes et dynamiques du système agricole du Haut-Katanga

Le secteur agricole du Haut-Katanga fait face à de profondes contraintes structurelles qui limitent sa capacité à répondre aux besoins alimentaires croissants de la population provinciale. La production locale demeure insuffisante et dépend largement des importations de denrées essentielles telles que le maïs, le blé, le riz, le sucre, la volaille, la viande et le poisson (Nyembo et al., 2018). Cette situation est exacerbée par la réduction progressive de la main-d'œuvre agricole, particulièrement dans les zones rurales où de nombreux hommes se tournent vers l'exploitation minière artisanale jugée plus rémunératrice que l'agriculture familiale.

À ces difficultés s'ajoutent l'insuffisance des infrastructures de transport et de communication. Ce manque de routes fonctionnelles entrave la commercialisation des produits vivriers et des cultures industrielles, limitant ainsi les débouchés et freinant la production agricole (Chausse et al., 2012).

L'agriculture reste majoritairement de subsistance et repose en grande partie sur de petits exploitants, parmi lesquels les femmes jouent un rôle déterminant (Mushagalusa & Nkulu, 2020; Nsele et al., 2022). Les pratiques culturelles demeurent largement traditionnelles, avec un recours fréquent à la culture itinérante sur brûlis et à des jachères de durées variables (Kasongo, 2008). Toutefois, autour des grands centres urbains comme Lubumbashi, une agriculture vivrière et maraîchère plus intensive s'est développée, portée par de petits producteurs qui obtiennent des rendements relativement plus élevés (Banza et al., 2019; Tabu et al., 2016, 2024).

Le maïs constitue la principale céréale de base, consommée sous forme de farine (fufu après cuisson) ou de bouillies. Dès les années 1990, le Haut-Katanga figurait déjà parmi les principaux pôles de production du pays, avec environ 300 000 tonnes, soit près d'un quart de la production nationale (Nyembo et al., 2018). D'autres cultures vivrières jouent un rôle important dans l'alimentation locale, notamment l'arachide, les légumineuses (l'arachide, le haricot, soja) et, dans le domaine des corps gras, les produits dérivés du palmier à huile.

L'élevage, quant à lui, reste limité : la plupart des villages disposent d'un petit cheptel composé de caprins, porcs et volailles, élevés en système extensif autour des habitations. La production de viande, de volaille, d'œufs et de lait demeure très insuffisante et conduit à des importations massives (Chausse et al., 2012). Bien que le Haut-Katanga dispose d'un réseau hydrographique et lacustre important favorisant la pêche, la production nationale ne couvre pas la demande, ce qui impose l'importation de poisson, notamment sous forme congelée, devenu plus accessible que la viande (Geraerts et al., 2022; Katemo Manda et al., 2010).

La disponibilité foncière constitue un autre enjeu majeur (Kasongo, 2008). Suite au récent lotissement et à l'attribution de vastes concessions minières dans la province (Useni et al., 2024), les terres encore accessibles pour l'agriculture sont désormais limitées, et souvent de qualité pédologique médiocre (Ngongo et al., 2009). La présence d'exploitants agricoles informels dans ces concessions engendre fréquemment des conflits fonciers entre populations locales et entreprises minières : celles-ci détiennent des titres légaux, tandis que les communautés locales revendiquent des droits coutumiers hérités (N'tambwe et al., 2023). Cette insécurité foncière, combinée à la pauvreté naturelle des sols et à la pression démographique croissante, soulève d'importants doutes quant à la possibilité d'étendre les superficies agricoles productives pour répondre durablement aux besoins alimentaires régionaux.

3.2. Méthode

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur une approche intégrée combinant des observations de terrain, des analyses physico-chimiques et hydrauliques des sols, des outils géospatiaux, des simulations agronomiques et des analyses statistiques avancées. Elle vise à évaluer de manière exhaustive l'effet combiné du sous-solage et des amendements issus de termitières géantes sur la dynamique des propriétés des plinthosols et sur la productivité du maïs grain dans le contexte agroécologique du Haut-Katanga.

3.2.1. Préparation du terrain

Afin d'atténuer les contraintes majeures associées aux Plinthosols présents sur le site, l'ensemble du périmètre agricole a fait l'objet, durant la saison culturale 2021–2022, d'une excavation systématique des cuirasses ferrugineuses affleurantes. Cette opération visait à fragmenter et à extraire les niveaux fortement indurés responsables de la limitation mécanique du développement racinaire.

Elle a été suivie d'un sous-solage mécanique réalisé au moyen d'une sous-soleuse à trois dents (ripper), espacées de 30 cm, opérant à une profondeur cible minimale de 40 cm dans les zones où la géométrie et le degré d'induration de la plinthite permettaient une action efficace. Cette intervention visait à fragmenter la continuité des niveaux plinthitiques résiduels, à accroître la profondeur fonctionnellement exploitable par le système racinaire, à améliorer l'organisation structurale du profil et à favoriser la percolation verticale de l'eau.

Parallèlement, les termitières géantes inactives construites par *Macrotermes falciger* (Erens et al., 2015), très abondantes sur le site, ont été exploitées.

Dans la région de Lubumbashi, leur densité moyenne est d'environ 7 unités ha⁻¹, avec un volume individuel estimé à environ 256 m³, soit un volume mobilisable d'environ 1 800 m³ ha⁻¹ (Malaisse, 2011; Mujinya et al., 2014). Après excavation et nivellement, ces matériaux ont été épandus sur les parcelles sous-solées sur une épaisseur moyenne de 18 ± 2,3 cm, correspondant à environ 2 000 t ha⁻¹, en considérant une densité apparente moyenne de 1,2 g cm⁻³ (Figure 3-4).

Bien que l'ensemble des blocs ait reçu un apport de matériaux de termitières, les quantités appliquées ont été volontairement plus élevées dans les zones ayant subi une excavation plus profonde de la plinthite. Cette adaptation visait à assurer un nivellement homogène du terrain et à compenser les déficits volumétriques engendrés par l'extraction des horizons indurés. Il convient de préciser que les interventions de sous-solage et d'amendement ont été appliquées de manière généralisée à l'échelle du périmètre étudié, dans une logique de restauration opérationnelle. Ce dispositif ne comprend donc pas de parcelles témoins strictement non traitées au sein du site expérimental, à l'exception du bloc B0 correspondant à la situation pré-intervention pour laquelle certaines données pédologiques et agronomiques avaient été collectées en 2016. Cette configuration reflète les conditions réelles de gestion agricole à grande échelle, mais limite la possibilité d'isoler expérimentalement les effets propres de chaque intervention.

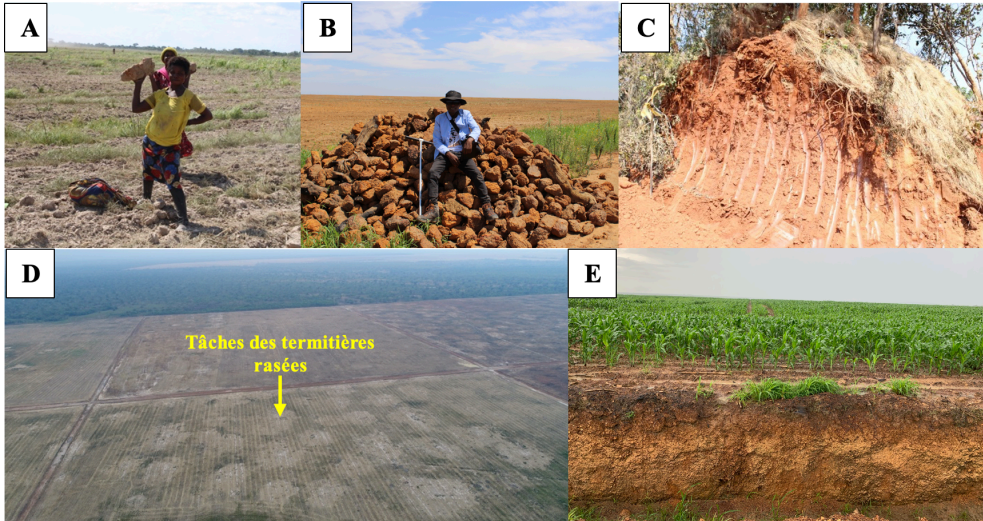


Figure 3-4 : A : ramassage et transport des fragments de plinthisite après passage de la sous-soleuse (ripper) ; B : stockage des blocs de plinthisite extraits hors des parcelles cultivées après l'opération de sous-solage ; C : excavation d'une termitière utilisée pour la préparation du matériau d'amendement appliqué au sol ; D: Vue aérienne par drone montrant les zones où les termitières ont été rasées (taches blanchâtres caractéristiques) ; et E : Champ de maïs en phase de croissance active, reposant sur un profil pédologique amélioré à la suite des opérations de sous-solage et de l'amendement aux matériaux de termitières (crédit photo Banza M.J.).

3.2.2. Échantillonnage des sols

Les prélèvements de sols échantillons perturbés ont été réalisés à l'aide d'une tarière pédologique. Une première campagne d'échantillonnage, conduite en 2022, a porté sur la couche 0–40 cm, correspondant à la zone rendue physiquement et chimiquement exploitable dans les secteurs où le sous-solage a effectivement permis d'atteindre une profondeur minimale d'environ 40 cm. Cette profondeur fonctionnelle ne correspond pas nécessairement à une profondeur uniforme sur l'ensemble du site, mais représente la profondeur cible atteinte dans les zones où l'action de la sous-soleuse a été la plus efficace. Cette profondeur fonctionnelle a été retenue afin d'évaluer la réponse du plinthosol aux interventions mécaniques et à l'amendement par matériaux de termitières, en lien avec la restauration du volume de sol effectivement accessible au système racinaire. Afin d'assurer une représentativité spatiale adéquate, chaque bloc a été échantillonné en cinq points fixes : un point central et quatre points disposés vers les angles, tout en respectant une distance minimale de 200 m des limites des blocs, afin de limiter les effets de bord liés à la topographie, aux infrastructures ou aux zones transitionnelles.

Parallèlement, au cours de cette même campagne d'échantillonnage en 2022, des prélèvements ont également été effectués dans la couche 0–10 cm, afin de permettre une comparaison entre les horizons de surface et où la profondeur fonctionnelle a été

restaurée. Cet horizon superficiel, relativement uniforme sur l'ensemble du site malgré la variabilité de la cuirasse latéritique, a servi de référence pour apprécier la stratification verticale du sol. Ces comparaisons font l'objet du chapitre 5 de la présente thèse.

Une seconde campagne d'échantillonnage a été réalisée en 2023 selon un schéma en transect en zigzag, avec une équidistance d'environ 200 m entre les points, ciblant cette fois-ci exclusivement la couche 0–10 cm. Cet horizon, directement influencé par les pratiques culturales et l'incorporation des matériaux de termitières, présentait l'avantage d'une épaisseur relativement constante sur l'ensemble du site, contrairement aux horizons plus profonds dont la variabilité dépend fortement de la position et de la profondeur de la plinthite. Ce caractère homogène a justifié son utilisation comme profondeur de référence méthodologique pour comparer les blocs entre eux et pour mettre en place une grille d'échantillonnage adaptée à l'analyse spatiale présentée dans le chapitre 4.

Lors de cette même campagne, la profondeur totale du sol a été mesurée à chaque point d'échantillonnage afin de caractériser l'hétérogénéité verticale du profil et la variabilité spatiale des niveaux d'induration après le passage de la sous-soleuse.

En complément des prélèvements des sols perturbés, des profils pédologiques d'environ $\pm 1,5$ m de profondeur ont été ouverts à l'aide d'une excavatrice dans des zones considérées comme représentatives de chaque bloc, sur base des observations morphologiques préalables et correspondant aux unités pédologiques dominantes. Ces profils ont été décrits conformément aux recommandations de la WRB, (2022).

Les horizons plinthitiques identifiés correspondent à des niveaux du profil enrichis en plinthite, matériau pédogénétique ferrugineux susceptible de durcissement irréversible, pouvant évoluer vers une pétroplinthite (cuirasse indurée) sous l'effet de cycles répétés d'humectation et de dessiccation.

Les horizons diagnostiques identifiés ont fait l'objet d'une description morphologique détaillée (couleur, structure, consistance, limites d'horizons), ainsi que de prélèvements destinés aux analyses physico-chimiques. Des échantillons non perturbés ont été prélevés à l'aide de cylindres de Kopecký afin de déterminer les propriétés physiques et hydrodynamiques du sol, présentées au chapitre 4 et utilisées comme base des travaux de modélisation développés au chapitre 6. Ces prélèvements ont été réalisés exclusivement dans des horizons meubles non indurés, situés dans la zone racinaire exploitable et pouvant contenir des nodules ferrugineux dispersés. Les horizons contenant une cuirasse indurée (pétroplinthite continue) n'ont pas été échantillonnés par cette méthode, afin d'éviter toute déformation du cylindre, altération du volume d'échantillonnage ou biais lié à la présence de fragments massifs susceptibles d'affecter l'estimation de la densité apparente et des propriétés hydriques.

Les comparaisons avec les conditions pré-intervention pour les variables hydrodynamiques n'ont pas reposé sur des mesures directes antérieures, mais sur l'utilisation de fonctions de pédotransfert (FPT), permettant d'estimer les propriétés hydriques à partir des caractéristiques texturales et structurales initiales du sol. L'applicabilité de ces FPT aux sols étudiés a été vérifiée en s'assurant que les

paramètres texturaux et les gammes de densité apparente entraînent dans leur domaine de validité (Saxton & Rawls, 2006). Bien que les plinthosols présentent une hétérogénéité ferrugineuse marquée, les estimations obtenues sont restées cohérentes avec les mesures réalisées post-intervention dans les horizons meubles non indurés. Ces estimations doivent toutefois être interprétées comme des approximations fonctionnelles et non comme des mesures directes des états préalables (Al Majou et al., 2016; Gunarathna et al., 2019; Kotlar et al., 2020).

L'ensemble des échantillons perturbés, y compris ceux issus des horizons diagnostiques, a été séché à l'air libre pendant cinq jours, puis homogénéisé et conditionné en vue des analyses au laboratoire. Les résultats issus des descriptions morphologiques et des analyses physico-chimiques et hydrauliques des profils sont présentés de manière détaillée en annexe A de la présente thèse.

3.2.3. Analyse au laboratoire

Les analyses physico-chimiques des échantillons perturbés ont été réalisées au laboratoire de Chimie du Sol de Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège (Belgique), selon les méthodes standards d'analyse. Le pH a été mesuré dans l'eau et dans une solution de KCl 1 N. Le carbone organique total a été déterminé selon la méthode de Walkley & Black, (1934), basée sur l'oxydation humide par le dichromate de potassium en milieu acide suivie d'un titrage en retour au sel de Mohr. Étant donné que cette méthode n'oxyde qu'environ 75 % du carbone organique présent, les valeurs obtenues ont été corrigées par l'application d'un facteur universel de 4/3. La matière organique du sol a ensuite été estimée à partir du carbone organique total en appliquant un facteur de conversion de 2, conformément aux recommandations de Pribyl, (2010).

Les éléments nutritifs disponibles ont été extraits à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium tamponné à pH 4,65 additionnée d'EDTA. Le phosphore assimilable a été déterminées par colorimétrie, tandis que les cations disponibles (Ca, Mg, K) et les éléments traces disponibles (Cu, Fe, Mn, Al) ont été quantifiés par spectrométrie d'émission optique à plasma induit (ICP-OES).

La granulométrie a été déterminée selon la méthode de la pipette, conformément aux protocoles de la norme XF X31-107, permettant de quantifier les fractions granulométriques et la texture du sol. Les analyses physiques réalisées sur les échantillons non perturbés ont été conduites au Plateau Technique de Physique et Mécanique du Sol (PhyMeSol), Agro-Bio Tech – Université de Liège. La densité apparente a été déterminée par la méthode du cylindre (cylindres de Kopecký), basée sur le rapport entre la masse du sol sec et le volume connu de l'échantillon (Hillel, 2004). La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) a été mesurée au moyen d'un perméamètre à charge constante (Constant Head) (Richards, 1941). Les courbes de rétention en eau ont été obtenues à l'aide de l'appareil de Richards, permettant d'estimer la capacité au champ (CC), le point de flétrissement permanent (PFP) et la réserve utile (RU) (Klute & Dirksen, 1986; Richards, 1941).

Pour le bloc B0 (témoin), correspondant à la situation antérieure à la mise en œuvre des interventions de sous-solage et d'amendement, des échantillons de sols perturbés

prélevés dans les horizons diagnostiques ont été analysés en 2016 en Belgique, en suivant les mêmes protocoles analytiques que ceux appliqués dans la présente étude. Les propriétés hydrauliques qui n'ont pas pu être mesurées expérimentalement pour ce bloc ont été estimées à l'aide des fonctions de pédotransfert de Saxton & Rawls, (2006). Ces équations, largement utilisées en hydrologie des sols, permettent de prédire les propriétés hydrodynamiques à partir de la texture (pourcentages de sable et d'argile) et de la teneur en matière organique, en fournissant des estimations robustes de l'humidité au point de flétrissement permanent (1500 kPa), de l'humidité à la capacité au champ (33 kPa), ainsi que de la conductivité hydraulique saturée.

✚ Humidité au point de flétrissement permanent (1500 kPa)

- Calcul intermédiaire :

$$\mu_{1500t} = -0,024 \times S + 0,487C + 0,006OM + 0,005 (S \times OM) - 0,013(C \times OM) + 0,068 (S \times C) + 0,031 \quad (3-1)$$

- Correction finale :

$$\mu_{1500} = \mu_{1500t} + (0,14 \times \mu_{1500t} - 0,02) \quad (3-2)$$

Cette humidité représente le seuil critique au-delà duquel les plantes ne parviennent plus à extraire l'eau du sol, même sous forte tension (Ghanbarian-Alavijeh & Millán, 2009; Tahmoures et al., 2025).

✚ Humidité à la capacité au champ (33 kPa)

- Calcul intermédiaire :

$$\mu_{33t} = -0,0251S + 0,195C + 0,011OM + 0,006 (S \times OM) - 0,027(C \times OM) + 0,452(S \times C) + 0,299 \quad (3-3)$$

Correction finale :

$$\mu_{33} = \mu_{33t} + [1,283(\mu_{33t})^2 - 0,37\mu_{33t} - 0,015] \quad (3-4)$$

La capacité au champ correspond à l'humidité du sol après drainage gravitaire, reflétant la quantité d'eau directement utilisable par les plantes (Chang et al., 2025).

✚ Humidité à saturation

Avant calcul, la quantité d'eau comprise entre saturation et 33 kPa est estimée.

- Humidité intermédiaire entre saturation et 33 kPa

$$\mu_{(S-33)t} = -0,278 \times S + 0,34 \times C + 2,022 \times OM + 0,018 (S \times OM) - 0,027(C \times OM) - 0,584 (S \times C) + 0,078 \quad (3-5)$$

$$\mu_{S-33} = \mu_{(S-33)t} + (0,636\mu_{(S-33)t} - 0,107) \quad (3-6)$$

- Humidité à saturation

$$\mu_S = \mu_{33} + \mu_{S-33} - 0,097S + 0,043 \quad (3-7)$$

Cette valeur exprime la teneur maximale en eau du sol lorsque tous les pores sont remplis (Fu et al., 2024).

✚ Paramètre de forme de la courbe de rétention

Saxton & Rawls (2006) utilisent la forme de Campbell pour déduire le paramètre structurel λ .

- Paramètre B

$$B = \frac{\ln(1500) - \ln(33)}{\ln(\mu_{33}) - \ln(\mu_{1500})} \quad (3-8)$$

- Paramètre de forme

$$\lambda = \frac{1}{B} \quad (3-9)$$

Ce paramètre traduit la pente de la courbe tension–humidité et reflète la distribution des tailles de pores dans le sol (Reynolds et al., 2023; Srerrt, 1964).

✚ Conductivité hydraulique saturée :

$$K_S = 1930 (\mu_S - \mu_{33})^{(3-2\lambda)} \quad (3-10)$$

Cette équation estime la capacité du sol à transmettre l'eau lorsque tous les pores sont saturés, une propriété essentielle pour modéliser l'infiltration et le drainage (Chapuis, 2012; Lee et al., 1985; Zhang & Schaap, 2019).

Avec :

- Variables texturales
 - ◆ S : sable (% masse)
 - ◆ C : argile (% masse)
 - ◆ OM : matière organique (% masse)
- Humidités du sol (fraction volumique : m³ m⁻³)
 - ◆ μ_{1500} : humidité au point de flétrissement permanent (1500 kPa)
 - ◆ μ_{33} : humidité à la capacité au champ (33 kPa)
 - ◆ μ_{33t}, μ_{1500t} : valeurs intermédiaires avant correction
 - ◆ μ_{S-33} : eau entre saturation et 33 kPa
 - ◆ μ_S : humidité à saturation
- Paramètres hydrodynamiques
 - ◆ B : paramètre exponentiel de la courbe tension–humidité (Campbell)
 - ◆ λ : pente de la courbe de rétention de l'eau ($\lambda = \frac{1}{B}$)
 - ◆ K_S : conductivité hydraulique à saturation (mm h⁻¹)

3.2.4. Données agro- météorologiques

Les données agro-météorologiques utilisées dans cette étude ont été extraites de la base satellitaire NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources, produits CERES/MERRA-2 ; <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, consultée le 10 février 2025) pour la période allant du 1er janvier 2016 au 31 décembre 2024, couvrant ainsi l'ensemble de la période d'analyse agronomique et

climatique. Le recours à cette source s'est imposé en raison de l'absence de stations météorologiques locales opérationnelles et suffisamment continues dans la zone d'étude.

Les variables retenues incluent la température minimale et maximale, la précipitation, l'humidité relative, la vitesse du vent, ainsi que le rayonnement solaire incident, considérés comme paramètres essentiels pour la modélisation climatique et agronomique. Les produits NASA POWER reposent sur l'assimilation de données satellitaires et réanalyses atmosphériques, et ont démontré une fiabilité satisfaisante dans des contextes agroécologiques variés (Khatibi & Krauter, 2021; Mourtzinis et al., 2017; Negm et al., 2018; White et al., 2008).

Toutefois, malgré leur robustesse, ces données présentent certaines limites liées à leur résolution spatiale relativement faible ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$, soit environ 55 km), susceptible de lisser les microvariations topographiques, pluviométriques et thermiques locales (Bosilovich et al., 2016). Les travaux de Glotter et al., (2016) et Mourtzinis et al., (2017) estiment l'incertitude associée à ces données entre 5 et 15 % selon les variables considérées. Cette incertitude demeure néanmoins acceptable pour les applications de modélisation agroclimatique, particulièrement dans les environnements tropicaux dépourvus de réseaux de mesure denses. Dans ce contexte, les produits POWER représentent une alternative validée et largement utilisée pour les études de simulation de cultures, d'analyse hydrique et de suivi agroclimatique (Negm et al., 2018).

L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été calculée selon la méthode FAO Penman–Monteith (Allen et al., 1998), reconnue comme l'approche la plus fiable pour estimer la demande évaporative de l'atmosphère à partir de variables météorologiques intégrées. Cette méthode fournit des estimations robustes dans une large gamme de conditions climatiques (Estévez et al., 2009; Gong et al., 2006; Jerszurki et al., 2019; Sharifi & Dinpashoh, 2014) et constitue la référence utilisée dans les systèmes de modélisation agronomique tels qu'APSIM. L'équation normalisée de Penman–Monteith (Équation 3-11) utilisée pour le calcul de l' ET_0 est présentée ci-dessous :

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{\Gamma + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3-11)$$

Où :

ET_0 : évapotranspiration de référence

Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa/°C)

R_n : rayonnement net de la surface de référence ($MJm^{-2}j^{-1}$)

G : flux de chaleur dans le sol ($MJm^{-2}j^{-1}$)

Γ : constante psychométrique (kPa/°C)

T : température moyenne journalière à 2 m (°C)

u_2 : vitesse du vent à 2 m (m/s)

e_s : tension de vapeur saturante (kPa)

e_a : tension de vapeur réelle (kPa)

$e_s - e_a$: déficit de tension de vapeur saturante (kPa)

γ : constante psychométrique (kPA/°C)

Plusieurs termes de l'équation, dont Δ , e_s , e_a , et la constante γ , nécessitent des calculs intermédiaires à partir des données météorologiques de base (T, humidité relative, rayonnement, vent, pression atmosphérique). Ces calculs ont été effectués conformément aux recommandations du manuel FAO-56 (Allen et al., 1998).

3.2.5. Conduite de la culture et détermination de rendement

La conduite agronomique de la culture du maïs (*Zea mays* L.) a été réalisée de manière uniforme sur l'ensemble du périmètre d'étude ce qui a permis d'assurer la comparabilité des résultats entre blocs et entre saisons. Tous les blocs, y compris le bloc témoin, ont été conduits selon un itinéraire technique identique, comprenant un labour mécanique suivi d'un hersage, le semis, la fertilisation minérale de fond ainsi que l'application d'un herbicide en pré-émergence. Au semis, un engrais NPK 10-20-10 a été appliqué à la dose de 200 kg ha⁻¹ comme engrais de fond, suivi d'un apport complémentaire d'urée à raison de 200 kg ha⁻¹ à 45 jours après semis comme engrais de couverture. Ce schéma de fertilisation a été appliqué de manière identique au cours des deux saisons culturales étudiées.

La variété de maïs SC719, développée par la société SEED-CO (Zambie), a été utilisée sur l'ensemble du dispositif expérimental. Les semis ont été réalisés avec un espacement de 0,75 m entre les lignes et 0,25 m sur la ligne, correspondant à une densité de 53 333 plants ha⁻¹. Le maïs a été conduit sur un cycle complet d'environ 210–215 jours (semis du 22 novembre au 2 décembre ; récolte du 22 au 30 juin). La récolte est intervenue au stade de maturité physiologique. La récolte est intervenue au stade de maturité physiologique, défini par un taux d'humidité des grains d'environ 13 %. L'ensemble de ces opérations culturales réalisé dans le site sont réalisés à l'aide de machines agricoles.

Pour cette étude, l'évaluation du rendement en maïs grain a été réalisée à partir de sous-parcelles de 1 m², soigneusement délimitées dans chaque bloc. Cette approche, basée sur la formule (Eq. 3-12) de Tandzi & Mutengwa, (2020), est largement utilisée dans les études agronomiques et dans les exploitations agricoles car elle permet une estimation fiable, rapide et représentative du rendement (Sapkota et al., 2016). Durant la première saison culturale (2022–2023), un total de 41 parcelles d'observation a été mis en place sur l'ensemble du site. Afin d'assurer une comparaison interannuelle, les coordonnées géographiques de chaque sous-parcelle ont été enregistrées à l'aide d'un GPS Garmin 66R (précision < 1 m), permettant de retrouver exactement les mêmes emplacements lors de la seconde saison culturale (2023–2024). Le rendement de la saison 2016–2017 a été retenu comme référence pour le bloc témoin (B0), représentant l'état initial du site avant la mise en œuvre des travaux de sous-solage et de l'épandage des matériaux de termitières.

$$\text{Rendement (kg/ha)} = \left[\left(\text{nombre de rangées de grain par épi} \times \frac{\text{nombre épi par m}^2}{100} \right) \times \left(\text{poids de 1000} - \frac{\text{grain (g)}}{10000} \right) \times 10000 \right] \quad (3-12)$$

3.2.6. Interpolation spatiale des propriétés du sol et du rendement

Une analyse géostatistique a été réalisée afin de représenter la variabilité spatiale des propriétés du sol et du rendement du maïs à l'échelle du périmètre étudié. L'objectif était de produire des surfaces continues capables de restituer les gradients spatiaux liés à l'hétérogénéité des plinthosols, à la dynamique d'induration des horizons et aux interventions agronomiques appliquées. L'ensemble des interpolations a été effectué sous ArcGIS 10.8.1.

Dans un premier temps, plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées (Johnston et al., 2001). Le Tableau 3-2 présente une synthèse comparative des principales méthodes évaluées, ainsi que leurs hypothèses, avantages et limites dans le contexte des plinthosols étudiés.

Tableau 3- 2 : Comparaison des méthodes d'interpolation évaluées.

Méthode	Hypothèse principale	Avantages	Limites	Résultat dans cette étude
Kriging	Existence d'une structure de dépendance spatiale (variogramme structuré avec palier et portée)	Méthode statistiquement robuste ; fournit estimation d'erreur	Nécessite variogramme exploitable ; sensible aux faibles tailles d'échantillons	Non retenue : absence de structure spatiale claire
Natural Neighbor	Interpolation locale basée sur la triangulation de Voronoï	Stable ; peu d'artefacts ; respecte la distribution des points	Ne fournit pas de modèle statistique explicite	Performances satisfaisantes
Spline classique	Surface à courbure minimale	Surface lisse et continue	Sensible aux discontinuités ; effet « bull's eye »	Artefacts marqués
Spline With Barriers	Courbure minimale + contraintes spatiales (barrières)	Respect des limites spatiales ; réduction des artefacts ; cohérence géomorphologique	Paramétrage plus complexe	Méthode retenue

Le krigeage a été évalué à partir de l'analyse des semi-variogrammes expérimentaux ; toutefois, aucune structure de dépendance spatiale claire (palier et portée significatifs) n'a pu être identifiée dans les données. Conformément aux

recommandations géostatistiques, lorsque les variogrammes ne présentent pas de structure exploitable, l'utilisation du krigeage n'est pas appropriée (Ajvazi & Czimber, 2019; Cressie, 1990; Goovaerts, 2008), justifiant son exclusion au profit de méthodes. Les méthodes Inverse Distance Weighted (IDW) et Spline classique, ont également été examinées, mais leurs interpolations ont généré des artefacts visuels marqués, notamment des effets de « bull's eye », révélant une incompatibilité entre les valeurs mesurées et les surfaces prédites et traduisant une faible stabilité du modèle dans les zones de transition.

En revanche, les méthodes Natural Neighbor et Spline With Barriers ont produit des surfaces interpolées plus cohérentes d'un point de vue géomorphologique et agronomique, sans artefacts spectaculaires et avec une continuité spatiale mieux adaptée à la distribution des points d'échantillonnage. Afin de départager ces deux méthodes, une validation croisée automatisée a été effectuée via ModelBuilder. Une validation croisée par rééchantillonnage aléatoire répété (Monte Carlo cross-validation) a été réalisée avec 100 itérations, en utilisant 90 % des données pour la calibration et 10 % pour la validation à chaque répétition (Arlot & Celisse, 2010). Cette procédure a été appliquée à l'ensemble des variables spatialement représentées.

La performance prédictive de chaque méthode a été évaluée à l'aide de deux indicateurs statistiques complémentaires à savoir : (i) l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui quantifie la dispersion entre valeurs observées et valeurs prédites (Eq. 3-12), et (ii) le biais (Bias), qui indique la tendance du modèle à surestimer ou sous-estimer la variable d'intérêt (Eq. 3-13). Le biais permet d'identifier une erreur systématique moyenne, tandis que le RMSE reflète l'erreur totale de prédiction, résultant à la fois de la variabilité aléatoire des résidus et d'un éventuel décalage systématique. Ces deux métriques ont été calculées selon les équations ci-dessous, conformément à Smith & Smith, (2007) et Harwell, (2018)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)})^2} \quad (3-12)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)}) \quad (3-13)$$

Où n est le nombre total d'échantillons inclus dans la validation croisée, $P_{obs(i)}$ a valeur observée pour l'échantillon i et $P_{pred(i)}$ la valeur prédite correspondante.

Les résultats ont montré que la méthode Spline With Barriers présente systématiquement les valeurs médianes de RMSE les plus faibles ainsi qu'un biais proche de zéro, traduisant une bonne précision prédictive et l'absence de dérive systématique. De plus, cette méthode limite efficacement les artefacts d'interpolation dans les zones où la continuité spatiale est contrainte par des limites naturelles ou des ruptures pédologiques, ce qui constitue un avantage déterminant pour les sols à plinthite.

En conséquence, Spline With Barriers a été retenue comme méthode optimale d'interpolation pour l'ensemble des variables étudiées, tant pour les propriétés physico-chimiques des sols que pour les rendements en maïs grain. Les cartes spatiales générées ont ensuite été utilisées pour caractériser les gradients de fertilité, visualiser les effets des interventions mécaniques et biogéniques, et fournir un support à l'interprétation agronomique et statistique des résultats.

La méthode Spline With Barriers repose sur une interpolation par spline à courbure minimale, mais introduit une amélioration majeure en intégrant des barrières spatiales représentées par des polygones. Contrairement à la spline classique, qui tend à lisser excessivement la surface et à créer des artefacts dans les zones de forte discontinuité spatiale, la version « with Barriers » empêche l'interpolation à travers des limites définies (polygones de barrières), forçant la surface à se conformer aux contraintes spatiales du phénomène étudié (Johnston et al., 2001). Cette approche est particulièrement adaptée dans les contextes où la continuité spatiale est altérée par des transitions pédologiques abruptes, des discontinuités géomorphologiques ou des interventions anthropiques.

Techniquement, l'algorithme génère une surface lisse en minimisant l'énergie de courbure tout en respectant les frontières imposées, ce qui réduit considérablement les artefacts d'interpolation (effets de « bull's eye ») associés aux méthodes comme l>IDW ou la spline classique (Mitas & Mitasova, 1999). Les polygones de barrières utilisés dans cette étude correspondaient aux limites physiques des blocs, empêchant la propagation injustifiée de l'information d'un bloc à l'autre et améliorant ainsi la qualité géostatistique des surfaces interpolées.

Dans ce cadre méthodologique, la carte de rendement produite a été utilisée comme support d'analyse dans les chapitres 4 et 5, mais avec des objectifs scientifiques distincts mais complémentaires. Les aspects communs de l'interprétation sont présentés de manière synthétique, tandis que les éléments différenciant chaque approche sont développés spécifiquement dans les chapitres concernés. Dans le chapitre 4, la carte de rendement est mobilisée principalement dans une perspective descriptive et quantitative, appuyée sur des analyses statistiques simples (valeurs moyennes, amplitudes, distributions chiffrées) afin de caractériser l'organisation spatiale de la productivité du maïs à l'échelle du périmètre étudié. Cette approche permet d'identifier les zones de faibles et fortes performances, de révéler l'hétérogénéité intra-site et de révéler les gradients spatiaux associés et aux contrastes pédologiques. La carte y joue ainsi un rôle exploratoire, visant à décrire la structuration spatiale du rendement dans un contexte de sols plinthitiques fortement hétérogènes. Dans le chapitre 5, cette même surface interpolée est réinvestie dans une perspective fonctionnelle, en tant que variable de référence pour analyser les relations entre la productivité du maïs et les propriétés édaphiques, en particulier la profondeur effectivement exploitable par le système racinaire après sous-solage. Le recours à une carte de rendement unique garantit la cohérence spatiale entre les données agronomiques et les variables pédologiques, condition essentielle pour interpréter de manière fiable les liens entre fonctionnement du sol, organisation des horizons et performance des cultures (Sanchez et al., 2003).

3.2.7. Traitement des images Sentinel-2 et extraction du LAI

L'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI) constitue une variable biophysique fondamentale dans l'évaluation du fonctionnement des agroécosystèmes. Il exprime la surface foliaire par unité de surface de sol et représente l'un des indicateurs les plus sensibles de la vigueur, de l'état physiologique et du potentiel productif des cultures. Le LAI contrôle directement l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), la transpiration, la capacité photosynthétique et, par conséquent, l'accumulation de biomasse et la formation du rendement (Alton, 2016; Asner et al., 2003; Jiang, 2005). Dans le modèle APSIM, cette variable joue un rôle central puisqu'elle conditionne l'essentiel des flux d'énergie, d'eau et de carbone au sein du système sol-plante-atmosphère (Holzworth et al., 2018; Keating et al., 2003).

En l'absence de mesures directes du LAI sur le terrain, la télédétection a été retenue comme alternative méthodologique robuste, conformément aux approches modernes de suivi agroécologique (Amin et al., 2025; Chatterjee et al., 2025; Harmse et al., 2022; Liu et al., 2024b; Yang et al., 2023). Les données multispectrales Sentinel-2 constituent un choix particulièrement approprié en raison de leur résolution spatiale (10 m) et temporelle (5 jours), permettant un suivi continu et précis de la dynamique du couvert végétal tout au long du cycle cultural (Cohrs et al., 2020).

Les traitements ont été réalisés dans Google Earth Engine (GEE, <https://code.earthengine.google.com>, consulté le 22 février 2025) en utilisant les images Sentinel-2 Surface Reflectance (niveau 2A), corrigés atmosphériquement par l'algorithme Sen2Cor. La zone d'étude a été délimitée à partir d'un shapefile des blocs expérimentaux, garantissant une extraction géospatiale précise. Seules les scènes présentant une couverture nuageuse inférieure à 20 % ont été retenues pour assurer une qualité radiométrique suffisante (Gorroño et al., 2017). De plus, pour chaque bloc, les images ont été sélectionnées exclusivement entre la date de semis et la date de récolte, de manière à ne capturer que la dynamique foliaire réelle des cultures. Cette contrainte temporelle permet d'éviter l'intégration de valeurs hors cycle cultural (prélevée ou post-récolte), qui auraient pu biaiser l'estimation du LAI et sa comparaison avec les simulations APSIM.

L'indice Simple Ratio (SR), défini comme le ratio des réflectances proche infrarouge (B8) et rouge (B4), a été utilisé pour estimer le LAI. Ce choix repose sur sa forte sensibilité à la densité du couvert végétal, sa faible dépendance au bruit de fond du sol et sa robustesse pour des niveaux de végétation modérés (Cohrs et al., 2020; Jiang, 2005; Joseph. White et al., 1997). Plusieurs travaux confirment que le SR présente une dynamique plus étendue que le NDVI et une forte corrélation avec les mesures de LAI obtenues sur le terrain ($R^2 > 0,70$; $RMSE < 0,5$) (Blinn et al., 2019; Deng et al., 2006). Bien que des indices plus complexes tels que EVI2 ou MSAVI puissent, dans certains cas, limiter les effets de saturation spectrale dans les canopées très denses, leur avantage reste marginal pour des couverts de végétation modérée et dans des conditions atmosphériques variables. Dans ce cadre, le SR a été

considéré comme l'indice le plus approprié, combinant simplicité computationnelle, fiabilité et pertinence agronomique démontrée.

Afin de renforcer la précision des estimations de LAI, une classification supervisée a été appliquée préalablement à l'aide de l'algorithme Support Vector Machine (SVM) (Thanh Noi & Kappas, 2017). Le classificateur, entraîné à partir de 120 échantillons de référence (60 végétation et 60 non-végétation), a permis d'obtenir une précision globale de 94 % et un coefficient Kappa de 0,89, indiquant un accord presque parfait selon les seuils de Landis & Koch (1977) et cohérent avec les performances rapportées dans des applications récentes de classification d'images Sentinel-2 (Foody, 2020). Cette étape a permis d'isoler les surfaces végétalisées, de réduire les artefacts spectro-spatiaux et d'améliorer la stabilité des estimations du LAI.

L'indice Simple Ratio (SR) a été calculé pour chaque scène Sentinel-2 selon la relation suivante (Équation 3-14) :

$$SR = \frac{B8}{B4} \quad (3-14)$$

où B8 correspond à la réflectance du proche infrarouge (NIR) et B4 à celle du rouge (RED). Les valeurs du SR sont généralement faibles pour les sols nus ou faiblement végétalisés (SR varie entre 0 et 1) et augmentent proportionnellement à la densité du couvert végétal (Cohrs et al., 2020). Ce comportement spectral en fait un indicateur direct de la quantité de surface foliaire interceptant la lumière, propriété cruciale pour l'estimation du LAI dans les cultures de maïs.

L'estimation du LAI a ensuite été obtenue à partir d'une relation empirique adaptée au maïs (Équation 3-15), dérivée des travaux de Nguy-Robertson et al. (2012) :

$$LAI = 0,323 \times RS - 0.058 \quad (3-15)$$

Dans cette relation, le coefficient multiplicatif (0,323) et le biais (-0,058) sont des paramètres spécifiquement calibrés pour la culture du maïs dans des environnements tropicaux et subtropicaux. Bien qu'aucune calibration in situ n'ait été réalisée sur le site d'étude, la pertinence de cette relation a été vérifiée indirectement en comparant les valeurs issues du SR avec celles simulées par APSIM aux mêmes dates d'observation, confirmant à la fois la cohérence des tendances et l'absence de biais systématique.

Pour chaque image Sentinel-2 retenue, le LAI a été extrait au niveau des blocs expérimentaux définis auparavant. La fonction `reduceRegion` de Google Earth Engine a été utilisée afin de calculer, pour chaque date, la valeur moyenne du LAI au sein de chaque bloc. Cette extraction systématique a permis de constituer une série temporelle complète du LAI pour chaque bloc durant l'ensemble du cycle cultural. L'ensemble des valeurs de LAI extraites (toutes dates × tous blocs) a finalement été exporté sous format CSV afin de permettre une analyse quantitative complémentaire et une intégration dans les modules statistiques et de modélisation de l'étude.

3.2.8. Simulations

3.2.8.1. Modèle APSIM

Dans un contexte où l'agriculture doit concilier l'optimisation de la production, la variabilité climatique croissante et la gestion durable des ressources naturelles, les modèles de simulation des cultures jouent aujourd'hui un rôle essentiel. Ils constituent des outils robustes permettant de comprendre les interactions complexes entre le sol, la plante, le climat et les pratiques culturales, tout en offrant la possibilité de tester virtuellement différents scénarios agronomiques à faible coût et sans risque expérimental. Parmi ces outils, le modèle APSIM (Agricultural Production Systems SIMulator) est largement reconnu pour sa capacité à représenter de manière réaliste les processus biophysiques intervenant dans les systèmes de production agricoles (Chen et al., 2016; Chimonyo et al., 2016; Ebrahimi-Mollabashi et al., 2019; Wu et al., 2021; Yang et al., 2020).

Dans cette étude, le modèle APSIM NextGen (version 2024.10.7607.0) a été utilisé pour simuler la croissance et le rendement du maïs sur plinthosols au cours de trois saisons culturales. APSIM est un modèle modulaire conçu pour reproduire, à un pas de temps quotidien, les interactions entre les cultures, les sols, la météorologie et les pratiques de gestion (Holzworth et al., 2018). Il intègre une large gamme de modules représentant les principales espèces cultivées, les pâturages, les arbres et les processus hydriques, biogéochimiques et physiques des sols (Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; McCown et al., 1996) (Figure 3-5).

Le module APSIM-Maize a été sélectionné pour simuler la dynamique de développement du maïs grain cultivé sur un sol à plinthite. Dans APSIM, la croissance et le rendement résultent de l'interaction entre les variables météorologiques quotidiennes, les caractéristiques variétales, les propriétés du sol et les pratiques culturales mises en œuvre (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; Probert et al., 1998). Les paramètres utilisés pour calibrer la croissance du maïs dans le contexte spécifique du site d'étude ont été intégrés selon une approche progressive, en veillant à la cohérence entre les observations de terrain et les processus internes du modèle.

La progression phénologique du cultivar est exprimée en temps thermique, basé sur l'accumulation des degrés-jours depuis le semis jusqu'à la maturité physiologique, conformément aux principes décrits par (Wilson et al., 1995). Cette approche permet de représenter avec précision la réponse thermodépendante du maïs, indispensable à l'ajustement des phases de croissance et à la simulation du rendement final.

Dans APSIM, la croissance et le rendement du maïs résultent d'un ensemble de processus biophysiques simulés quotidiennement. Le modèle calcule, à chaque pas de temps, la quantité d'énergie interceptée par le couvert végétal via l'indice foliaire (LAI), puis convertit cette énergie en biomasse à l'aide de l'efficacité d'utilisation du rayonnement (Radiation Use Efficiency, RUE). La biomasse produite est ensuite allouée aux différents organes de la plante (feuilles, tiges, racines et grains) en fonction du stade phénologique, lequel progresse selon l'accumulation de degrés-

jours (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; Probert et al., 1998).

La croissance est simultanément contrainte par trois facteurs environnementaux majeurs : (i) la disponibilité en eau, régulée par l'extraction racinaire et la dynamique de l'eau dans le sol ; (ii) la disponibilité en azote minéral, contrôlant la synthèse de biomasse et l'allocation vers les grains ; (iii) les stress thermiques, influençant la photosynthèse, la respiration et la vitesse de développement (Keating et al., 2003; McCown et al., 1996).

Lorsque l'un de ces facteurs est limitant, APSIM applique des coefficients de stress qui réduisent proportionnellement la biomasse accumulée ou la fraction allouée au rendement. Le rendement final correspond ainsi à la biomasse totale transloquée vers les grains durant la phase de remplissage, modulée par les conditions hydriques et nutritionnelles rencontrées au cours du cycle. Cette représentation mécaniste permet au modèle de prédire finement les réponses de la culture aux contraintes édapho-climatiques et aux pratiques de gestion (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; Probert et al., 1998).

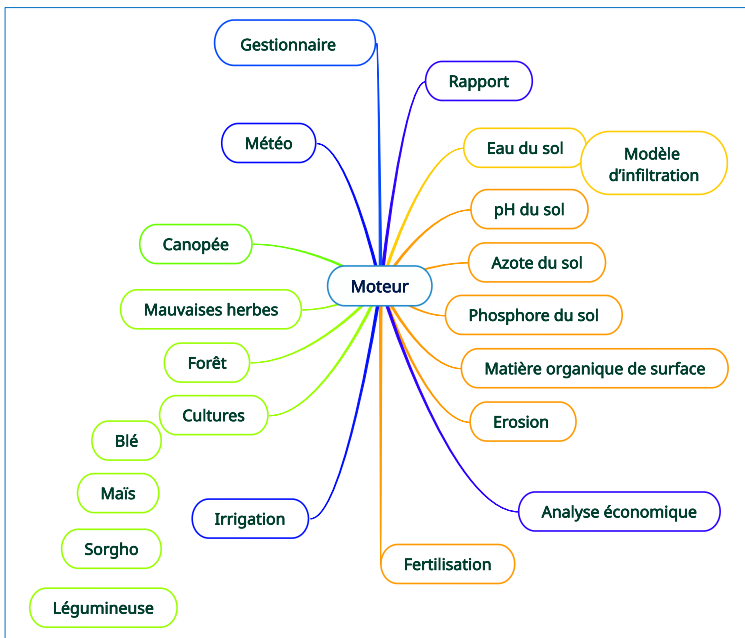


Figure 3-5 : Modules et moteur d'APSIM (Keating et al., 2003; McCown et al., 1996).

3.2.8.1. Données d'entrées

Les simulations ont mobilisé un ensemble cohérent de données climatiques, pédologiques, génétiques et agronomiques propres au site d'étude FarmCo.

Les variables météorologiques journalières, température minimale et maximale, rayonnement solaire, humidité relative, vitesse du vent et précipitations, extraites de

la base NASA POWER pour la période 2016–2024, en raison de l'absence de station météorologique locale opérationnelle dans la zone d'étude. L'évapotranspiration de référence (ET_0), calculée selon la méthode FAO Penman–Monteith, a également été intégrée dans APSIM afin de représenter de manière robuste la demande évaporative dans les environnements tropicaux.

Les propriétés hydrauliques et physico-chimiques des horizons du sol ont été renseignées à partir des résultats d'analyses de laboratoire réalisées pour chaque bloc. Les variables intégrées dans APSIM comprenaient : la granulométrie, la teneur en eau à saturation (SAT), la limite supérieure après drainage (DUL), la limite inférieure de l'eau disponible (LL), la capacité de rétention en eau utilisable (PAWC), la densité apparente (BD), la conductivité hydraulique à saturation (Ksat), ainsi que les teneurs en azote total et en carbone organique total.

Pour le bloc témoin (B0) de la saison culturale 2016–2017, représentant l'état initial du site avant les travaux de sous-solage et d'amendement aux matériaux de termitières, les paramètres hydrauliques manquants ont été estimés à l'aide des fonctions de pédotransfert de Saxton & Rawls (2006), couramment utilisées pour prédire les propriétés hydriques à partir de la texture et de la matière organique.

Concernant les données liées à la culture, les paramètres de développement du cultivar (phases juvénile, floraison, remplissage des grains), exprimés en degrés-jours, ont été ajustés à partir des observations de terrain et des données variétales disponibles pour SC719. Les paramètres non mesurables directement ont été maintenus dans les plages recommandées par la documentation APSIM afin d'assurer la cohérence interne du modèle.

Enfin, les pratiques culturales du site entre autre les travaux de restauration des sols, densité de semis, fertilisation, dates de semis et de récolte ont été intégrées telles que conduites sur le terrain, garantissant la cohérence agronomique du scénario de simulation.

3.2.8.2. Validation croisée

Une procédure de validation croisée a été appliquée en regroupant l'ensemble des données issues des trois saisons culturales (2016–2017, 2022–2023 et 2023–2024), soit $n = 21$ observations (blocs). Après un tirage aléatoire, environ deux tiers des observations, correspondant à 12 blocs des saisons 2022–2023 et 2023–2024 ont été utilisés pour la calibration du modèle, tandis que le tiers restant, incluant 8 blocs de ces mêmes saisons et 1 bloc de la saison 2016–2017 a servi à la validation.

Cette stratégie a permis de constituer deux sous-ensembles indépendants tout en préservant la diversité des conditions climatiques, édaphiques et de gestion observées sur le site. Ainsi, calibration et validation reposent sur des jeux de données représentatifs de la variabilité réelle du système, limitant les risques de surapprentissage et renforçant la capacité du modèle à généraliser (Bro et al., 2008; Lei, 2020; Schaffer, 1993; Seraj et al., 2022).

Pour le LAI, la validation croisée a suivi exactement la même logique que pour le rendement en grains, avec une répartition identique des blocs et des saisons entre

calibration et validation. Toutefois, le nombre total d'observations dépendait du nombre d'images Sentinel-2 exploitables, c'est-à-dire dépourvues de nuages et fournissant des valeurs valides du Simple Ratio (SR). Chaque estimation du LAI correspondait à une date d'acquisition unique, impliquant un effectif variable selon la fréquence des images utilisables au cours de chaque saison. Cette approche garantit une cohérence méthodologique avec la calibration du rendement tout en tenant compte de l'hétérogénéité temporelle propre aux données satellitaires.

Le modèle a ensuite été évalué à l'aide d'indicateurs statistiques standards en modélisation des systèmes de culture permettant d'apprécier sa précision, sa stabilité et sa capacité prédictive (Smith & Smith, 2007). Les critères retenus incluent le coefficient de détermination (R^2), erreur quadratique moyenne (RMSE), l'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE).

3.2.9. Méthodes statistiques générales

Les analyses statistiques ont été organisées selon une démarche progressive visant à explorer, comparer et modéliser la variabilité des propriétés du sol et leur influence sur le rendement du maïs grain.

3.2.9.1. Analyse descriptive des données

Des analyses descriptives ont été réalisées afin de caractériser la distribution de certaines variables étudiées, notamment le rendement, et, dans certains cas, pour évaluer la qualité globale des données avant la mise en œuvre des analyses inférentielles et multivariées.

Les distributions ont été explorées à l'aide de boxplots, permettant de visualiser la médiane, les quartiles, la dispersion, ainsi que la présence éventuelle de valeurs extrêmes. Cette approche a facilité l'identification des asymétries, des contrastes entre blocs et des niveaux de variabilité intra-site.

Ces visualisations ont parfois été complétées par des violin plots superposés aux observations unitaires pour visualiser simultanément la densité de distribution, la dispersion et la présence éventuelle de valeurs extrêmes (Hintze & Nelson, 1998), permettant ainsi de vérifier la qualité et la cohérence des données, de détecter d'éventuelles anomalies, et appréhender les principaux gradients de variabilité interne au sein du site avant d'engager des analyses inférentielles et multivariées.

3.2.9.2. Analyses comparatives

La variabilité des propriétés du sol entre profondeur (0-10 cm et 0-40 cm) a été évaluée à l'aide de tests inférentiels. La normalité des résidus a été examinée via le test de Shapiro–Wilk (Shapiro & Wilk, 1965). Lorsque l'hypothèse de normalité était respectée, une ANOVA à un facteur était appliquée ; dans le cas contraire, un test non paramétrique de Wilcoxon–Mann–Whitney était utilisé comme alternative robuste.

La taille de l'effet (η^2) a été calculée afin de quantifier l'importance pratique des différences observées, selon les seuils proposés par Tomczak & Tomczak, (2014). Ces analyses ont permis d'identifier les propriétés les plus sensibles aux contraintes édaphiques et aux pratiques de gestion, et de cibler les variables pertinentes pour les étapes de modélisation.

3.2.9.3. Analyse en composantes principales (ACP) et analyse multivariée

Au-delà de l'analyse univariée, une approche multivariée a été appliquée afin de synthétiser l'information contenue dans les jeux de données du sol et de mieux comprendre les structures de dépendance entre variables. Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir des propriétés du sol standardisées, en utilisant la matrice de corrélation et permis de réduire la dimensionnalité des données, d'identifier les principaux gradients édaphiques structurants, de distinguer les groupes de variables associées à la fertilité chimique, aux caractéristiques physiques et aux éléments traces, et de fournir un cadre interprétatif global pour la variabilité des sols sur le site (Abdi & Williams, 2010).

En complément, une classification hiérarchique a été appliquée à partir d'une matrice de distances fondée sur la métrique $1 - |r|$, où r représente le coefficient de corrélation de Pearson (Reimann et al., 2008). Cette approche permet de regrouper les variables selon la similarité de leur comportement, indépendamment du signe de leur corrélation, et de réduire la redondance dans les modèles ultérieurs. La méthode de liaison moyenne a été retenue pour sa robustesse et sa stabilité dans le traitement de données environnementales multivariées.

3.2.9.4. Analyse des relations fonctionnelles entre les propriétés du sol et le rendement

Une analyse des relations sol–rendement a été conduite à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman, choisi pour sa robustesse face aux distributions non normales et aux relations potentiellement non linéaires, caractéristiques fréquentes des sols tropicaux hétérogènes (Reimann et al., 2008; Sanchez et al., 2003). Cette approche a permis d'identifier les propriétés du sol présentant une association significative avec le rendement en maïs, qu'il s'agisse de relations positives (effets favorables) ou négatives (facteurs limitants). L'objectif principal de cette étape était d'explorer la structure des dépendances fonctionnelles entre les variables édaphiques et de détecter les paramètres jouant un rôle prépondérant dans la productivité.

La matrice de corrélation obtenue a servi de filtre préalable pour sélectionner un ensemble réduit de variables explicatives pertinentes, en éliminant les paramètres redondants ou faiblement informatifs (Dormann et al., 2013). Cette sélection préliminaire contribue à limiter la multi-colinéarité et réduit le risque de sur-paramétrisation lors de la construction des modèles de régression. Elle permet également de focaliser l'analyse sur les facteurs pédologiques dont l'influence sur la

croissance et le rendement du maïs est la plus probable du point de vue agronomique et biophysique.

3.2.9.5. Régression linéaire multiple avec sélection pas à pas

Sur la base des variables retenues, des modèles de régression linéaire multiple ont été construits afin d'identifier les facteurs édaphiques expliquant la variabilité spatiale du rendement. Une procédure de sélection pas à pas (forward et backward) guidée par le critère d'information d'Akaike (AIC) a été utilisée pour retenir le modèle le plus optimal, c'est-à-dire celui offrant le meilleur compromis entre complexité et qualité d'ajustement (Bedrick & Tsai, 1994; Venables & Ripley, 2002).

La colinéarité entre prédicteurs a été évaluée à l'aide du Variance Inflation Factor (VIF), seules les variables présentant un VIF < 3 ayant été conservées (Akinwande et al., 2015; O'Brien et al., 2019).

Les performances des modèles finaux ont été évaluées en dehors de la significativité des coefficients ($p < 0,05$) à l'aide :

- Coefficient de détermination (R^2), mesurant la proportion de variance expliquée par le modèle (Eq 3-16). Une valeur proche de 1 indique une forte corrélation entre les valeurs prédites et observées, traduisant une bonne performance du modèle.

$$R^2 = \frac{\sum(Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{pred} - \bar{Y}_{pred})}{\sqrt{\sum(Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2 \sum(Y_{pred} - \bar{Y}_{pred})^2}} \quad (3-16)$$

- RMSE (Root Mean Square Error), quantifiant l'écart type moyen entre les rendements simulés et observés (Eq. 3-17). Plus la RMSE est faible, plus le modèle est précis. Des valeurs faibles ($< 1 \text{ t ha}^{-1}$) traduisent une bonne précision du modèle.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)})^2} \quad (3-17)$$

Où : n est le nombre total d'échantillons utilisés dans la procédure de validation, Pobs (i) est la valeur de la ième observation du jeu de données de validation et Ppred (i) est la valeur prédite pour la ième observation.

Les équations prédictives du rendement ont été exprimées en coefficients non standardisés, permettant une interprétation directe en unités physiques, tandis que des coefficients bêta standardisés et leurs intervalles de confiance à 95 % ont été utilisés pour comparer l'importance relative des prédicteurs (Nieminen, 2022). Les rendements prédits ont été ensuite confrontés aux rendements observés, issus à la fois des mesures de terrain et des valeurs extraites des cartes interpolées, afin de vérifier la cohérence globale de la modélisation.

Toutefois, la construction des modèles et l'exploitation des données diffèrent selon les objectifs scientifiques propres aux chapitres 4 et 5.

Pour le chapitre 4, les équations de régression ont été établies à partir des propriétés du sol mesurées dans l'horizon de surface (0–10 cm) lors de la deuxième campagne d'échantillonnage (2023). Les rendements en maïs grain utilisés comme variable réponse correspondaient à la fois aux valeurs mesurées directement sur le terrain et aux valeurs extraites des pixels de la carte de rendement interpolée. Cette approche a permis d'identifier les facteurs expliquant la variabilité spatiale fine du rendement à l'échelle du site, en conservant l'ensemble des observations disponibles (points, blocs et répétitions), afin de capturer l'hétérogénéité intra-parcellaire.

En revanche, dans le chapitre 5, les prédicteurs des modèles ont été construits à partir des propriétés du sol issues de la première campagne d'échantillonnage (2022), analysées à deux profondeurs contrastées : 0–10 cm (horizon de surface) et 0–40 cm (zone racinaire fonctionnellement exploitable après sous-solage). Pour le rendement utilisé dans ce modèle, la superposition des points d'échantillonnage du sol aux surfaces interpolées des cartes de rendement a permis d'extraire, pour chaque point géoréférencé, la valeur de rendement estimée au pixel correspondant. Afin de garantir l'indépendance statistique des observations et d'éviter toute pseudo-réplication, le rendement du maïs a été considéré comme une valeur unique par bloc. Pour chaque bloc, la moyenne des rendements obtenus au cours des deux saisons culturales a été calculée et utilisée comme variable réponse. Cette stratégie permet de réduire l'influence des fluctuations saisonnières liées aux conditions climatiques ou opérationnelles et de représenter un rendement intégrateur du potentiel productif structurel de chaque bloc, plutôt qu'un effet conjoncturel. Cette valeur moyenne a ensuite servi de variable dépendante pour les analyses de corrélation et la modélisation par régression linéaire multiple.

Ainsi, alors que le chapitre 4 repose sur l'exploitation de l'ensemble des valeurs individuelles (points, pixels et répétitions) pour analyser la variabilité spatiale détaillée du rendement, le chapitre 5 adopte une approche synthétique à l'échelle des blocs, visant à relier le rendement moyen à la profondeur exploitable et aux propriétés édaphiques structurales du sol.

L'ensemble des analyses statistiques et la production des figures ont été réalisés à l'aide du logiciel R (version 4.5.1) (R Core Team, 2025). Cet environnement a été utilisé pour le traitement et l'organisation des données, les analyses descriptives et inférentielles, les analyses multivariées ainsi que les modèles de régression. Il a également permis la visualisation graphique des résultats, garantissant la reproductibilité, la traçabilité et la cohérence des traitements statistiques appliqués tout au long de l'étude.

Afin de faciliter la compréhension de l'approche méthodologique adoptée dans cette étude, un schéma conceptuel intégratif est présenté à la Figure 3-6, synthétisant l'ensemble des étapes mobilisées. Il illustre les différentes sources de données exploitées, à savoir : les échantillonnages de sols, les mesures de rendement en maïs, les variables météorologiques ainsi que l'imagerie Sentinel-2, de même que les traitements qui leur sont associés, incluant les analyses physico-chimiques et hydrodynamiques du sol, l'extraction du LAI et la préparation des paramètres d'entrée

du modèle de culture APSIM. Le flux méthodologique suit une progression structurée articulée autour de : (i) l'analyse en laboratoire des propriétés du sol, (ii) l'interpolation spatiale des propriétés et du rendement sous ArcGIS, (iii) la modélisation APSIM NextGen appuyée par une validation croisée, et (iv) les analyses statistiques conduites sous R (analyse exploratoire, corrélations et régressions multiples). Ce schéma fournit ainsi une vision d'ensemble cohérente de l'articulation entre données de terrain, outils géospatiaux, simulation biophysique et analyses statistiques, permettant d'évaluer de manière intégrée les effets du sous-solage et de l'amendement en matériaux de termitières sur le fonctionnement des plinthosols et la productivité du maïs grain.

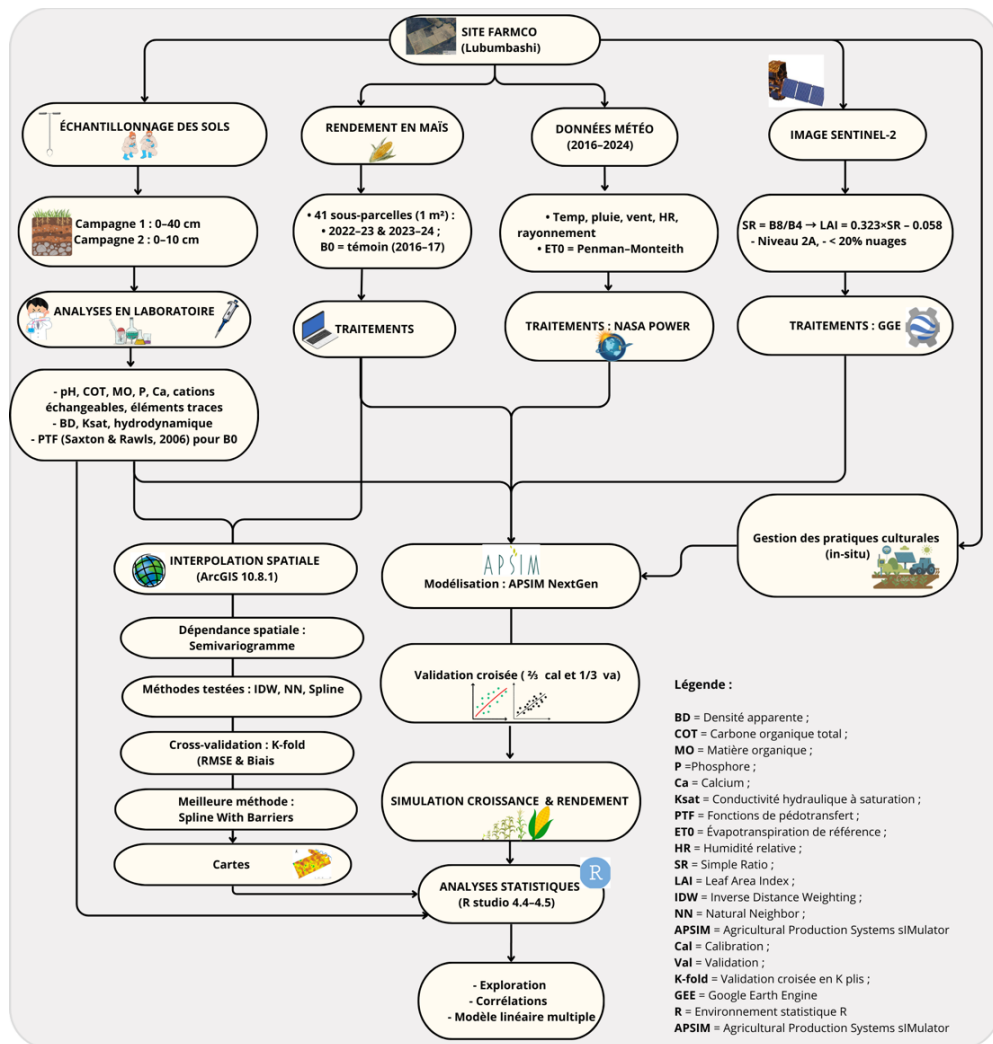


Figure 3-6 : Schéma conceptuel général de la méthodologie de la thèse.

Chapitre 4

Soil fertility and maize response to subsoil deep tillage and termite mound amendments in strongly weathered plinthic soils*

*Ce chapitre est adapté à

Mukalay, J. B., Meersmans, J., Wellens, J., Sikuzani, Y. U., Mukonzo, E. K. L., & Colinet, G. (2026). Soil fertility and maize response to subsoil deep tillage and termite mound amendments in strongly weathered plinthic soils. *Geoderma Regional*, 44, e01066. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01066>

4.1. Avant-propos

Dans les chapitres précédents, nous avons montré que les plinthosols de la région de Lubumbashi constituent des systèmes pédologiques fortement contraints, dominés par la présence irrégulière de la plinthite, qui limite simultanément la profondeur exploitable, la disponibilité hydrique et la fertilité chimique des sols. La revue de la littérature révèle que ces contraintes résultent d'un héritage pédogénétique complexe, dans lequel les processus de ferrallitisation, d'accumulation d'oxydes métalliques et d'acidification jouent un rôle structurant à long terme.

Dans ce contexte, les interventions combinant sous-solage mécanique profond et amendement par des matériaux de termitières géantes ont été mises en œuvre comme une stratégie visant à modifier, au moins partiellement, le fonctionnement de ces sols fortement altérés. Toutefois, avant d'examiner leurs effets sur la productivité agricole ou sur la dynamique racinaire en profondeur, il est nécessaire de caractériser précisément la réponse des horizons superficiels, qui constituent la première interface fonctionnelle entre le sol et la plante.

Le présent chapitre vise ainsi à analyser comment ces interventions se traduisent, à l'échelle du site, par des modifications spatiales et verticales des propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des horizons de surface. L'accent est mis sur la variabilité spatiale du pH, du carbone organique, du phosphore, des cations basiques et des éléments métalliques, ainsi que sur les propriétés physiques et hydrauliques mesurées dans les profils pédologiques. En parallèle, la distribution spatiale des rendements du maïs est examinée afin d'identifier les relations fonctionnelles entre les propriétés du sol en surface (0-10 cm) et la réponse agronomique.

Ce chapitre constitue ainsi une étape clé du raisonnement, en fournissant un diagnostic spatial et fonctionnel des horizons superficiels des plinthosols restaurés, préalable indispensable à l'analyse de la profondeur fonctionnellement exploitable développée dans le chapitre suivant.

4.2. Abstract

Plinthite, an iron-rich and humus-poor clay horizon that hardens irreversibly, poses major constraints to agriculture in the Lubumbashi region. Termite mound materials, which are enriched in basic cations, combined with subsoiling to fragment and remove plinthite, may improve soil fertility. This study evaluated the combined effects of subsoiling and termite mound amendments on Plinthosols under maize across ten blocks covering 660 ha. Surface soils (0–10 cm) were sampled, soil profiles were described, and maize yields were measured over two growing seasons. Spatial patterns of soil properties and yield were mapped using the Spline With Barriers method, and stepwise regression was applied to identify key variables controlling yield.

Soil thickness ranged from <9 cm in areas requiring secondary subsoiling to >73 cm in blocks B2, B5, B6, and B9. Soil pH (KCl) ranged from 4.1 to 7.8, while pH in water ranged from 4.9 to 8.7, with stronger acidity observed in blocks B8–B10. Total organic carbon (TOC) was generally low (0.4–2.5%). Nutrient contents were highly

heterogeneous: P ranged from 5.1 to 145.5 mg kg⁻¹; Ca from 1,360 to 18,268 mg kg⁻¹; K from 130.2 to 942.0 mg kg⁻¹; and Mg from 238.8 to 2,987 mg kg⁻¹. Available Al (44–293 mg kg⁻¹), Fe (28.1–351.7 mg kg⁻¹), Mn (4.4–669 mg kg⁻¹) and Cu (1.9–25.8 mg kg⁻¹) also showed strong spatial variability. Bulk density decreased with depth, and although Ksat remained low, water retention was improved in the surface layer. Maize grain yield ranged from 2.3 to 11.1 t ha⁻¹, with seasonal means of 7.1–8.2 t ha⁻¹. Regression models identified soil pH, Ca, and TOC as the main positive determinants of maize yield, whereas high concentrations of Fe, Cu, and Mn were associated with reduced yields.

Keywords: plinthite, termite mounds, subsoiling, saturated hydraulic conductivity (Ksat), Spline With Barriers, Lubumbashi.

4.3. Introduction

In tropical Africa, soils are characterized by low intrinsic fertility, a condition largely driven by climatic and pedological constraints (Sanchez, 2018). However, the economies of most tropical countries rely mainly on agriculture, a sector that must expand substantially to meet the pressures of rapid population growth and evolving market demands (Adeyanju et al., 2023; Beyene, 2023; Muhirwa et al., 2023; Santos et al., 2023). Recent statistics further indicate that nearly half of the African population faces moderate to severe food insecurity (FAO, 2021; Gebre & Rahut, 2021).

In the Democratic Republic of the Congo, and particularly in the Lubumbashi region, agricultural yields remain far below the genetic potential of crops, thereby contributing to food insecurity among a population that, according to Useni et al. (2024), exceeded 2.5 million inhabitants in 2020. Studies in this region show that soil degradation is a major constraint on agricultural productivity, due in large part to the prevalence of highly weathered soils with limited nutrient reserves (Banza et al., 2019; Kasongo, 2008; Kasongo et al., 2019; Useni et al., 2014), a situation also confirmed by the perception of local populations (N'tambwe et al., 2023). These soils typically display low chemical fertility (Camacho et al., 2021; de Melo et al., 2020; Koppe et al., 2021; Koulibaly et al., 2015; Leão et al., 2020; Maroneze et al., 2014; Ramaroson et al., 2018; Saïdou et al., 2003), alongside the frequent presence of plinthite at or near the surface, as well as giant termite mounds (Adhikary et al., 2016; Alexandre, 2002; De Dapper & Malaisse, 1979; Malaisse, 2011; Mujinya et al., 2010).

The occurrence of plinthite on or close to the surface creates shallow or uncultivable soils with limited rooting volume, rendering these environments marginal or unsuitable for sustained agricultural production (Brogowski & Kwasowski, 2012; Coelho & Vidal-Torrado, 2000; Cooper et al., 2020; Dutta et al., 2003; Fauzi & Stoops, 2004; Fritsch et al., 2007; Jien et al., 2010; Kumar et al., 2019; le Roux et al., 2005; Legros, 2013; Loke et al., 2013; O'Brien et al., 2019; Ogunwole et al., 2001; Oluwatosin et al., 2020; Pereira-De-Oliveira et al., 2019). Plinthite is a clay material, rich in iron and poor in humus, which hardens irreversibly into ironstone through repeated wetting–drying cycles under solar radiation (WRB-IUSS, 2015). These soils

exhibit several inherent limitations, including the development of compact layers, surface crusting, and restricted water percolation, all of which hinder their use for agricultural production (Bilong, 1992; De Azevedo & Bueno, 2017; Martins et al., 2018b; Silva Martins et al., 2012; Wildemeersch et al., 2015; Yaro et al., 2008).

Population growth and the resulting increase in food demand have encouraged the cultivation of plinthite-affected soils (Oluwatosin et al., 2020). To mitigate the limitations, management strategies must be considered (Asiamah & Dwomo, 2010). Such strategies should aim to enhance soil water retention, reduce erosion, stimulate microbial activity, and improve thermal and gaseous exchanges, thereby supporting adequate air, water, and nutrient availability for crops.

In the Lubumbashi plain, however, the shallow presence of plinthite combined with the abundance of giant termite mounds, represents a major constraint to expanding cultivated areas. There are approximately 7 giant termite mounds per hectare, with an average spacing of 44.6 m and an average volume of 256 m³ (Erens, Boudin, et al., 2015; Mujinya et al., 2014).

Their abundance and the high chemical quality of their materials (Baumgartner et al., 2021; de Lima et al., 2018; Enagbonma & Babalola, 2019; Eze et al., 2019; Jouquet et al., 2015; Kaschuk et al., 2006; Mujinya et al., 2013; Padonou et al., 2020; Rajeev & Sanjeev, 2011; Seymour et al., 2014) offer a valuable yet underutilized resource, particularly when these materials are spread onto soils previously loosened by subsoiling to break up and remove plinthite. This approach simultaneously increases soil thickness and enhances chemical fertility. Given this context, it is essential to assess how mechanical subsoiling and termite mound amendments may improve the properties of plinthite-affected soils.

This study is based on the hypothesis that: (1) incorporating termite mound materials increases soil depth and enhances soil fertility, thereby improving maize production, and (2) mechanical subsoiling improves soil water dynamics despite the presence of plinthite. The overall objective of this study is to evaluate the combined impact of subsoiling and termite mound materials on the fertility of Plinthosols cultivated with maize in the Lubumbashi region. More specifically, the study aims to: (i) characterize and map soil physicochemical properties to assess their spatial variability across the site; (ii) evaluate the influence of mechanical subsoiling on soil water dynamics; (iii) assess the combined effects of subsoiling and termite mound amendments on maize grain yield; and (iv) use regression models to identify the key soil variables explaining yield variability.

4.4. Methodology

4.4.1. Site description

This study was conducted at FarmCo, located on the outskirts of Lubumbashi, approximately 60 km east of the city along the Kasenga road in the Kifumanshi River valley. The study area is situated between 27.756781° and 27.790340° E and 11.411949° and 11.441744° S, at an elevation ranging from 1,150 to 1,200 m a.s.l.

(Figure 4-1). It covers 660 hectares of land dominated by Plinthosols according to the WRB classification (WRB-IUSS, 2015).

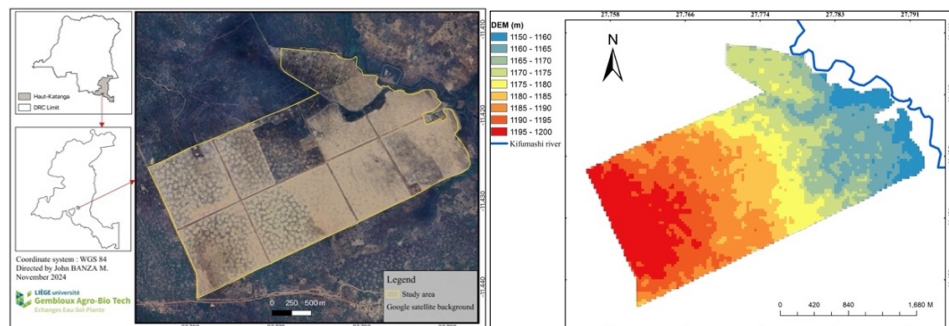


Figure 4-1: Left: Location of the study site (FarmCo) in Lubumbashi area, Haut-Katanga Province, Democratic Republic of Congo. Right: STRM-DEM (30 m resolution) showing the topographic variability across the study area.

At this site, systematic excavation of the lateritic surface layers, combined with mechanical subsoiling to fragment and remove plinthite, was carried out across the entire study area during the 2021–2022 cropping season, prior to soil sampling and yield measurements. Before subsoiling, the plinthic crust occurred at depths of less than 10 cm over nearly one quarter of the site, severely limiting the effective rooting depth. The subsoiling operation was performed using a three-tine subsoiler at a minimum working depth of 40 cm to break compact plinthic layers and increase the effective rooting depth. In parallel, materials from inactive *Macrotermes falciger* termite mounds—abundant throughout the area—were completely removed and spread over the loosened plots to expand arable land, facilitate machinery operations, and serve as a soil amendment (Figure 4-2). FarmCo is one of the largest farms in the Lubumbashi region and is renowned for its large-scale production of maize grain for human consumption.

The outskirts of Lubumbashi have a C_{w6} climate according to the Köppen classification, characterized by a dry season (May–September), a rainy season (November–March), and two transition months (April and October) (Assani, 1999). The mean annual rainfall is 1,270 mm and the mean annual temperature is 20.1°C, with minimum temperatures around 8°C during the coldest month and maximum temperatures reaching 32°C during the hottest month (Malaisse, 2011).



Figure 4-2 : Drone image showing levelled termite mounds (white patches), B: collection and transport of plinthite fragments after subsoiling, and C: plinthite stored outside the cultivated plots (photo credit: John Banza M.).

4.4.2. Sampling and laboratory analysis

Transect sampling was carried out across the entire study area, covering 660 hectares and subdivided into 10 blocks (B1-10). Disturbed soil samples were collected using a soil auger in the 0-10 cm layer, at 200 m intervals following a zigzag sampling design during the 2022–2023 growing season, after the implementation of subsoiling and the incorporation of termite mound materials. In areas where the soil was shallow (<40 cm), the effective soil depth was measured with the auger down to the plinthite layer. A total of 207 disturbed samples were collected (Figure 4-3), air-dried for five days, sieved to 2 mm, and prepared according to ISO 11074 standards for chemical analysis.

Soil analyses were performed at the soil chemistry laboratory of Gembloux Agro-Bio Tech, (Belgium). The analyses included: measurement of pH in water and in 1N KCl; determination of total organic carbon (TOC) using the Walkley–Black wet oxidation method (Walkley & Black, 1934); and quantification of available elements after extraction with ammonium acetate + EDTA (ethylene diamine tetra acetic acid) at pH 4.65. The resulting extracts were analysed using a colourimeter for phosphorus concentration and ICP-OES (inductively coupled plasma–optical emission spectrometry) for calcium, magnesium, and potassium, and trace elements (copper, iron, aluminium, and manganese).

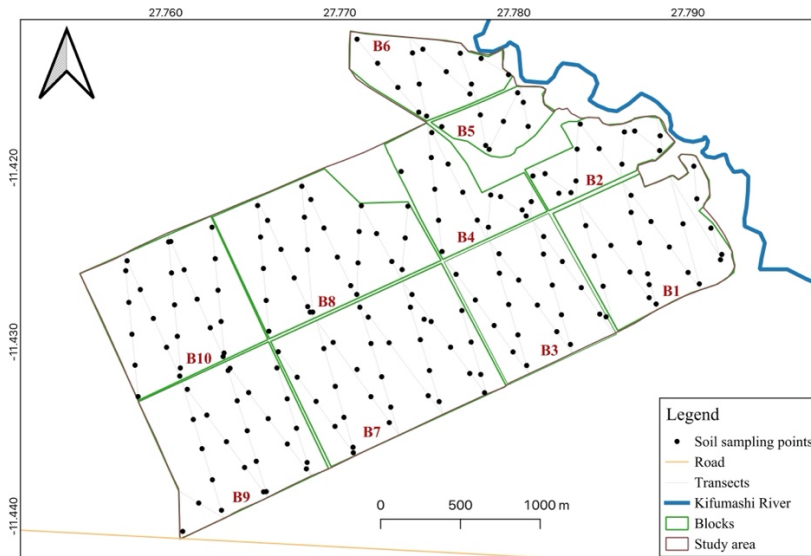


Figure 4-3 : Soil sampling plan for the study area.

In addition, a detailed description of representative ± 1 m-deep soil profiles was carried out in accordance with the soil description guidelines of the World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2022). Soil samples were taken from the diagnostic horizons for physicochemical analysis. Undisturbed samples were collected from these horizons using Kopecky cylinders. These samples were then sent to the laboratory for bulk density measurement and soil water hydraulic analysis at the Soil Physics and Mechanics Technical Platform (PhyMeSol), Agro-Bio Tech, Belgium. Saturated hydraulic conductivity (Ksat) was measured using a constant head permeameter, and soil water retention was determined using the Richard apparatus.

4.4.3. Cross-validation

Geostatistical analyses were performed to present the results in spatial form using maps. To this end, several interpolation methods available in ArcGIS 10.8.1 were evaluated (Johnston et al., 2001). After processing, the semivariogram generated for kriging did not show clear or stable spatial dependence in the dataset (Figure B-1 to B-3). The Inverse Distance Weighted and Spline models showed poor agreement between observed and predicted values, sometimes producing a pronounced “bull’s-eye” artefact. Only the Natural Neighbor and Spline With Barriers models produced spatially realistic and coherent patterns. To differentiate between these two methods, cross-validation was performed using ModelBuilder. This validation included 100 Monte Carlo repetitions for each model, using 90% of the randomly selected data for calibration and 10% for validation. This procedure was applied to each spatially represented variable. The performance of each interpolation method was evaluated using the root mean square error (RMSE, Eq. 4-1) (Smith & Smith, 2007) and the bias (Eq. 4-2) (Harwell, 2018). RMSE indicates the dispersion or variability of prediction

errors, while bias assesses systematic over- or underestimation by the model. These measures were determined as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)})^2} \quad (4-1)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)}) \quad (4-2)$$

Where: RMSE is the root mean square error, n is the total number of validation samples; $P_{obs(i)}$ is the value of the i-th observation, and $P_{pred(i)}$ is the corresponding predicted value. Bias: the bias is better when it is close to zero.

After cross-validation, the Spline With Barriers model outperformed all other tested interpolators, exhibiting low median RMSE values and low, often zero, bias (Figure B-4). Consequently, this interpolation method was applied to the full dataset (100%) for all the mapped variables.

4.4.4. Determination of yield

The grain yield of maize was measured in 1 m² quadrats, with at least five replicates per block, following the formula of Tandzi and Mutengwa (2020) (Eq. 4-3). This method is considered one of the simplest and most rapid for on-farm yield estimation (Sapkota et al., 2016). A total of 41 yield plots were established (Figure 4-4), and the same sampling locations were used for both growing seasons (2022–2023 and 2023–2024) to ensure temporal comparability of yield measurements. Yield was standardized to a grain moisture content of 13%. Regarding crop management at the site, aside from subsoiling and the application of termite mound material, operations included mechanized soil preparation (plowing and harrowing), sowing, mineral fertilization, and pre-emergence herbicide application, all applied uniformly across all blocks. Maize sowing was carried out simultaneously with the application of an NPK (10-20-10) base fertilizer at a rate of 200 kg ha⁻¹, followed by urea topdressing applied 45 days after sowing, also 200 kg ha⁻¹. A single maize variety was cultivated at spacings of 0.75 m between rows and 0.25 m within rows, corresponding to a planting density of 53,333 plants ha⁻¹.

$$\text{Yield (kg/ha)} = \left[\left(\text{number of rows of grain per ear} \times \frac{\text{number of ears per m}^2}{100} \right) \times \left(\text{Weight of 1000 grains (g)} \right) \times 10000 \right] \quad (4-3)$$

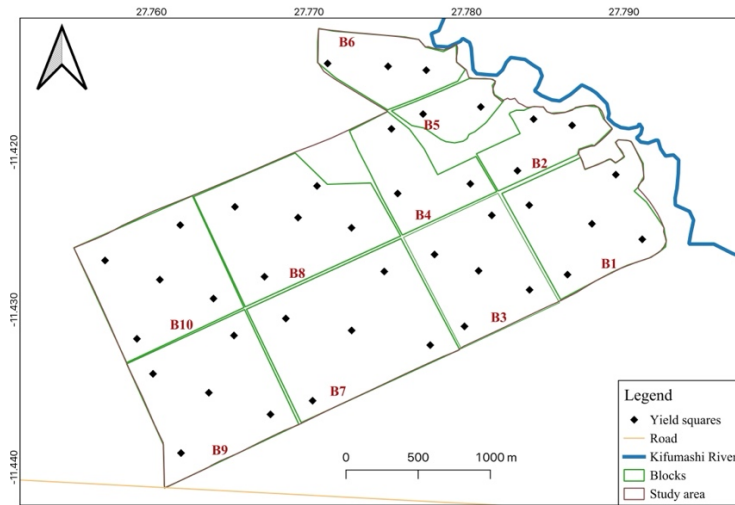


Figure 4-4 : Spatial distribution of maize grain yield sampling plots across the study area. Sampling plots are shown within each block (B1–B10).

4.4.5. Stepwise linear regression

Stepwise multiple linear regression analyses were conducted to identify the soil factors influencing maize grain yield. Prior to regression modelling, Spearman's rank correlations and principal component analysis (PCA) were performed to explore the relationships between soil variables and yield. These preliminary analyses helped restrict the set of explanatory variables to those showing significant associations with yield, and these variables were subsequently used in the regression models.

Variable selection was performed using both forward and backward stepwise procedures. The optimal model was chosen based on Akaike's information criteria (AIC), with the model presenting the lowest AIC retained as it provides the best balance between goodness of fit and model parsimony (Venables & Ripley, 2002). The variance inflation factor (VIF) was then computed to assess multicollinearity among predictors (Akinwande et al., 2015), and only variables with $VIF < 3$ were included in the final model (O'Brien et al., 2019). In addition, model performance was evaluated using RMSE and p-values, with statistical significance set at $p < 0.05$ (Smith & Smith, 2007). The polynomial regression equation was computed to obtain unstandardized coefficients, which represent the direct effect of each explanatory variable on yield in their original measurement units. The equations were also used to compare predicted versus observed maize grain yields, based on pixel values from the maize grain yield map and field-measured yields. Furthermore, standardized beta coefficients and their 95% confidence intervals were calculated to assess the strength and direction of the relationship between each predictor and yield (Nieminen, 2022). All statistical analyses were performed using R Studio software (version 4.4.1) and the R statistical environment (R Core Team, 2025).

Figure 4-5 illustrates the methodological workflow used for soil characterization and crop yield analysis at the study site. The procedure integrates field sampling, laboratory analyses, data structuring and geostatistical modelling. Soil properties (0–10 cm and profile horizons) were analysed using both disturbed and undisturbed samples, followed by spatial interpolation and model cross-validation. These outputs were subsequently linked to maize yield data to generate soil property and yield maps.

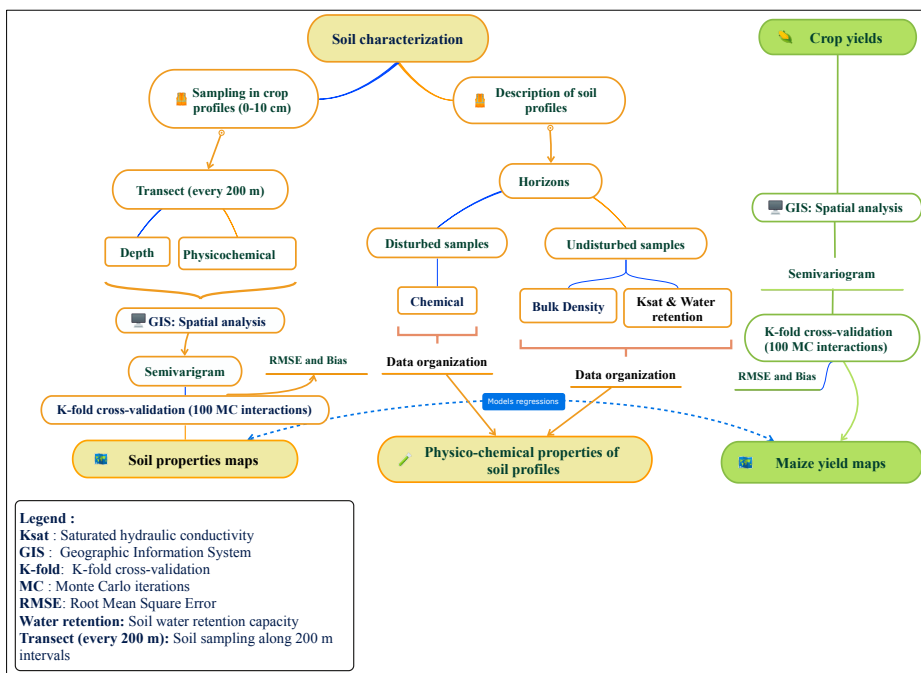


Figure 4-5 : Methodological workflow for soil characterization and crop yield analysis.

4.5. Results

4.5.1. Assessment of the effectiveness of subsoiling on soil depth

Consistent with the initial site conditions, where the plinthic crust occurred at very shallow depths across much of the study area, several zones still exhibited very shallow soil layers after subsoiling. Figure 4-6 illustrates the spatial distribution of soil thickness after mechanical subsoiling across the entire study area. The map highlights zones with very shallow soil layers, in some cases less than 9 cm thick, where the subsoil locally outcrops at the surface, indicating the need for additional subsoiling operations in these areas. The thinnest soils are mainly concentrated in the central part of the concession, reflecting the strong spatial heterogeneity of soil depth despite the applied subsoiling treatment. In contrast, only blocks B2, B5, B6, and B9 are entirely characterized by deep soils, with soil thickness exceeding 73 cm.

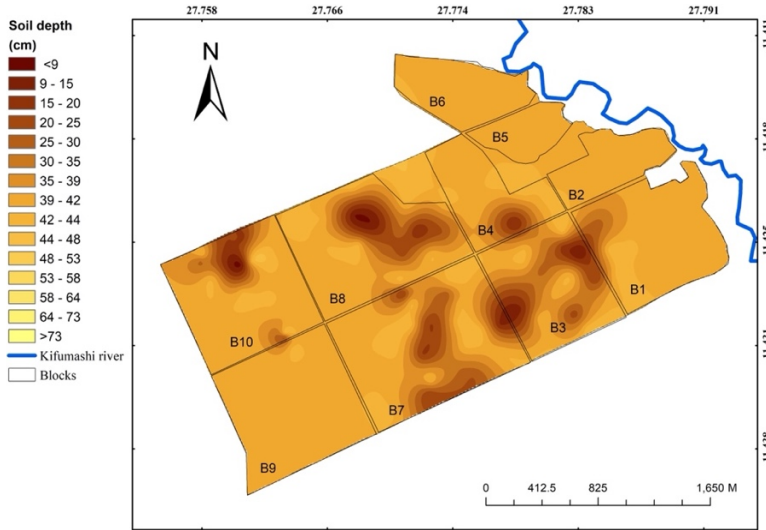


Figure 4-6 : Spatial variation in soil thickness across the study area after subsoiling. B denotes the different blocks (B1-B10).

4.5.2. Spatial variation in soil chemical properties after subsoiling and spreading of termite mound material

4.5.2.1. Soil pH

Figure 4-7 shows the spatial distribution of soil pH measured in KCl (left) and in water (right) in the surface layers (0-10 cm) after mechanical subsoiling and the application of termite mound material. The pH KCl map highlights areas with values lower than 4.1 and higher than 7.8, distributed across the study area. Its spatial pattern is highly heterogeneous, with more pronounced soil acidification observed in blocks B8, B9, and B10, as well as in the northern part of the site near the river. In contrast, the central part of the site generally exhibits pH KCl values above 5.5, indicating less acidic to near-neutral soil conditions. A similar spatial pattern is observed for pH measured in water, although localized extremes with values below 4.9 and above 8.7 occur in specific areas within the study perimeter.

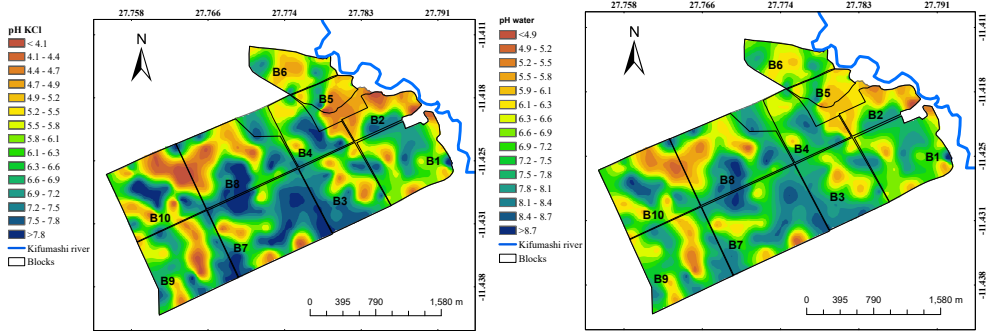


Figure 4-7 : Spatial variation of soil pH measured in KCl (left) and in water (right) in the 0–10 cm layer after subsoiling and application of termite mound material. B denotes the blocks (B1–B10).

4.5.2.2. Total organic carbon

Figure 4-8 shows the spatial variation of total organic carbon (TOC) in the surface layer (0–10 cm) after mechanical subsoiling and application of termite mound material. TOC values range from less than 0.4% to more than 2.5%, depending on location. Overall, the study area is characterized by generally low TOC contents, with only a few localized zones exceeding 2.5%, mainly within specific blocks. A slight increase in TOC is observed near the river, suggesting more favourable conditions for organic matter accumulation in this zone; however, these values remain moderate relative to the rest of the study area.

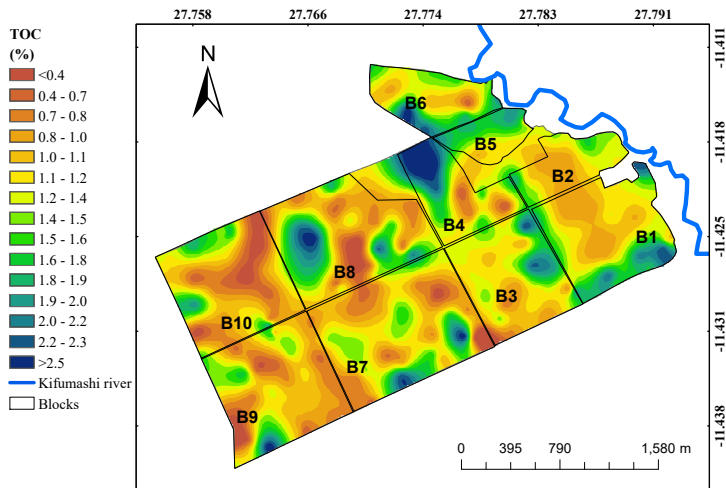


Figure 4-8 : Spatial distribution of total organic carbon (TOC) in the 0–10 cm soil layer after subsoiling and application of termite mound material. B denotes the blocks (B1–B10).

4.5.2.3. Available nutrients

The results presented in Figure 4-9 illustrate the spatial distribution of available nutrients in the surface layer (0–10 cm) after mechanical subsoiling and amendment with termite mound material. Available phosphorus contents range from less than 5.1 mg kg^{-1} to more than 145.5 mg kg^{-1} across the study area. The highest concentrations are observed in blocks B10, B7, and B4, whereas a general decrease in P availability occurs toward the peripheral zones of the study site, with a few localized exceptions (Figure 4-9a).

Calcium concentrations vary from less than 1,361 to more than 18,268 mg kg^{-1} , showing a generally homogeneous spatial distribution, although localized enrichment is observed in blocks B8, B9, and B10 (Figure 4-9b). Available aluminium ranges from less than 44.4 mg kg^{-1} to more than 293.4 mg kg^{-1} , with higher contents in blocks B8, B9, and B10, as well as near the river in blocks B1 and B2 (Figure 4-9c).

Copper concentrations range from less than 1.9 mg kg^{-1} to more than 25.8 mg kg^{-1} , displaying a relatively uniform distribution over the study area. Only localized enrichment is observed at the downstream end of block B1 near the river, where values reach 25.8 mg kg^{-1} (Figure 4-9d). Potassium concentrations range from less than 130.2 mg kg^{-1} to more than 942.0 mg kg^{-1} , with a general decreasing trend toward lower-altitude areas close to the river, although elevated values persist at the northeastern extremity of block B1 (Figure 4-9e).

Iron contents range from less than 28.1 mg kg^{-1} to more than 351.7 mg kg^{-1} , with an overall irregular spatial distribution. The dominant class lies between 77.8 and 102.7 mg kg^{-1} , while maximum concentrations occur locally in small zones within blocks B3 and B10 (Figure 4-9f). Magnesium varies from less than 238.8 mg kg^{-1} to more than $2,987 \text{ mg kg}^{-1}$ and shows a markedly heterogeneous spatial pattern, with higher concentrations mainly in blocks B4 and B10 (Fig. 9g). Finally, manganese ranges from less than 4.4 mg kg^{-1} to more than 669.4 mg kg^{-1} , with an irregular distribution and a tendency to increase with distance from the river, particularly in blocks B10, B9, B8, B7, B3, and B1 (Figure 4-9h).

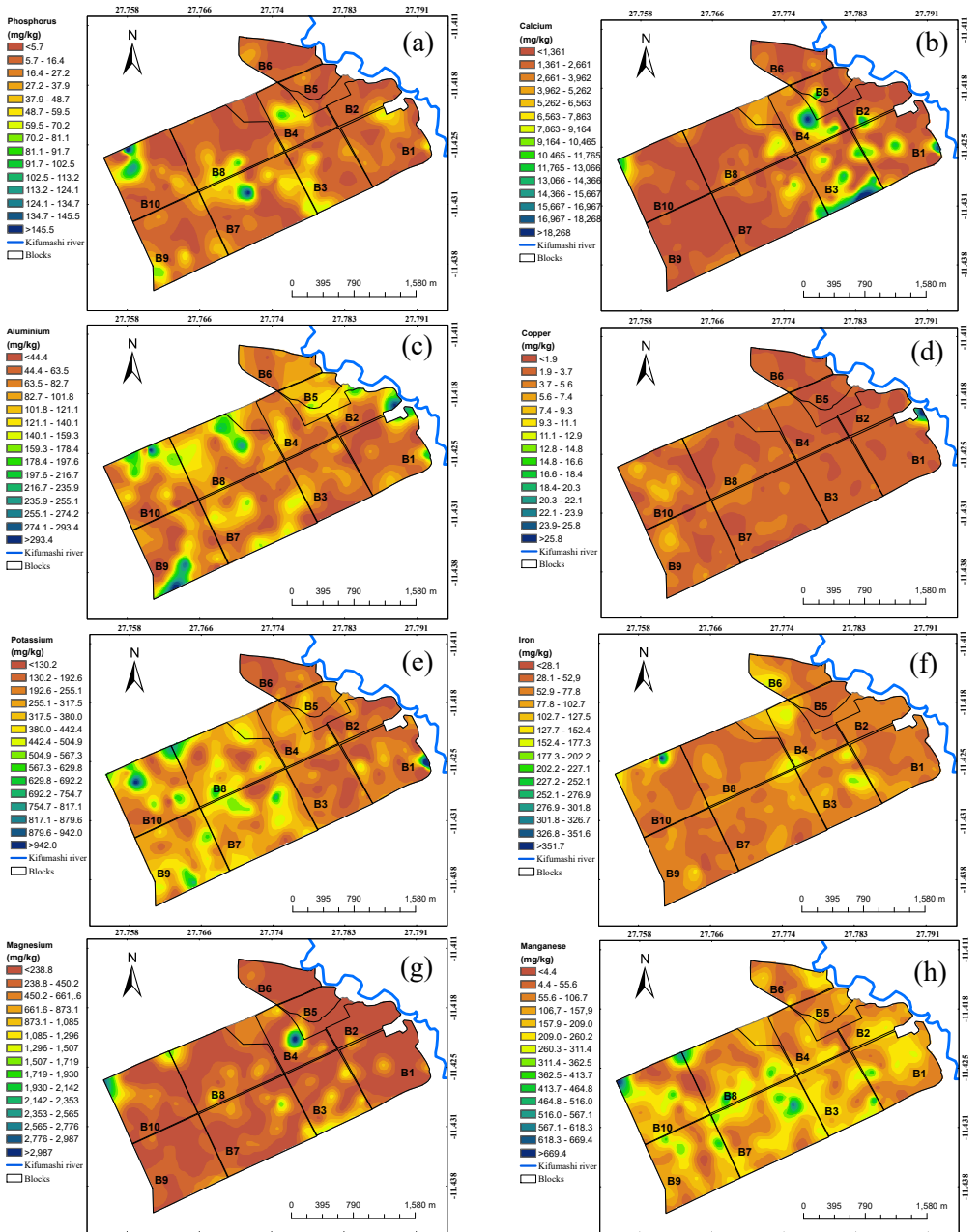


Figure 4-9 : Spatial variation of available soil nutrients in the 0–10 cm layer after subsoiling and application of termite mound material: (a) P, (b) Ca, (c) Al, (d) Cu, (e) K, (f) Fe, (g) Mg, and (h) Mn. B denotes the blocks (B1–B10).

4.5.3. Physicochemical characterization of soil profiles

Data on the physicochemical properties of soils after mechanical subsoiling and amendment with termite mound material reveal pronounced heterogeneity among soil profiles and horizon depths. Soil pH measured in water ranges from 5.7 to 8.4, indicating slightly acidic to slightly alkaline conditions, which are generally favourable for nutrient availability and plant uptake. In contrast, pH measured in KCl varies between 4.2 and 7.6, reflecting the presence of exchangeable acidity within the soil exchange complex.

Total organic carbon (TOC) contents show substantial vertical and lateral variability, reaching values of up to 2.9% in the surface horizon (Ap) of profile B7, indicating locally enhanced organic matter levels in the topsoil. Available phosphorus contents are generally low, ranging from 0.3 to 154.8 mg kg⁻¹, with maximum values observed in profile B10, suggesting enhanced P availability within the effective rooting zone.

Calcium concentrations are particularly high, especially in the Ap horizon of profile B4 (12,499 mg kg⁻¹), while remaining moderately to highly abundant in the other profiles. Potassium and magnesium contents reached maximum values of 486.6 mg kg⁻¹ and 795.2 mg kg⁻¹ in surface soils, respectively, illustrating the positive contribution of termite mound amendments to the supply of base cations.

Manganese exhibits a contrasting vertical distribution, with maximum concentrations of 190 mg kg⁻¹ at depth in profile B5, whereas in most other profiles the highest Mn values occur in the surface horizons (Ap). Copper and iron display similar depth-dependent trends, with concentrations decreasing downward in the soil profile, suggesting a strong control of surface processes on micronutrient dynamics. In contrast, aluminium shows relatively higher concentrations in deeper horizons, consistent with the influence of plinthitic materials.

Analysis of horizon stratification (Ap, AB, Bs) reveals an overall decline in nutrient contents with increasing depth, reflecting the persistent influence of plinthite on soil functioning, which reduces the effective rooting volume and may limit the long-term sustainability of agricultural productivity. Particle-size distribution analysis indicates textures dominated by silt and clay fractions, with a marked vertical gradient characterized by increasing clay contents in subsurface horizons (e.g., profile B5: from 18.6% in Ap to 37.6% and 44% in deeper horizons; profile B6: from 19.7% to 40.2% and then 34.6%). This pattern is typical of clay illuviation processes associated with plinthitic soils.

Surface horizons (Ap) show higher sand contents in certain blocks (B1, B6, B8, and B10, with 40–47% sand), whereas other surface horizons (B4, B5, B7, and B9) are dominated by silt (≥50%). In deeper horizons (AB, Bs, and Bcs), clay proportions generally increase, resulting in denser soil layers and reflecting the structural and textural control exerted by plinthite on soil profile differentiation (Tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Physicochemical properties of soil profiles after mechanical subsoiling and amendment with termite mound materials.

Profiles	Horizons	Depth (cm)	pH water	pH KCl	TOC (%)	(mg kg ⁻¹)										
						P	Ca	K	Mg	Mn	Cu	Fe	Al	Clay	Silt (%)	Sand
B1	Ap	0-26	8.2	7.5	0.9	1.3	2,546	205.3	201.5	189.9	2.6	51.4	48.3	19.4	33.2	47.4
B2	Ap	0-27	6.9	5.6	0.8	0.4	875.3	62.7	77.8	117.5	1.8	44.8	49.9	21.1	40.4	38.5
	AB	27-79	5.6	4.2	0.2	0.3	266.2	71.5	50.4	30.5	0.5	14.6	147.4	28.4	37.7	33.9
B3	Ap	0-30	7.9	7.6	1.1	8.9	2,566	96.1	358.1	194.8	3.4	55.7	66.9	22.2	47.6	30.2
	AB	30-43	6.0	4.9	0.6	2.4	245.2	63.6	126.0	27.4	1.0	20.5	97.6	20.0	45.2	34.8
	Bs	43-80	5.5	4.3	0.4	1.9	82.7	134.9	148.3	26.5	0.7	18.3	133.4	30.6	44.5	24.9
B4	Ap	0-20	8.4	7.3	1.2	13.9	12,499	218.9	795.2	166.9	3.9	72.7	52.0	24.1	57.9	18.0
	AB	20-35	8.0	7.6	1.8	19.0	2,651	70.6	260.4	39.8	2.6	43.6	67.4	16.1	52.3	31.6
B5	Ap	0-46	6.1	5.2	2.0	1.1	1,735	244.8	375.9	16.4	2.1	67.8	94.3	18.6	56.0	25.4
	AB	46-92	7.2	5.4	0.4	1.0	1,101	113.5	109.9	31.0	0.6	8.1	65.7	37.6	30.2	32.2
	Bs	92-150	7.8	6.4	0.2	4.3	1,331	148.4	386.0	190.0	0.3	22.5	87.7	44.0	27.2	28.8
B6	Ap	0-25	5.9	4.8	1.2	2.0	514.2	144.9	86.9	104.5	1.0	30.4	113.9	19.7	32.9	47.4
	AB	25-132	6.1	4.8	0.2	0.6	442.8	238.1	143.9	102.5	0.4	22.3	115.0	40.2	28.1	31.7
	Bs	132-201	5.7	4.2	0.2	2.7	190.5	147.2	209.3	20.1	0.3	7.8	134.5	34.6	38.0	27.4
B7	Ap	0-20	8.0	7.6	2.9	44.7	4,856	324.2	459.1	197.9	3.3	123.4	132.6	20.6	50.5	28.9
	AB	20-30	6.5	5.9	0.9	3.8	298.0	188.2	169.4	91.9	1.5	26.9	78.8	18.0	51.7	30.3
	Bs	30-75	5.6	4.4	0.4	1.5	97.8	160.3	101.4	75.1	0.6	23.6	112.0	24.3	51.3	24.4
	Bsx	>75	5.6	5.2	0.3	1.7	152.3	115.3	157.7	49.6	0.5	17.1	105.5	-	-	-
B8	Ap	0-35	6.0	4.8	0.7	3.4	165.6	101.5	122.2	34.5	1.9	24.7	94.1	18.8	41.2	40.0
	Bcs	35-110	6.1	4.2	0.2	1.5	27.0	119.5	69.5	10.4	0.9	10.2	233.6	34.1	45.0	20.9
B9	Ap	0-30	7.1	6.4	1.4	8.7	746.3	121.8	240.4	128.1	3.4	76.4	82.7	22.2	53.2	24.6
	Bcs1	30-70	5.3	4.2	0.7	2.9	90.3	125.2	110.8	58.2	1.9	34.4	194.6	27.8	49.6	22.6
	Bcs2	>70	5.5	4.5	0.3	1.1	71.3	310.2	177.4	27.4	1.1	23.6	135.9	-	-	-
B10	Ap	0-27	7.5	6.7	2.3	154.8	1,818	486.6	446.4	47.8	2.1	97.2	168.2	12.0	43.5	44.5
	Bs	27-130	7.0	5.4	0.3	3.7	75.8	524.5	80.9	3.1	0.3	17.2	80.9	21.8	46.4	31.8

Soil pH was measured in water and 1 N KCl; total organic carbon (TOC) was determined using the Walkley–Black method (Walkley & Black, 1934); available elements were extracted with ammonium acetate + EDTA (pH 4.65) and analysed by ICP-OES; phosphorus was determined colourimetrically; particle-size distribution was determined using the pipette method.

4.5.4. Influence of subsoiling on bulk density and water dynamics in soil profiles

The results show that bulk density (BD) is generally lower in surface horizons, ranging from 1.17 to 1.53 g cm⁻³, and increases with depth toward more compact plinthic horizons, where values exceed 1.70 g cm⁻³. This vertical pattern reflects a structural improvement of surface soils, likely associated with mechanical subsoiling and amendment with termite mound material.

Saturated hydraulic conductivity (Ksat) exhibits strong vertical and lateral variability, with very high values in surface horizons (ranging from 1,810 to 7,780 mm day⁻¹ in profiles B1, B3, and B9) and substantially lower values at depth, particularly in plinthic horizons (e.g., 63.9 mm day⁻¹ in the Bs horizon of profile B5).

Soil water retention at field capacity (drained upper limit, DUL) is higher in surface horizons (ranging from 0.257 to 0.302 v/v) and declines markedly in plinthic horizons (from 0.115 to 0.154 v/v). In contrast, the wilting point (lower limit, LL) remains relatively high, reaching values of up to 0.226 v/v, thereby reducing the amount of plant-available water within the soil profile (Tableau 4-2).

Tableau 4-2 : Bulk density (BD), saturated hydraulic conductivity (Ksat), field capacity water content (DUL), and wilting point water content (LL) in soil profiles across the study site.

Profile	Horizon	Depth (cm)	BD (g cm ⁻³)	Ksat (mm day ⁻¹)	DUL LL	
					(V V ⁻¹)	
Block 1	Ap	0-26	1.35	7,780	0.26	0.16
Block 2	Ap	0-27	1.53	51.7	0.22	0.16
	AB	27-79	1.5	664	0.24	0.20
Block 3	Ap	0-30	1.56	86.4	0.19	0.11
	AB	30-43	1.85	6,130	0.15	0.08
	Bs	43-80	1.92	7,780	0.14	0.09
Block 4	AP	0-20	1.46	125	0.23	0.18
	AB	20-35	1.19	126	0.26	0.19
Block 5	Ap	0-46	1.19	625	0.30	0.24
	AB	46-92	1.7	276	0.24	0.20
	BS	92-150	1.77	63.9	0.27	0.23
Block 6	Ap	0-25	1.37	333	0.21	0.14
	AB	25-132	1.65	32.9	0.19	0.15
	Bs	132-201	-	-	-	-
Block 7	Ap	0-20	1.42	1210	0.26	0.16
	AB	20-30	1.66	4,320	0.18	0.09
	Bs	30-75	1.92	864	0.15	0.09
	Bsx	>75	-	-	-	-
Block 8	Ap	0-35	1.46	44.7	0.16	0.10
	Bcs	35-110	1.74	400.5	0.12	0.06
Block 9	Ap	0-30	1.17	1,810	0.26	0.09
	Bcs1	30-70	1.46	892.4	0.19	0.09
	Bcs2	>70	-	-	-	-
Block 10	Ap	0-27	1.45	1,410	0.18	0.13
	BS	27-130	1.62	767	0.21	0.16

4.5.5. Spatial variation in grain maize yield after subsoiling and spreading termite mound material

Figure 4-10 shows the spatial distribution of grain maize yield across the study area after mechanical subsoiling and amendment with termite mound material for the 2022–2023 (left) and 2023–2024 (right) growing seasons. Grain yield values range from less than 2.3 to more than 11.1 t ha⁻¹, depending on location within the study perimeter. During the first growing season (2022–2023), yield patterns are spatially heterogeneous, with lower yields predominantly observed in blocks B8 and B10, whereas the remaining blocks generally exhibit moderate to high yields, particularly in low-lying areas close to the river.

During the second growing season (2023–2024), a general increase in maize grain yield was observed across all blocks, with an average improvement of approximately 1 t ha⁻¹. Although blocks B8 and B10 largely maintained their lower-yield patterns, several localized zones within these blocks showed marked yield improvement. This overall increase resulted in a rise in the mean grain yield from 7.1 to 8.2 t ha⁻¹, highlighting the positive cumulative effect of subsoiling and termite mound amendments over time (Figure 4-11).

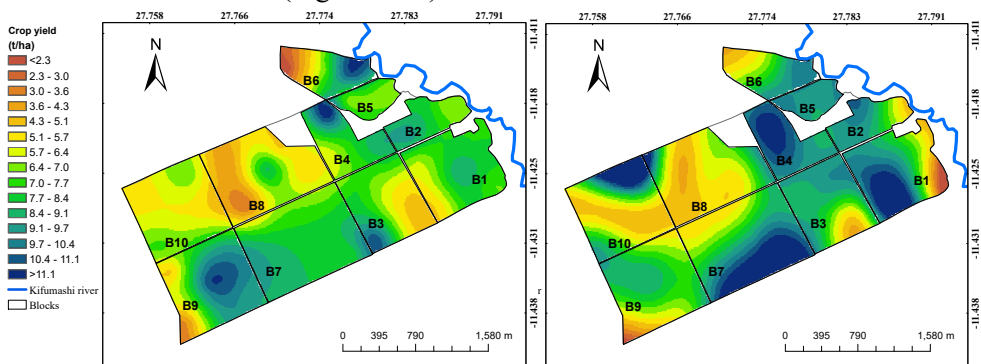


Figure 4-10 : Spatial distribution of grain maize yield across the study area after subsoiling and amendment with termite mound material. Left: 2022–2023 growing season; right: 2023–2024 growing season. B denotes the blocks (B1–B10).

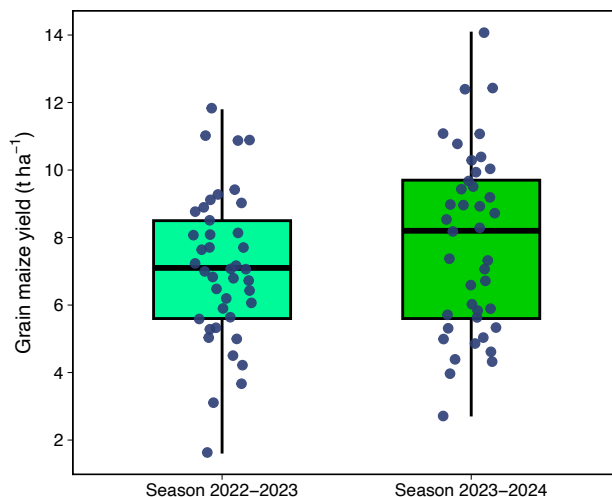


Figure 4-11 : Descriptive analysis of grain maize yield across the study area for the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. Boxes represent the interquartile range, horizontal lines indicate median values, and points correspond to individual yield observations.

4.5.6. Interactions between soil parameters and maize yield

Correlation analyses conducted across both growing seasons revealed that higher soil pH values, together with greater concentrations of total organic carbon (TOC) and calcium (Ca), were generally associated with increased maize grain yields. In contrast, copper (Cu) concentrations showed a consistent negative correlation with yield, an effect that was particularly pronounced during the first growing season (Figure 4-12).

These relationships were further supported by principal component analysis (PCA). The first principal axis (PC1, explaining 27.6% of the total variance) represents a soil fertility gradient dominated by pH, Ca, and organic matter, along which maize yields (Rdt1 and Rdt2) were positively associated with pH measured in water and KCl, Ca, and TOC, and negatively associated with Cu.

The second principal axis (PC2, explaining 23.6% of the variance) contrasts a Mn–K–P–Mg–depth gradient with Fe and Al, and accounts for a smaller proportion of yield variability. Along this axis, Rdt2 exhibited a weak negative relationship with Mn, suggesting a secondary influence of certain micronutrients on yield performance.

Overall, the spatial variability of maize grain yield was primarily structured by the edaphic gradient represented by PC1. Together, the first two PCA axes explain 51.2%

of the total variance, indicating that additional factors not captured by the measured soil variables also contribute to yield variability across the study area (Figure 4-13).

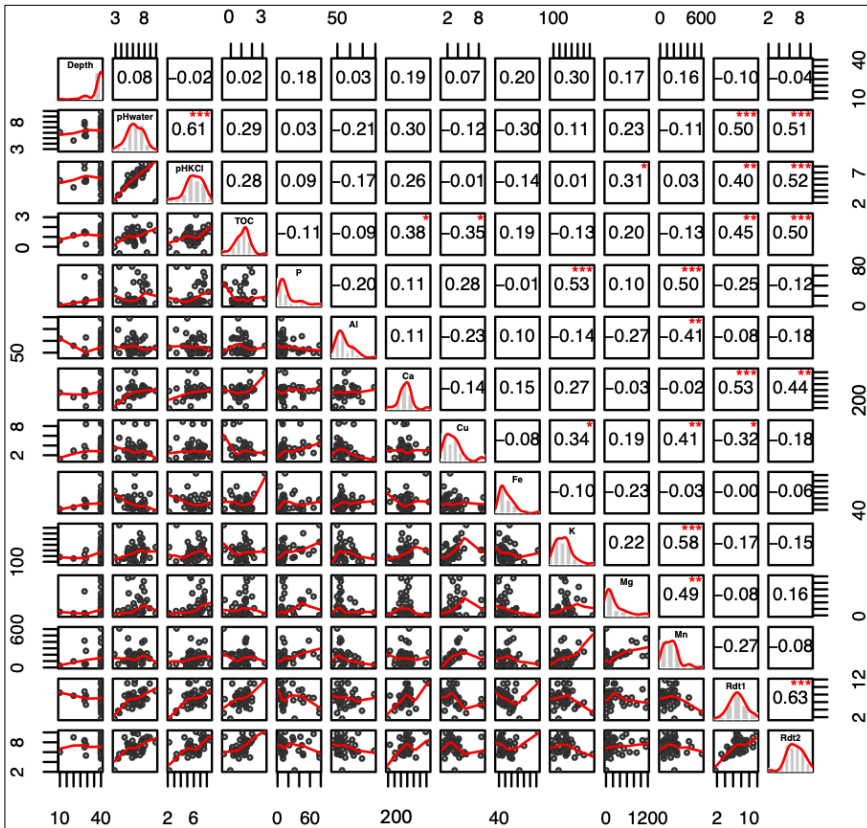


Figure 4-12 : Correlation and distribution matrix illustrating relationships between soil properties and grain maize yield for the 2022–2023 (Rdt1) and 2023–2024 (Rdt2) growing seasons. Pearson correlation coefficients (r) are represented by a colour gradient indicating both magnitude and sign (positive or negative). Asterisks denote levels of statistical significance (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

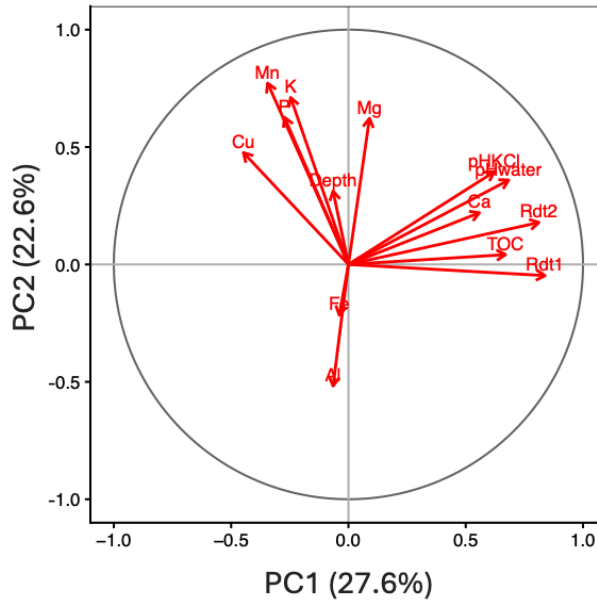


Figure 4-13 : Principal component analysis (PCA) correlation circle illustrating the relationships between soil properties and maize grain yields (Rdt1 and Rdt2). The first two principal components explain 50.2% of the total variance (PC1 = 27.6%, PC2 = 22.6%). Variables positioned close to each other indicate positive correlations, whereas variables oriented in opposite directions indicate negative relationships.

4.5.7. Performance of grain maize yield regression models derived from stepwise linear regression

Grain maize yields in the study area, as explained by stepwise multiple linear regression models, indicate that several soil properties exert a significant influence on crop production. The models exhibit coefficients of determination (R^2) greater than 0.50, p-values <0.05, and RMSE values lower than 1, demonstrating a satisfactory capacity to explain yield variability. However, regression models derived from yield map pixel values (Figure 4-14a) show slightly lower R^2 values than those based on field-measured yields (Figure 4-14b), suggesting that models calibrated with field observations provide more robust predictions.

For yields estimated from pixel-based values, soil pH measured in KCl and Fe were identified as the main determinants during the first growing season. Standardized beta coefficients indicate that a one-standard-deviation increase in Fe concentration is associated with a 0.153 standard-deviation decrease in yield, whereas a one-standard-deviation increase in pH KCl corresponds to a 0.075 standard-deviation increase in yield (Figure 4-14c). During the second growing season, copper (Cu) and calcium (Ca) emerged as the dominant explanatory variables (Figure 4-14d).

Regression models based on field-measured yields further confirm the significant role of specific soil properties. During the first season, soil pH, manganese (Mn), copper (Cu), and calcium (Ca) were identified as key determinants. Both Cu and Mn show negative relationships with yield, while a one-standard-deviation increase in soil pH and Ca results in yield increases of 0.334 and 0.332 standard deviations, respectively (Figure 4-14e). During the second season, soil pH, Mn, and total organic carbon (TOC) were retained in the optimal model. In this case, a one-standard-deviation increase in Mn is associated with a 0.35 standard-deviation decrease in yield, whereas equivalent increases in pH and TOC correspond to yield increases of 0.21 and 0.29 standard deviations, respectively (Figure 4-14f).

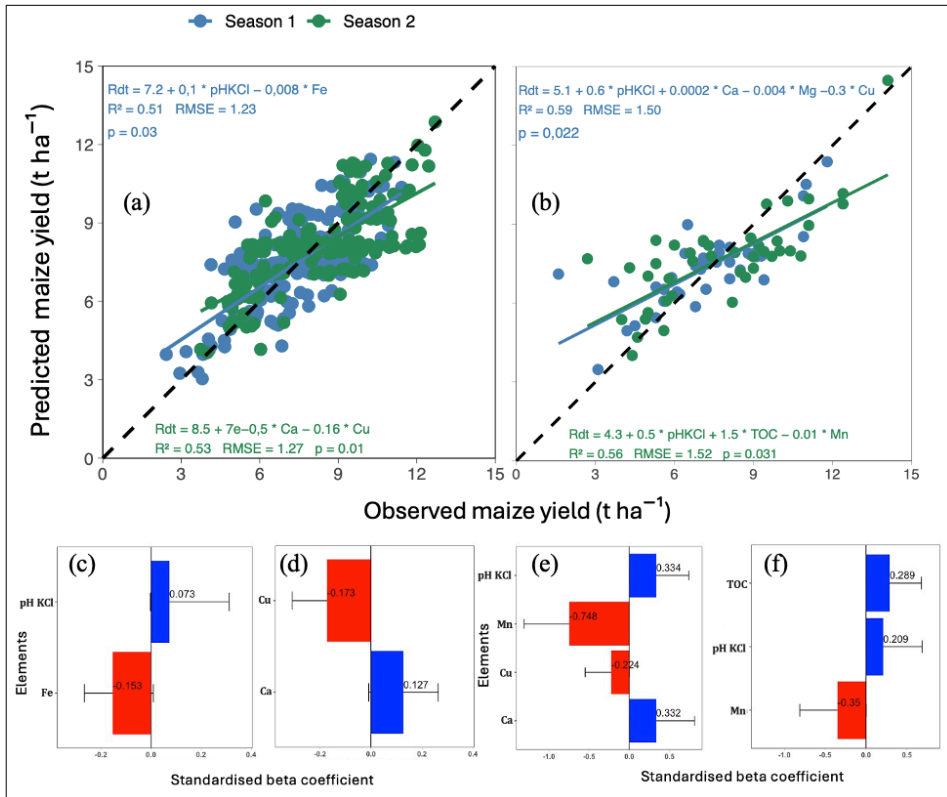


Figure 4-14 : Relationships between observed and predicted grain maize yields obtained from stepwise linear regression models based on yield map pixel values (a) and field-measured yields (b) for the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. Bar charts display the standardized beta coefficients ($\pm 95\%$ confidence intervals) of the explanatory variables included in the models: (c) and (d) correspond to pixel-based models, whereas (e) and (f) correspond to models based on field-measured yields for the two seasons, respectively. Solid lines represent fitted regression relationships, and the dashed line represents the 1:1 reference line.

4.6. Discussion

4.6.1. Analysis of the performance of the interpolation model used

In this study, the Spline With Barriers interpolation model outperformed all other tested methods, producing more realistic and spatially coherent results than kriging, Inverse Distance Weighted (IDW), Simple Spline, and Natural Neighbour interpolation. These alternative methods, which do not explicitly account for spatial discontinuities or physical barriers, tended to over-smooth spatial patterns or generate artefacts in areas characterized by abrupt changes in soil properties, leading to higher RMSE values, increased bias, and, in some cases, a pronounced “bull’s-eye” effect (Metahni et al., 2019), When compared with the Spline With Barriers approach.

The Spline With Barriers model consistently exhibited lower RMSE values, indicating greater predictive accuracy for unsampled locations (Smith & Smith, 2007). In addition, bias values were close to zero, reflecting a balanced distribution of prediction errors and a reduced tendency toward systematic over- or underestimation (Harwell, 2018). This method is particularly effective because it explicitly integrates spatial barriers or constraints, such as natural boundaries or abrupt landscape features, which strongly influence the spatial distribution of soil properties (Childs, 2004).

The relevance of this approach has also been demonstrated in previous studies. Stupen et al. (2022) successfully applied the Spline With Barriers model to the construction of digital terrain models, showing that it effectively preserved local extremes and spatial discontinuities, thereby improving the representation of complex topographic patterns. In the present study, this capability proved essential for capturing the strong spatial heterogeneity induced by plinthite occurrence, subsoiling operations, and the uneven distribution of termite mound materials across the study area.

4.6.2. Assessment of the effectiveness of subsoiling on soil depth

The spatial distribution of soil thickness after subsoiling reveals pronounced spatial variability across the entire study area. This heterogeneity highlights critical zones where soil thickness remains below 9 cm, with plinthite locally exposed at the surface. Such conditions clearly indicate the limited effectiveness of the first subsoiling pass in these areas and support the need for additional subsoiling operations to further increase soil depth and, consequently, maximize the effective rooting volume available to crops.

Several studies have demonstrated that properly implemented subsoiling can substantially improve soil functionality, including soil structure, porosity, and rooting conditions (Cote and Dupuis, 1980; Grevers and De Jong, 1993; Steppuhn et al., 1995; Wang et al., 2023a). However, the effectiveness of subsoiling strongly depends on soil characteristics and the type of equipment used, as emphasized by Caban et al. (2024); Wang et al. (2024b) also showed that non-uniform loosening can limit the agronomic benefits of the practice. In the present study, shallow soils are mainly

concentrated in the central part of the study area, where the restricted trophic volume severely constrains root development, thereby reducing plant access to both water and nutrients. The presence of plinthite represents a major pedological constraint to soil depth management, as it forms a physical barrier that restricts root penetration and water movement (Brogowski & Kwasowski, 2012; Daniels et al., 1978; de Moraes et al., 2006; Jien et al., 2010; Wang et al., 2020; WRB-IUSS, 2015). Under such conditions, at least one additional subsoiling pass appears essential to ensure sufficient soil depth for sustainable crop production.

When correctly applied, subsoiling has been widely recognized as an effective management practice for improving soil structure, enhancing aeration, promoting deeper root penetration, and increasing access to water and nutrients (Alonso et al., 2023; Huang, et al., 2024a; Huang, et al., 2024b; Liu, et al., 2024a; Li et al., 2024a; Šarauskis et al., 2024; Wang et al., 2023a; Wang et al., 2023b; Wu et al., 2024; Xie et al., 2024). In plinthitic environments similar to those of the present study, Boubacar et al. (2017) reported a 72% reduction in annual runoff in subsoiled plots compared to untreated controls on Plinthosols in Tondi Kiboro (Niger), illustrating the hydrological benefits of effective subsoiling. Beyond mechanical interventions, traditional soil management practices in West Africa also aim to maintain or increase effective soil depth in Plinthosols. For instance, Asiamah and Dwomo (2010) reported that farmers in Burkina Faso and Ghana maintain arable soil thickness through the construction of stone dikes, while in Mali and Senegal, the Zaï technique is used to enhance soil depth and fertility. These practices underscore the central role of soil depth management in overcoming the limitations imposed by plinthite, and they support the relevance of subsoiling as a complementary or alternative strategy under mechanized farming conditions.

4.6.3. Spatial variation in soil chemical properties

The spatial distribution of soil chemical properties in the 0–10 cm layer after mechanical subsoiling and amendment with termite mound materials reveals marked spatial heterogeneity, reflecting both intrinsic soil variability and contrasts in the incorporation of amendments across the study area. Soil pH measured in KCl exhibits values below 4.1 and above 7.8, distributed throughout the site, indicating complex and spatially structured pedochemical dynamics. Blocks located in the northern part of the site, close to the river, display more pronounced soil acidification, likely associated with enhanced leaching of base cations and hydrological accumulation of H⁺ ions (De Dapper & Malaisse, 1979). This observation corroborates the findings of Sanchez (2018), who reported that intense leaching promotes soil acidification and favours plinthite formation.

Soil acidity in these areas is further exacerbated by the high iron oxide (Fe₂O₃) content typical of plinthitic soils, which enhances proton buffering and limits base saturation (Brogowski & Kwasowski, 2012; Eze et al., 2010; Jones et al., 2013; Legros, 2013; WRB-IUSS, 2015). In contrast, central areas of the study area exhibit pH values above 5.5, corresponding to neutral to slightly alkaline soil conditions. This

pattern is likely explained by the more effective incorporation of calcium-rich termite mound materials, often containing calcium carbonate (CaCO_3) (Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2015; Li et al., 2017; Mujinya et al., 2013; Padonou et al., 2020; Rajeev and Sanjeev, 2011). Through dissociation into Ca^{2+} and CO_3^{2-} , carbonate ions neutralize H^+ , thereby increasing soil pH (Ma et al., 2024). This mechanism supports the conclusions of Asiamah and Dwomo (2010), who demonstrated that calcium amendments can substantially improve the productivity of Plinthosols by correcting soil acidity.

However, some localized areas show pH values in water exceeding 8.7, indicating excessive alkalinity, which may limit micronutrient availability (Jobbágy et al., 2017). Total organic carbon (TOC) contents range from less than 0.4% to more than 2.5%, reflecting the overall organic matter poverty typical of plinthitic and ferralitic soils (Brogowski and Kwasowski, 2012; Dos Santos et al., 2018; Fritsch et al., 2007; Giorgis et al., 2014; Kumar et al., 2018). In this regard, Hounkpatin et al. (2018) reported a loss of 24 t C ha^{-1} over 29 years on a Plinthosol in Burkina Faso, highlighting the long-term vulnerability of these soils.

A slight increase in TOC near the river likely reflects higher biomass production and regular inputs of plant residues from floodplain environments (Wang et al., 2024c). Nevertheless, TOC levels remain modest overall, suggesting that the positive effects of termite mound amendments are either spatially limited or partially offset by rapid organic matter mineralization, leaching, and poor residue incorporation (Chizen et al., 2024).

Nutrient distributions also exhibit strong spatial variability. Available phosphorus remains globally low (from <5.1 to $>145.5 \text{ mg kg}^{-1}$), with localized peaks in blocks B7 and B10. This pattern is consistent with strong P fixation by iron and aluminium oxides commonly found in plinthitic soils (Delfim et al., 2024; Gotz et al., 2024; Laurent & Brossard, 1991; Rotta et al., 2015; Sanchez, 2018; Useni et al., 2014). Elevated P concentrations in specific blocks may reflect residual effects of previous phosphate fertilizer applications, indicating a localized anthropogenic contribution.

Calcium concentrations locally exceed $18,267.7 \text{ mg kg}^{-1}$, confirming the high calcium content of termite mound materials (Adhikary et al., 2016; Mujinya et al., 2013). While beneficial for correcting soil acidity, such high Ca levels require careful management to avoid nutrient imbalances and antagonistic effects (Lehto, 1994; Sediqui et al., 2024). Aluminium (<44.4 to $>293.4 \text{ mg kg}^{-1}$) and iron (up to $>351.7 \text{ mg kg}^{-1}$) are abundant, which is characteristic of plinthitic materials (Davies, 1997; Ngon Ngon et al., 2009; Roquin et al., 1990; Soil Survey Staff, 2014), but these elements may reduce phosphorus availability and exert toxic effects on plants at high concentrations (Bell et al., 2024; Fang et al., 2024; Shi et al., 2024). Copper concentrations can exceed 25.8 mg kg^{-1} , reflecting the copper-rich geochemical background of the Lubumbashi region (Bogaert et al., 2019). These concentrations may be further redistributed by termite-driven bioturbation (Jouquet et al., 2020). Manganese (<4.4 to $>669.4 \text{ mg kg}^{-1}$) and magnesium (<238.8 to $>2,987.4 \text{ mg kg}^{-1}$) show marked spatial variability, largely controlled by the degree of amendment

incorporation and soil hydrological conditions (Lahori et al., 2024; Widdowson, 2009; Woś et al., 2024; Xu et al., 2024). Finally, potassium ranges from <130.2 to >942.0 mg kg⁻¹, with lower concentrations observed near the river, likely due to topographically driven leaching toward low-lying areas (Akhatov et al., 2024; Alexandre, 2002; De Dapper & Malaisse, 1979; Nascimento et al., 2024).

4.6.4. Physicochemical and hydric characterization in soil profiles

The results obtained after mechanical subsoiling and amendment with termite mound materials reveal a high degree of heterogeneity in the physical, chemical, and hydraulic properties of soils, closely linked to the variability of soil profiles and horizon differentiation. Soil pH measured in water ranges from 5.7 to 8.4, indicating slightly acidic to slightly alkaline conditions that are generally favourable for nutrient availability, whereas the lower pH measured in KCl (4.2 to 7.6) reflects complex chemical interactions within the soil exchange complex, influenced by ionic exchanges between soil particles and amendments (Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2015; Li et al., 2017; Padonou et al., 2020; Rajeev and Sanjeev, 2011; WRB-IUSS, 2015). Total organic carbon (TOC) contents remain generally low, but locally exceed 2% in surface horizons, highlighting the contribution of organic matter from termite mound materials. This variability is typical of ferralitic and plinthitic soils, which are characterized by a limited capacity to stabilize organic matter, often associated with coarse textures, weak aggregation, and rapid mineralization (Kasongo, 2008; Sanchez, 2018). Available phosphorus contents are also generally low, likely due to strong fixation by iron and aluminium oxides associated with plinthite (Delfim et al., 2024; Gotz et al., 2024; Laurent & Brossard, 1991; Rotta et al., 2015; Tshibangu et al., 2022). Nevertheless, a high surface value of 154.8 mg kg⁻¹ observed in block B10 suggests a residual effect of previous phosphorus inputs. Calcium reaches exceptionally high concentrations in surface horizons, confirming the calcium-rich nature of termite mound materials (Adhikary et al., 2016; Ekundayo & Aghatise, 1997; Harit et al., 2017; Jouquet et al., 2015; Mujinya et al., 2013). While beneficial for correcting soil acidity, such high Ca levels require careful management to avoid excessive alkalization and nutrient imbalances (Lehto, 1994; Sediqui et al., 2024). Potassium and magnesium show overall improvements in chemical fertility, whereas iron, manganese, and aluminium exhibit high and spatially heterogeneous concentrations, characteristic of Plinthosols formed through long-term Fe, Al, and Mn accumulation processes (Carvalho et al., 1991; Daniels et al., 1978; Eswaran et al., 1990; Nahon, 2003; Roquin et al., 1990). According to WRB-IUSS (2007), aluminium concentrations in Plinthosols can reach 100 g kg⁻¹ and exceed 300 g kg⁻¹ in petroplinthite, while iron contents can also exceed 100 g kg⁻¹, underscoring the intensity of these pedogenic processes.

Particle-size analysis reveals a clear vertical textural differentiation, typical of plinthitic soils, characterized by an increase in clay content with depth, indicative of illuviation processes (Fritsch et al., 2007; Nahon, 2003). Such vertical differentiation is common in highly weathered tropical soils and results from the downward

translocation of fine particles from surface to subsurface horizons, a process often associated with plinthite formation (Asiamah & Dwomo, 2010; Santos et al., 2023; WRB, 2022; Yoboue et al., 2019). Surface horizons exhibit higher sand contents in some blocks (B1, B6, B8, and B10), reflecting erosion and leaching of cultivated layers (Kasongo, 2008; Sanchez, 2018). In contrast, subsurface horizons (AB, Bs, and Bcs) show higher clay contents (up to 44%), resulting in denser soil structures that restrict permeability and root penetration (Brogowski & Kwasowski, 2012; de Moraes et al., 2006).

These findings emphasize the central role of plinthite in controlling textural differentiation and imposing physical constraints within soil profiles. The incorporation of termite mound materials, which are finer-textured and enriched in base cations (Jouquet et al., 2015; Mujinya et al., 2010), can improve the structure and fertility of surface horizons. However, their effectiveness remains strongly dependent on appropriate profile management, particularly through subsoiling to disrupt compacted layers and enhance amendment incorporation.

From a physical perspective, bulk density is lower in surface horizons ($1.17\text{--}1.53\text{ g cm}^{-3}$) and increases toward compact plinthic horizons, reaching values of up to 1.92 g cm^{-3} , reflecting a surface structural improvement linked to termite mound amendments, while strong physical constraints persist at depth. These values remain lower than those reported by the FAO (2001) for petroplinthite ($2.5\text{--}3.6\text{ g cm}^{-3}$), and surface bulk densities are consistent with the ranges reported by Brady and Weil (2008) for Ap horizons ($1.2\text{--}1.5\text{ g cm}^{-3}$).

Saturated hydraulic conductivity (Ksat) shows strong vertical variability, with high values in surface horizons (up to $7,780\text{ mm day}^{-1}$ in B1 and B3, and $1,810\text{ mm day}^{-1}$ in B9) and much lower values in deeper horizons (e.g., 63.9 mm day^{-1} in the Bs horizon of profile B5). This pattern indicates restricted infiltration and water movement at depth due to plinthite, consistent with findings by de Moraes et al. (2006). Plinthite, characterized by low porosity and irreversible hardening, therefore acts as a major barrier to both water circulation and root penetration (Brogowski and Kwasowski, 2012; Jacobs et al., 2002; Liu et al., 2020; Sarkar and Bandyopadhyay, 2018; Stiles et al., 2001; Wildemeersch et al., 2015; Yaro et al., 2006). In this context, Wu et al. (2010) reported 41.8% improvement in basalt permeability following polymer application, highlighting the difficulty of permanently alleviating such physical constraints.

Finally, soil water content at field capacity (DUL) is higher in surface horizons ($0.257\text{--}0.302\text{ v/v}$) and decreases with depth ($0.115\text{--}0.154\text{ v/v}$), while the wilting point (LL) is lower at the surface ($0.094\text{--}0.159\text{ v/v}$) but relatively high in plinthic horizons, reaching values of up to 0.226 v/v . This configuration results in greater plant-available water in surface layers, thereby promoting improved crop water supply. The enhanced surface water retention reflects the positive influence of termite mound materials on mesopore abundance and connectivity (Feiza et al., 2015; Pessoa et al., 2024). Mesopores preferentially retain water at field capacity, whereas micropores retain water more strongly, explaining the elevated LL values observed in deeper

horizons (Dalmago et al., 2009). Several studies have similarly demonstrated that subsoiling combined with organo-mineral amendments improves soil hydraulic properties and water availability in surface horizons (Alonso et al., 2023; Liu et al., 2024a; Ramadhan and Alfari, 2023; Wang et al., 2024a; Wu et al., 2024).

4.6.5. Spatial variation in grain maize yield

The spatial distribution of grain maize yields reveals a wide range of productivity, with values varying from less than 2.3 to more than 11.1 t ha⁻¹, depending on location within the study perimeter. This marked spatial heterogeneity can be attributed to local differences in soil physicochemical properties, soil water availability, and the variable effectiveness of subsoiling operations across the site. Nevertheless, the yields obtained in this study are substantially higher than the regional average of 0.77 t ha⁻¹ reported for smallholder farmers in 2023 according to FAOSTAT (<https://www.fao.org/faostat/fr/#data>, accessed 10 February 2025), highlighting the strong positive impact of subsoiling combined with amendments using termite mound materials.

Numerous studies support the beneficial effects of subsoiling on maize productivity, including those reported by Ramadhan and Alfari (2023) in Iraq, as well as Wang et al. (2024a), and Li et al., (2024a) in China. In addition, several studies have demonstrated the agronomic advantages of termite mound soil amendments, owing to their enriching chemical composition and contribution to improved soil fertility (de Lima et al., 2018; Enagbonma & Babalola, 2019; Eze et al., 2019; Jouquet et al., 2015; Kaschuk et al., 2006; Mujinya et al., 2013; Padonou et al., 2020; Rajeev & Sanjeev, 2011), thereby contributing to increased crop yields.

During the first growing season, however, blocks B8 and B10 exhibited consistently lower yields, likely due to persistent soil limitations, including shallow effective soil depth, residual compaction, and reduced nutrient retention capacity, despite the applied amendments. According to WRB-IUSS (2015), the limited thickness of Plinthosols restricts both water percolation and root penetration, thereby constraining crop productivity. In contrast, low-lying areas near the river consistently recorded higher yields, probably due to improved water availability and higher organic matter inputs, which tend to increase closer to riparian zones. Several studies have emphasized that soils enriched in organic matter optimize crop yields by improving nutrient supply and soil structure (Obalum et al., 2017; Paul, 2016; Sanchez, 2018; Voltr et al., 2021). Moreover, Pessoa et al. (2024) showed that adequate soil water availability enhances crop growth, nutrient uptake, resistance to water stress, and ultimately overall agricultural productivity.

During the second growing season, yields exhibited a generalized increase across the study area, with an average gain of approximately 1 t ha⁻¹. This improvement can be attributed to the cumulative and delayed effects of subsoiling and soil amendments, which begin to manifest more clearly over time, even in previously low-yielding zones such as parts of blocks B8 and B10. Although the magnitude of the increase remains moderate, this trend underscores the importance of long-term soil

management strategies for progressively enhancing yield potential in initially constrained plinthitic environments. Supporting this interpretation, Wildemeersch et al. (2015) reported a significant long-term increase in millet yields in Nigeria, reaching $0.7 \pm 0.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ on marginal Plinthosols following the implementation of soil and water conservation practices.

4.6.6. Optimization of grain maize yield: regression models and analysis

Correlation analyses revealed a positive association between maize grain yield and soil pH, calcium (Ca), and total organic carbon (TOC), confirming the central role of soil acidity neutralization and improved nutrient availability in sustaining productivity in tropical agroecosystems (Sanchez, 2018). In contrast, elevated copper (Cu) concentrations, particularly during the first growing season, were negatively associated with yield, which is consistent with the phytotoxic effects of Cu in metal-enriched soils Mubemba et al., 2017; Yruela, 2009). These relationships were further corroborated by principal component analysis (PCA). The first axis (PC1, explaining 27.6% of the total variance) represents an edaphic fertility gradient dominated by pH, Ca, and TOC, along which maize yields from both seasons (Rdt1 and Rdt2) were positively aligned, whereas Cu was oriented in the opposite direction, indicating its limiting effect on crop production. The second axis (PC2, 23.6% of the variance), contrasting Mn–K–P–Mg–depth with Fe–Al, accounted for a smaller proportion of yield variability. Nevertheless, second season yield (Rdt2) exhibited a negative association with Mn, highlighting the potentially restrictive role of excessive Mn on the uptake of other essential cations (Lahori et al., 2024; Sanchez, 2018; Xu et al., 2024).

These multivariate relationships were confirmed and quantitatively refined by stepwise linear regression models, which emphasized the dominant influence of specific edaphic parameters on yield variability. During the first growing season, the regression model showed a statistically significant effect ($p = 0.03$), with soil pH measured in KCl and iron (Fe) identified as key explanatory variables. Standardized beta coefficients indicated a negative association between Fe and grain maize yield. This relationship can be explained by the acidifying effect of iron oxides (Fe_2O_3), which enhance soil acidity and may impair crop growth (Sanchez, 2018). Moreover, at high concentrations, Fe can reduce phosphorus availability by forming insoluble compounds such as iron phosphate (FePO_4) (Agbenin, 2003; Barrow et al., 2018; de Campos et al., 2018; Rosolem et al., 2024). Consequently, high total P contents do not necessarily translate into plant-available P, thereby limiting nutrient uptake and crop performance. In addition, excessive iron may induce nutritional imbalances and toxic effects, further constraining yield potential (da Silva et al., 2024; Han et al., 2024; Tsamos et al., 2024). Conversely, an increase in pH KCl was positively associated with grain yield, indicating that reducing soil acidity enhances nutrient availability and crop physiological performance (Sanchez, 2018; WRB-IUSS, 2007)

During the second growing season, the regression model remained statistically significant ($p = 0.01$) and identified calcium (Ca) and copper (Cu) as the main

determinants of grain maize yield. Elevated Cu concentrations were again associated with yield reductions. Although Cu is an essential micronutrient at low concentrations, excessive levels can become toxic, inhibiting root development and disrupting plant nutrition. In the Lubumbashi region, Mpundu et al. (2013) reported stunted growth and high Cu bioaccumulation in vegetable crops, confirming the agronomic risks associated with Cu enrichment.

In contrast, higher Ca concentrations were positively correlated with yield, reflecting the beneficial role of Ca in improving soil structure, enhancing aeration and permeability, and facilitating nutrient uptake by plant roots (Bakker, 2018; Meriño-Gergichevich et al., 2010; Mubemba et al., 2014; Mujinya et al., 2013; Olego et al., 2021). For instance, Anikwe et al. (2016) reported cassava yields of 9.5 Mg ha⁻¹ on limestone-amended plots, compared to 6.1 Mg ha⁻¹ on untreated Ultisols in Nigeria, illustrating the agronomic benefits of Ca-based amendments.

Regression models based on field-measured grain maize yields further highlighted season-dependent controls on productivity. During the first season, soil pH, Mn, Cu, and Ca were identified as significant predictors ($p = 0.02$). Standardized beta coefficients showed that high Mn and Cu concentrations were negatively associated with yield, likely due to nutrient antagonisms and toxicity effects. Excess Mn can disrupt soil nutrient balance by inhibiting the uptake of other essential cations such as Ca and K (Sanchez, 2018), while excessive Cu is known to damage root systems and impair plant metabolism (Mubemba et al., 2017; Yruela, 2009).

In contrast, increasing soil pH and Ca levels exerted a strong positive influence on yield, with increases of 0.334 and 0.332 standard deviations, respectively. This finding underscores the critical importance of acidity management for optimizing nutrient availability, as emphasized by Sanchez (2018) and WRB-IUSS (2015), who reported that optimal pH conditions enhance the uptake of essential nutrients.

During the second season, soil pH, Mn, and TOC emerged as the main controlling factors ($p = 0.03$). The negative effect of Mn on yield again supports the hypothesis that excessive Mn concentrations induce nutritional imbalances (Lahori et al., 2024; Woś et al., 2024; Xu et al., 2024). Conversely, higher soil pH and organic carbon contents positively affected yield, consistent with numerous studies demonstrating that soil organic matter improves water retention, nutrient storage, and overall soil resilience, thereby enhancing crop growth (Garcia et al., 2024; Malik et al., 2024; Naeem et al., 2024; Obalum et al., 2017; Paul, 2016; Voltr et al., 2021; Zhang et al., 2024).

Although all regression models exhibited coefficients of determination exceeding 50%, clear differences emerged depending on the source of yield data. Models based on pixel values extracted from yield maps showed lower R² values, likely due to the interpolated nature of these data, which may not fully capture fine-scale spatial variability. In contrast, models calibrated with field-measured yields achieved higher R² values, indicating greater predictive accuracy and robustness. This observation aligns with Akinwande et al. (2015), who emphasized the importance of high-quality input data and rigorous validation procedures. To further enhance model performance,

the integration of additional environmental and management variables (e.g., microtopography, soil moisture dynamics, and historical management practices) remains a relevant perspective.

4.7. Conclusion

This study demonstrates the significant and combined effects of mechanical subsoiling and termite mound material amendments on the fertility of Plinthosols and grain maize productivity in the Lubumbashi region. The results show that areas requiring secondary subsoiling, where soil thickness remains below 9 cm, present persistent physical constraints to crop growth, whereas blocks exhibiting soil thicknesses greater than 73 cm offer substantially higher potential for agricultural production by increasing the effective rooting volume.

The analysis of soil physicochemical properties revealed marked spatial variability in soil pH, total organic carbon (TOC), and essential nutrients, including phosphorus, calcium, potassium, and magnesium. In contrast, high concentrations of aluminium, iron, and copper were observed, displaying heterogeneous spatial distributions, with copper showing a relatively uniform background pattern consistent with the regional geochemical context. From a hydrodynamic perspective, soils exhibited low saturated hydraulic conductivity at depth, reflecting restricted vertical water movement imposed by plinthite, whereas surface water retention was improved, indicating enhanced porosity and increased plant-available water following amendment incorporation.

Grain maize yields showed strong spatial heterogeneity, ranging from less than 2.3 to more than 11.1 t ha⁻¹, with a notable increase in mean yield from 7.1 to 8.2 t ha⁻¹ between the first and second growing seasons. Stepwise regression models based on pixel values extracted from yield maps indicated that high iron and copper concentrations negatively affect yield, while higher soil pH and calcium availability exert a positive influence. In parallel, regression models based on field-measured yields, which proved to be more robust and reliable, confirmed that soil pH, calcium, and total organic carbon are the main positive determinants of maize yield, whereas excessive concentrations of copper, iron, and manganese are associated with yield reductions, likely due to nutritional imbalances and indirect effects on soil acidity. Although all models exhibited coefficients of determination (R^2) exceeding 0.50, field-based models provided greater explanatory power than map-derived pixel-based models.

Overall, these findings emphasize that improving soil chemical fertility through pH regulation, calcium enrichment, and organic matter enhancement is central to increasing maize productivity and ensuring the sustainable management of Plinthosols. The combined use of targeted subsoiling and locally available termite mound materials emerges as a promising and context-adapted strategy for overcoming the physical and chemical constraints of plinthitic soils in the southern Democratic Republic of the Congo and similar tropical environments.

However, the lack of prior chemical and mineralogical characterization of termite mound materials limits the precise assessment of their specific contribution to the observed improvements in soil properties and maize yield; future studies incorporating such characterization would allow a more accurate quantification of their effects.

Chapitre 5

Restoring Functional Soil Depth in Plinthosols: Effects of Subsoiling and Termite Mound Amendments on Maize Yield*

*Ce chapitre est adapté à

Mukalay, J. B., Meersmans, J., Wellens, J., Sikuzani, Y. U., Lenge, E. K. M., & Colinet, G. (2026). Restoring Functional Soil Depth in Plinthosols: Effects of Subsoiling and Termite Mound Amendments on Maize Yield. *Environments*, 13(1), 52. <https://doi.org/10.3390/environments13010052>.

5.1. Avant-propos

Les résultats du chapitre 4 ont mis en évidence une forte hétérogénéité spatiale des propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des horizons superficiels, ainsi qu'une variabilité marquée des rendements du maïs à l'échelle du périmètre étudié. Ces observations confirment que, dans les plinthosols, les contraintes à la productivité ne peuvent être expliquées uniquement par les propriétés de surface, mais qu'elles sont étroitement liées à l'organisation verticale du profil et à la profondeur réellement accessible au système racinaire.

Dans les sols à plinthite, la profondeur morphologique du sol ne correspond pas nécessairement à la profondeur fonctionnelle effectivement exploitée par les racines. L'action du sous-solage, lorsqu'elle est effective, permet de lever partiellement les contraintes mécaniques associées à la présence discontinue de la plinthite et d'étendre le volume de sol exploré par le système racinaire au-delà des horizons superficiels. Toutefois, cette profondeur fonctionnelle demeure spatialement hétérogène et dépend à la fois de la géométrie de la plinthite et de la réponse chimique et physique du profil après intervention.

Dans cette étude, la profondeur fonctionnellement exploitable du sol est définie en référence à la profondeur de travail atteinte par la sous-soleuse dans les zones où la rupture de la discontinuité plinthitique a été effective. Cette profondeur, de l'ordre de 40 cm, correspond à une profondeur cible rendue accessible au système racinaire de manière variable selon la géométrie de la plinthite et l'efficacité locale de l'intervention mécanique.

Ce chapitre s'attache ainsi à analyser le rôle central de cette profondeur fonctionnellement exploitable (0–40 cm), atteinte dans les secteurs où la plinthite est discontinue, dans la productivité du maïs sur les plinthosols restaurés. Il vise à relier cette profondeur cible à la distribution verticale des propriétés du sol, aux processus de régulation acido-basique, de complexation de l'aluminium par la matière organique et de contrôle de la disponibilité du phosphore, ainsi qu'aux rendements observés. L'objectif est d'identifier les principaux facteurs pédologiques contrôlant la variabilité du rendement dans la zone du profil effectivement exploitable par le système racinaire.

En se focalisant sur la zone du profil réellement restaurée, ce chapitre propose une lecture fonctionnelle intégrée du système sol–plante, permettant de dépasser une approche strictement superficielle et de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de la forte variabilité spatiale des rendements observés.

5.2. Abstract

Soil degradation and limited root-exploitable depth restrict maize productivity in Plinthosols of tropical regions. However, the combined effects of subsoiling and amendments derived from termite mound materials on soil functionality and yield remain insufficiently quantified. This study examines how variations in a functionally exploitable rooting depth, within a management system combining subsoiling and

termite mound amendments, are associated with soil physicochemical properties and spatial variability of maize (*Zea mays* L.) grain yield in the Lubumbashi region of the Democratic Republic of the Congo. Spatial soil sampling and correlation analyses were used to identify the dominant pedological factors controlling yield variability.

The results indicate a reduced vertical stratification of most nutrients within the explored depth, reflecting a more homogeneous distribution of soil properties within the managed profile, although direct causal attribution to specific practices cannot be established in the absence of untreated control plots. Improved rooting conditions were reflected by high and spatially variable productivity (2.3 to 11.1 t ha⁻¹ across blocks), accompanied by a moderate average gain between seasons (< 1 t ha⁻¹), while extractable manganese emerged as a consistent negative predictor of yield. These patterns are consistent with a larger functionally exploitable rooting depth and an improved soil environment, although causal contributions of subsoiling and termite mound amendments cannot be isolated in the absence of control plots. Overall, the results highlight the importance of jointly considering structural and chemical soil properties when interpreting productivity gradients in Plinthosols and designing sustainable management strategies for degraded tropical soils.

Keywords: Plinthosols, maize (*Zea mays* L.), Spline with Barriers, subsoiling, termite mound materials, Lubumbashi.

5.3. Introduction

Agricultural productivity in tropical regions is closely dependent on the physicochemical quality of soils, which controls water availability, nutrient availability, and plant rooting conditions (Elsheikh et al., 2013; Muyumba et al., 2015; Sanchez, 2018; Sanchez et al., 2003). In the Lubumbashi region, in the southeast of the Democratic Republic of Congo, the dominant soils are ferralitic soils with low intrinsic fertility and the occurrence of plinthite, characterized by a compact structure, low organic matter content, and high acidity, limiting the availability of essential nutrients (Alexandre, 2002; Kasongo, 2008; Ngongo et al., 2009). The frequent presence of plinthite at shallow depths exacerbates these constraints, hindering root growth and limiting the productivity of maize (*Zea mays* L.), the main food crop and basis of regional food security (Ilunga et al., 2015; Nyembo et al., 2018; Tabu et al., 2024; Tabu et al., 2023b).

Faced with these limitations, innovative soil management approaches have been tested to restore fertility and improve the structure of plinthosols. Among these, amendments with giant termite mound materials and mechanical subsoiling appear to be two promising practices capable of correcting the physical and chemical constraints that limit agricultural production (Adhikary et al., 2016; Mujinya et al.,

2014; Nafi et al., 2020). Termite mound materials, rich in clay and basic cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), contribute to acidity neutralization and improved cation exchange capacity (Apori et al., 2020; Chen et al., 2023; Kpangba et al., 2020; Santhoshkumar et al., 2024). At the same time, subsoiling breaks up hardened horizons, improves porosity, macropore continuity, and drainage, thereby promoting deeper and more uniform root penetration (Al-Irhayim et al., 2025; Ishaq et al., 2001; Jiao et al., 2023; Jin et al., 2007; Liu et al., 2024a; Ning et al., 2022; Singh et al., 2019).

Subsoiling and amendments derived from termite mound materials have been reported to improve rooting conditions and nutrient distribution in compacted tropical soils, although their effects may vary depending on soil type, depth, and management history (Adhikary et al., 2016; Sun et al., 2023). The combined action of these two practices results in improved water and nutrient availability, promoting more vigorous vegetative growth and increased yields, particularly for maize, a crop that is highly dependent on a large volume of exploitable soil and a functional root system (Cote & Dupuis, 1980; Liu et al., 2025a; Wang et al., 2024a; Wei et al., 2025; Xie et al., 2024). However, in plinthosols, the effectiveness of these practices is closely linked to the depth actually accessible to roots, which is strongly controlled by the position and thickness of the plinthite (Santos et al., 2023).

To date, studies conducted in the Lubumbashi region have mainly focused on the effect of termite mound materials applied to the surface, without explicitly integrating the role of subsoiling or the spatial variability of the usable depth related to the plinthitic crust (Adhikary et al., 2016; Mujinya et al., 2010; Ou et al., 2025). This gap limits our understanding of how the root zone actually functions in these challenging soils and highlights the need for an integrated approach, combining chemical improvement and physical restructuring of the profile.

Recent studies in compacted tropical and subtropical soils have shown that deep tillage and subsoiling can reduce bulk density in the 20–40 cm layer, improve porosity and rooting depth, and increase maize yield by 10–30% under field conditions (Asenso et al., 2022; Cai et al., 2014; Feng et al., 2018; Hamza & Anderson, 2005). In parallel, termite mound materials are increasingly recognized as biogenic amendments that enrich soils with fine clays, base cations, and organo-mineral complexes, improving cation exchange capacity, water retention, and microbial functioning (Abe et al., 2011; Chen et al., 2023; Duponnois et al., 2005; Jouquet et al., 2004, 2015, 2016; Wang et al., 2022). However, these approaches have largely been evaluated separately and rarely within plinthosols, where plinthite strongly constrains rooting depth. To our knowledge, no study has examined how restoring a functionally exploitable depth in plinthosols through the combined effects of subsoiling and termite mound amendments reshapes soil functioning and controls spatial variability in maize yield. This gap motivates the present study.

In this context, the 0–40 cm depth was selected as the zone that is effectively made physically and chemically exploitable in this plinthosol following deep mechanical intervention. Although this interval does not correspond to a single homogeneous pedo-genetic horizon, it represents a functionally relevant depth that delimits the volume of soil actually accessible to maize roots once compaction is reduced. This choice is consistent with previous studies showing that, when mechanical constraints are alleviated, maize can effectively explore soil volumes down to approximately 40 cm or more, thereby benefiting from increased access to water and nutrients (Ji et al., 2013; Sciarresi et al., 2024; Wang et al., 2022). The surface horizon (0–10 cm), was analyzed in parallel as a comparative reference. However, its results are presented separately in the supplementary material, as the central objective of this study is to interpret soil–yield relationships within the mechanically loosened rooting zone where functional changes are most pronounced.

This study has the principal objective of determining how restoring a functionally exploitable rooting depth through subsoiling combined with amendments from termite mound materials modifies the physicochemical properties of Plinthosols and explains the spatial variability of maize grain yield in the Lubumbashi region. The central hypothesis is that alleviating mechanical constraints, together with chemical enrichment of the soil, enhances the functional root zone and leads to a measurable increase in maize productivity. More specifically, this study seeks to: (1) characterize the spatial variability of soil physicochemical properties within the functionally restored 0–40 cm layer; (2) identify the dominant pedological factors structuring edaphic variability under conditions of improved exploitable depth; (3) quantify the relative contribution of these properties to maize yield variability across blocks; and (4) determine the most decisive soil factors for productivity in order to optimize the integrated management of Plinthosols in tropical agricultural systems. These objectives translate into the following research questions: (i) To what extent does restoring a functionally exploitable depth improve maize yield in Plinthosols? (ii) Which soil physicochemical properties best predict yield variability once mechanical constraints are alleviated? (iii) Do structural and chemical improvements interact over time to enhance maize productivity?

5.4. Materials and Methods

5.4.1. Study Sites

The study was conducted on the FarmCo agricultural site, located in the Lubumbashi region, Haut-Katanga province, Democratic Republic of Congo. The study area is located approximately 60 km east of Lubumbashi, along the national road leading to Kasenga, in the Kifumanshi River valley (Figure 5-1). The study area is located at an

elevation of approximately 1,245–1,300 m a.s.l. on gently undulating geomorphological surfaces (<5% slope), underlain by schists and quartzites of the Katangan Supergroup (Ngongo et al., 2009).

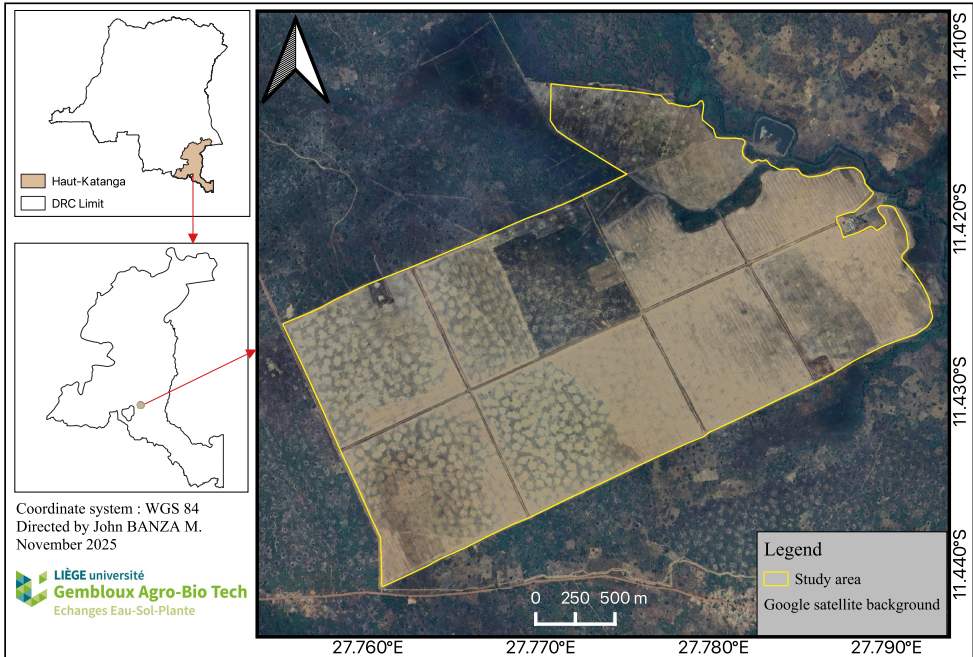


Figure 5-1 : Location of the study site, FarmCo farm in Lubumbashi in the province of Haut-Katanga.

This estate, with a total area of 660 ha, is one of the largest farms in the region, known for its industrial production of maize grain for local processing into flour for consumption. Its soil cover is mainly characterized by plinthosols sensu FAO, corresponding to plinthic ferralsols according to the WRB (WRB, 2022) classification. These soils are characterized by shallow depth, high compaction of the lower horizons, and, in the case of the Ferralsols, marked textural variability, limiting their suitability for cultivation without mechanical intervention or appropriate amendments. In order to improve productivity, the site underwent excavation of the lateritic benches, combined with deep subsoiling around the entire perimeter. Subsoiling was carried out using a five-shank ripper operating at a target depth of ≥ 40 cm, breaking up plinthite continuity and increasing the volume of soil effectively usable by the root system.

At the same time, materials from giant termite mounds, which are abundant on the site, were excavated and spread more or less evenly. This operation aimed to level the ground and make use of these materials as soil amendments, thanks to their richness in clay and basic cations (Figure 5-2). In this region, the average density of inactive

constructed by *Macrotermes falciger* termite mounds is estimated at around seven structures per hectare, each with an average in-dividual volume of around 256 m³ (Mujinya et al., 2014). The total theoretically mobilizable volume thus reaches nearly 1,800 m³ ha⁻¹.

Considering a uniform distribution of this material on the soil surface, this would correspond to an average thickness of approximately 18 ± 2.3 cm ha⁻¹, or the equivalent of approximately 2,000 t ha⁻¹, based on an estimated bulk density of 1.2 g cm⁻³ (Santhoshkumar et al., 2024). Although all experimental blocks received termite mound material, a larger amount was applied in areas where plinthite had been more extensively excavated, to ensure uniform leveling of the plot and to compensate for the volume of soil lost during subsoiling operations.



Figure 5-2 : A: Plinthite blocks extracted and deposited off-site after subsoiling; B: excavation of a termite mound used as a source of soil amendment material; C: Maize field in full growth after subsoiling and amendment with termite mound material (photo credit Banza M.J.).

From a climatic point of view, the region has a humid subtropical climate with dry winters (type C_{w6}) according to the Köppen classification (Assani, 1999). The rainfall pattern consists of a rainy season from November to March, a dry season from May to September, and two transition months (April and October). Average annual rainfall is estimated at 1,270 mm, while the average annual temperature is 20.1°C, with extremes ranging from 8°C in the cold season to 32°C in the hot season (Malaisse, 2011). Figure 5-3 below illustrates the meteorological dynamics observed during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. The variables analyzed show similar trends between the two seasons. The meteorological data series used comes from the NASA POWER satellite database (CERES/MERRA-2; <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, accessed on 10 February 2025). This source was chosen due to the absence of operational and continuously functioning weather stations in the study area, thus ensuring complete and consistent temporal coverage for the entire period under consideration.

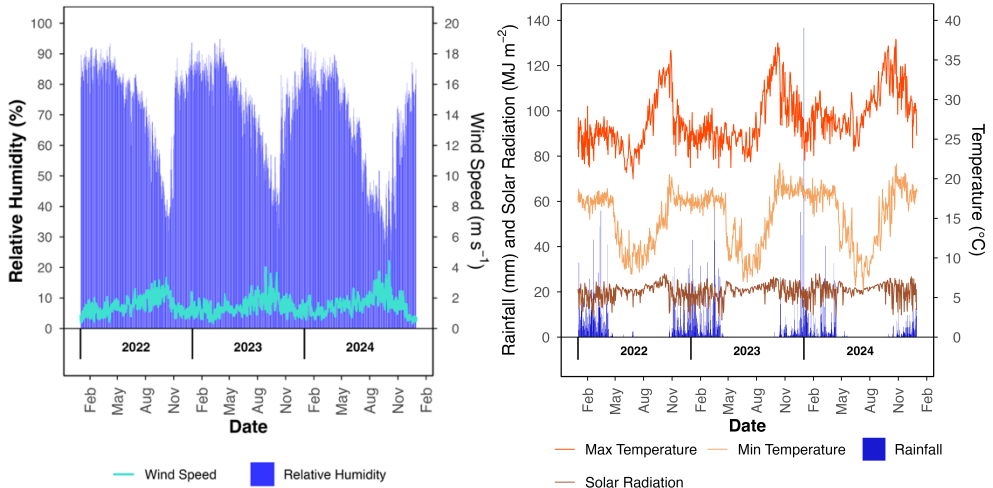


Figure 5-3 : Meteorological characteristics recorded at the study site during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons.

5.4.2. Sampling and laboratory analysis

Spatial sampling was carried out across the entire study area, covering approximately 660 ha, subdivided into ten experimental blocks (B1 to B10). In each block, five sampling points were positioned to ensure good spatial representativeness, with one point located approximately at the center of the block and four additional points distributed toward the corners, while maintaining a minimum distance of 200 m from the block boundaries to avoid edge effects (Figure 5-4). This approach corresponds to spatially structured sampling, designed to capture intra-block heterogeneity, rather than strictly random computer-generated sampling.

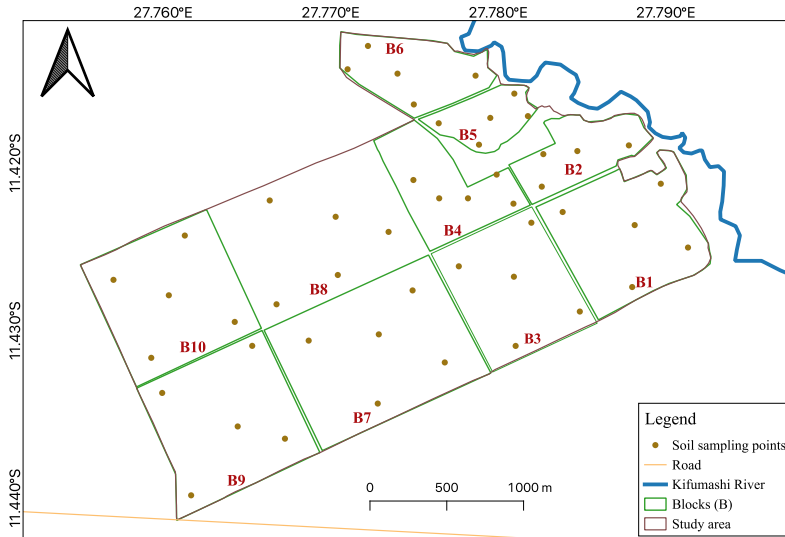


Figure 5-4 : Soil sampling plan for the site showing the ten experimental blocks (B1–B10) and the spatial distribution of sampling points within each block.

Samples were taken using a soil auger at two depths: 0–10 cm and 0–40 cm. The 0–10 cm layer corresponds to the surface horizon, which is directly influenced by farming practices and is of relatively constant thickness across the entire site. The 0–40 cm depth corresponds to the area that has been made physically and chemically exploitable in this plinthosol by subsoiling, as the subsoiler was used at a depth of at least 40 cm. It is therefore an appropriate functional depth for assessing the combined impact of subsoiling and amendment with termite mound material.

Although the subsoiler occasionally reached depths greater than 40 cm in blocks where plinthite was less resistant, the 40 cm depth represents the minimum threshold at which mechanical constraints were consistently alleviated across all sampling units. Above this depth, rooting conditions were effectively restored and nutrient redistribution occurred, whereas below it the plinthite layer remained limiting. Consequently, 40 cm provides a standardized analytical depth corresponding to the volume of soil that was reliably rendered exploitable for maize roots throughout the study area. A conceptual schematic illustrating this restored exploitable rooting depth and its relation to plinthite is presented in Figure 5-5.

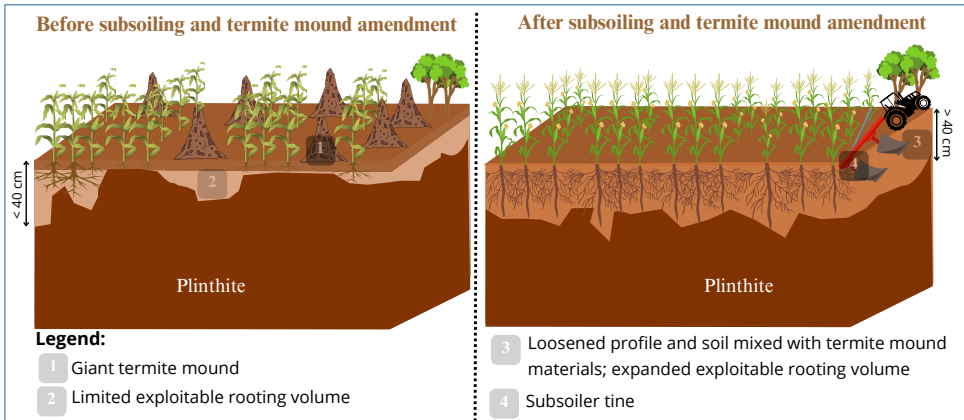


Figure 5-5 : Conceptual diagram illustrating changes in root-accessible volume before and after integrated subsoiling and amendment with termite mound materials in plinthosols of the Lubumbashi region.

In this study, the main analysis focused on the depth of 0–40 cm, considered to be the active root zone of the soil after intervention. The results for the 0–10 cm layer are presented in the supplementary material to support the interpretation of the processes of vertical redistribution and profile mixing. A total of 100 disturbed soil samples were collected (50 for each depth). The samples were air-dried for five days, sieved to 2 mm, and then conditioned for laboratory analysis.

Soil analyses were carried out at the soil chemistry laboratory of Gembloux Agro-Bio-Tech, Belgium. Soil pH was measured in water and in 1 N KCl following Van Reeuwijk (Van Reeuwijk, 2002). Total organic carbon (TOC) was determined using the Walkley and Black wet oxidation method (Walkley & Black, 1934), with a correction factor of 1.33 applied to account for incomplete oxidation. Soil organic matter (SOM) was estimated from TOC using a conversion factor of 2, as recommended by Pribyl (Pribyl, 2010).

Available macronutrients (Ca, Mg, K, P) and trace elements (Cu, Fe, Al, Mn) were extracted using the ammonium acetate–EDTA method at pH 4.65 according to Houba et al. (1988). Phosphorus was quantified colorimetrically, while cations and trace metals were measured using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). All analytical procedures followed internationally recognized standards and are well suited to ferrallitic and plinthic tropical soils, where ferric and aluminous phases require complexing extractants to ensure reliable quantification.

5.4.3. Yield determination

The grain maize yield was measured in a 1 m² plot repeated at least five times in each block, following the formula of Tandzi & Mutengwa (2020) (Yield; Equation (5-1)). This method is widely used in agricultural operations because it allows for a quick and accurate estimation of yields (Sapkota et al., 2016). During the first growing season (2022–2023), 41 observation plots were marked out across the entire site. The geographical coordinates of each plot were recorded using a Garmin 66R GPS (accuracy < 1 m), which made it possible to relocate and sample the same 41 locations during the second season (2023–2024), thereby ensuring full spatial comparability of yield measurements between seasons.

$$\text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)} = \left[\left(\text{number of rows of grain per ear} \times \frac{\text{number of ears per m}^2}{100} \right) \times \left(\text{Weight of 1000 grains (g)} - \frac{\text{grains (g)}}{10000} \right) \times 10000 \right] \quad (5-1)$$

During both growing seasons, maize (variety SC719) was cultivated over a full production cycle of approximately 210–215 days (late November to late June), based on sowing dates ranging from 22 November to 2 December and harvest dates from 22 to 30 June across blocks. The crop was sown at a spacing of 0.75 m × 0.25 m, corresponding to a density of 53,333 plants ha⁻¹. Cultivation practices were uniform across all blocks: mechanical soil preparation (plowing + harrowing), sowing, mineral fertilization, and pre-emergence herbicide application. A basic NPK fertilizer (10-20-10) was applied at sowing at a rate of 200 kg ha⁻¹, followed by urea 45 days after sowing (200 kg ha⁻¹).

Between the two growing seasons, all blocks were managed uniformly. After harvest, crop residues were left on the soil surface until the onset of field operations for the following season. Prior to sowing, residues were incorporated by plowing followed by harrowing, and no additional amendments or mechanical deep tillage were applied beyond the initial subsoiling operation. The soil surface remained bare during the dry season due to the absence of cover crops, which is standard practice in the region and reflects operational conditions on the site. This uniform management ensured that sea-seasonal differences in yield could not be attributed to contrasting inter-season soil treatments.

5.4.4. Spatial analysis of yield

In order to characterize the spatial variability of grain maize yield at the scale of the study area, a geostatistical analysis was performed using ArcGIS 10.8.1 (Johnston et al., 2001). Four main classes of interpolation approaches were considered. Kriging is a geostatistical method that predicts unsampled values using variogram-derived spatial autocorrelation. Inverse Distance Weighting (IDW) is a deterministic method in which estimated values are calculated as a distance-weighted average of nearby observations, giving more influence to closer points. Spline interpolation fits a

smooth surface through measured points by minimizing curvature, while its “Spline With Barriers” variant constrains surface fitting to respect spatial discontinuities such as block boundaries. In this study, “barriers” correspond to block boundaries digitized as spatial discontinuities. These boundaries constrain interpolation to respect historical and operational differences between blocks, preventing artificial smoothing across management units and preserving the spatial structure of yield variability. Natural Neighbor interpolation estimates values based on the proportionate area shared between Voronoi polygons of sampled and prediction locations, producing smooth transitions while avoiding overshooting and preserving local gradients (Johnston et al., 2001). Kriging was explored based on the analysis of semi-variograms, but no clear spatial dependency structure could be identified, justifying its exclusion (Figures C-1 and C-2). The Inverse Distance Weighted (IDW) and Spline were also evaluated, but generated significant visual artifacts, including "bull's eye" effects, reflecting unrealistic interpolation. Conversely, the Natural Neighbor and Spline With Barriers methods produced visually consistent interpolated surfaces that were better suited to the distribution of points.

To decide between the two models, automated cross-validation was performed in ModelBuilder, running 100 simulation iterations. At each iteration, 90% of the data was used for model calibration and the remaining 10% for validation, using a random resampling procedure. Predictive performance was evaluated using two complementary statistical indicators: (i) root mean square error (RMSE), which quantifies the average difference between observed and predicted values, with low values (ideally $< 1 \text{ t ha}^{-1}$ for yield) indicating better model accuracy (Smith & Smith, 2007); and (ii) bias, which measures the model's tendency to overestimate or underestimate the variable of interest, with a value close to zero indicating the absence of systematic bias and greater reliability of predictions (Harwell, 2018). The two metrics were calculated according to (RMSE; Equation (5-2)) and (Bias; Equation (5-3)):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)})^2} \quad (5-2)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs(i)} - P_{pred(i)}) \quad (5-3)$$

Where n is the total number of samples used in the validation procedure, $P_{obs(i)}$ is the value of the i -th observation in the validation dataset, and $P_{pred(i)}$ is the predicted value for the i -th observation.

The cross-validation results indicate that the Spline With Barriers method has the lowest RMSE values and a bias close to zero. This reflects greater prediction accuracy and a reduction in interpolation artifacts, particularly in areas where the spatial

continuity of the phenomenon is constrained. As a result, Spline With Barriers was selected as the optimal method for interpolating observed yields and generating the spatial maps used in this study (Figure C-3). After spatial interpolation of yields and generation of the associated maps, the soil sampling points were superimposed on the interpolated surfaces. This superimposition made it possible to extract, for each georeferenced point, the estimated yield value at the corresponding pixel. The measured soil data were then matched to the interpolated yields, ensuring a consistent spatial coupling between soil properties and observed production. This soil-yield matching served as the basis for subsequent statistical analyses, including correlation matrices and regression models.

5.4.5. Statistical analyses

First, an exploratory analysis of the data was performed to visualize the distribution of soil properties at a depth of 0–40 cm, corresponding to the area effectively made usable (physically and chemically) by subsoiling. Violin plots, superimposed on individual values, were used to illustrate distribution density, dispersion, and unit observations (Hintze & Nelson, 1998). For comparative and complementary purposes, the surface layer (0–10 cm) was also analyzed and presented in the supplementary material. This visual step made it possible to identify dominant trends, detect possible extreme values, and assess the vertical stratification of soils before undertaking inferential statistical analyses.

In order to compare soil properties between the two depths studied (0–10 cm and 0–40 cm), a one-way analysis of variance (ANOVA) was performed for each parameter. The normality of the residuals was verified using the Shapiro–Wilk test (Shapiro & Wilk, 1965). When the normality assumption was not met ($p < 0.05$), a nonparametric Wilcoxon–Mann–Whitney test was used as an alternative. The significance threshold was set at $p < 0.05$. The effect size (η^2 , eta-squared) was also calculated to assess the magnitude of the difference observed between depths. The η^2 values were interpreted according to the thresholds proposed by Tomczak & Tomczak (2014), namely: small effect ($\eta^2 < 0.06$), moderate effect ($0.06 \leq \eta^2 < 0.14$), and large effect ($\eta^2 \geq 0.14$). Comparative analyses between the 0–10 cm and 0–40 cm horizons (presented in supplementary material, Table S1) indicate that only total organic carbon content and available phosphorus differ significantly between the two depths ($p < 0.05$), with higher values at the surface. The other properties show no statistically significant differences, confirming the dominant role of parent material and subsoiling in the chemical structure of the 0–40 cm profile. These results support the choice of considering the 0–40 cm depth as the central functional zone for analyzing soil fertility and maize yield.

Given the high spatial heterogeneity observed for several soil properties, coefficients of variation (CV%) were calculated and added to the descriptive statistics presented in Table C-1. This additional metric complements the minimum, maximum, mean, and standard deviation values, and allows a clearer assessment of the relative dispersion of each soil variable in this heterogeneous plinthic landscape. Potential extreme values in soil chemical properties were visually examined through violin plots and box-whisker distributions. No observations were removed, as all values were regarded as realistic within the natural pedological and geochemical variability of plinthosols in the Lubumbashi region, where localized enrichment in metallic elements is common. Instead of excluding these values, non-parametric tests were applied when normality was not met, limiting the influence of skewed distributions while preserving the empirical variability of the dataset.

Beyond the univariate analysis, a multivariate approach was employed to explore the relationships between soil properties and identify the dominant pedogenetic processes structuring the site's variability. This analysis was applied mainly to data measured at a depth of 0–40 cm. As a supplement, the same analysis was also performed on data from 0–10 cm. The data were standardized beforehand, and the distance matrix was constructed using the metric $1 - |r|$, where r represents Pearson's correlation coefficient. This metric was chosen because it allows variables with similar behaviors to be grouped, regardless of the sign of their correlation, which is particularly relevant in tropical soils where antagonistic interactions between certain elements can coexist. Hierarchical classification was then performed using the average linkage method, recognized for its robustness and stability in the analysis of multivariate environmental data (Reimann et al., 2008).

Next, to link soil characteristics to yield, and in order to ensure the statistical independence of observations and avoid pseudo-replication, maize yield was considered as a single value per block. Thus, for each block, the average of the yields obtained during the two growing seasons was calculated and used as the response variable in the analyses. This choice reduces the influence of seasonal fluctuations related to climatic or operational conditions and represents a yield that integrates the structural productive potential of the block rather than a cyclical effect. This average value was then used as the dependent variable for correlation analysis and multiple linear regression modeling.

On this basis, a correlation analysis and multiple linear regression modeling with stepwise selection were performed to identify the soil properties explaining the variability in average yield between blocks. A Spearman correlation matrix was first used to detect variables with a significant relationship to yield. The overall model was then constructed using stepwise selection (forward and backward), guided by the Akaike information criterion (AIC), to select the most optimal model (Bedrick & Tsai,

1994; Smith & Smith, 2007; Venables & Ripley, 2002). Redundancy between variables was checked using the Variance Inflation Factor (VIF), with only those with a VIF < 3 being retained (Akinwande et al., 2015; O'Brien, 2007). The performance of the final model was evaluated using the coefficient of determination (R^2), the root mean square error (RMSE), and the significance of the coefficients ($p < 0.05$) (Smith & Smith, 2007).

The model predictors were constructed from soil properties measured at two functional depths: 0–10 cm, representing the surface horizon directly influenced by the termite mound amendment, and 0–40 cm, corresponding to the root zone actually exploited by maize after subsoiling. This dual approach allows for the integration of both the immediate effects of surface amendment and the physical and chemical conditions controlling root exploration at depth. The Depth 0–40cm variable represents the exploitable depth of the soil before the appearance of a limiting layer (plinthite, stones, hardening, or heavy compaction) after subsoiling. This approach allows for the integration of the vertical continuity of the profile, unlike the exclusive use of the surface.

As the model is calibrated only with data measured between 0 and 40 cm, it is applicable within this range of validity. Thus, any greater depth observed in the field (> 40 cm) is reduced to 40 cm, as no empirical information is available beyond this limit. This choice avoids extrapolation outside the domain, which is a source of bias in statistical models (Burnham & Anderson, 2004).

The yield prediction equation was expressed using unstandardized coefficients, while standardized beta coefficients and their 95% confidence intervals were used to compare the relative importance of the predictors (Nieminen, 2022). All statistical analyses and figure generation were performed in R (version 4.5.1), using the tidyverse, broom, ggplot2, and FactoMineR packages (version 2.11) (R Core Team, 2025).

5.5. Results

5.5.1. Distribution of soil physicochemical properties at 0–40 cm

Figure 5-6 shows the distribution of the main physicochemical properties of the soil at a depth of 0–40 cm. The results indicate a high spatial heterogeneity of most parameters, reflecting the variability of edaphic conditions within the study area, which is characteristic of plinthosols subject to marked morphological and water constraints.

The high Fe, Al, and Mn contents observed at this depth confirm the dominant influence of oxide-rich parent material, a signature of ferrallitization and plinthification processes. Conversely, available base cations such as Ca, Mg, and K, together with Cu, exhibit more widespread and spatially heterogeneous distributions within the 0–40 cm layer. These patterns indicate a stronger vertical variability in this functional zone compared with the surface horizon. Such distributions may be compatible with a partial vertical reorganization of elements within the profile; however, in the absence of control plots, no specific effect can be attributed to subsoiling or to the termite mound amendment. This heterogeneity suggests that the 0–40 cm layer functions as a chemically more contrasted rooting environment, which may influence nutrient accessibility for plants.

Detailed results for the surface layer (0–10 cm), a horizon directly influenced by farming practices and with a constant thickness, are presented in the supplementary material for comparison (Figure C-4).

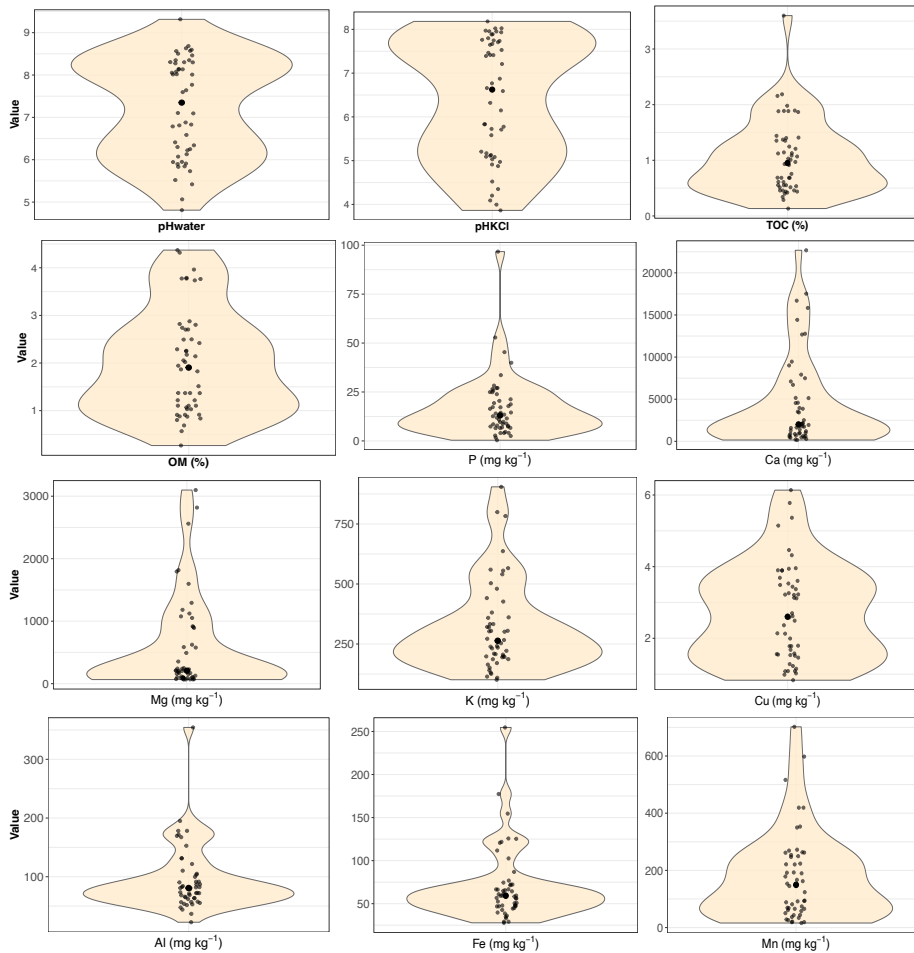


Figure 5-6 : Distribution of soil physicochemical properties at 0–40 cm after subsoiling and amendment with termite mound materials at the study site. Each point corresponds to an individual observation ($n = 50$), while the width of the violin represents the probability density of the values for each variable analyzed.

In addition to the graphical exploration, the descriptive statistics further confirm strong spatial variability across the profile (Table C-1). At 0–10 cm, total organic carbon (TOC) ranged from 0.4 to 2.3% (mean 1.4%), available P from 0.7 to 148.8 mg kg⁻¹ (mean 27.7 mg kg⁻¹), and extractable Mn from 8.6 to 567.9 mg kg⁻¹ (mean 183.3 mg kg⁻¹). Comparable variability was observed at 0–40 cm, where TOC ranged from 0.13 to 3.6% (mean 1.0%), available P from 0.35 to 96.7 mg kg⁻¹ (mean 17.1 mg kg⁻¹), and extractable Mn from 5.9 to 702 mg kg⁻¹ (mean 177.1 mg kg⁻¹). Comparisons between depths revealed significant vertical differentiation only for TOC and available P ($p < 0.05$), with higher values in the surface layer, whereas all other properties showed no significant differences according to one-way ANOVA or

Wilcoxon tests when normality was not met. Coefficients of variation (CV%) further confirmed high dispersion for several variables—particularly P, Mn, and Ca—indicating that spatial heterogeneity remains a dominant feature of these plinthic soils despite mechanical and chemical restoration efforts.

5.5.2. Relationships between soil properties and identification of dominant pedogenic processes

The results of the hierarchical classification applied to the properties measured in the 0–40 cm horizon show the coexistence of three major pedogenetic processes structuring the current functioning of the plinthosol after subsoiling and amendment with termite mound materials (Figure 5-7).

The first process groups available base cations (Ca, Mg, K), copper, and manganese together with soil pH, indicating a strong covariation among these variables. This pattern is consistent with the known role of basic cations in modulating soil acid–base status in highly weathered tropical soils. Although termite mound materials are typically enriched in Ca and Mg, the present observational design does not allow us to determine the extent to which their distribution results from the amendment, subsoiling, or pre-existing soil conditions. Nonetheless, the association between these cations and pH suggests a shared underlying pedochemical control influencing exchange complex saturation within the 0–40 cm layer. This process limits the excessive solubilization of manganese, a potentially toxic element in highly acidic conditions, and generally improves the chemical conditions in the rhizosphere. The presence of K and Cu within this group indicates that these nutrients exhibit similar spatial patterns to the base cations and pH. While termite mound materials are known to contain appreciable amounts of K and micronutrients, the observational nature of the study does not allow us to attribute their distribution specifically to the amendment or to subsoiling. Instead, their co-association suggests that these elements are governed by shared pedochemical factors influencing nutrient availability within the root-accessible layer.

The second process is mainly controlled by both total organic carbon (TOC) and organic matter (OM), which is closely associated with aluminum (Al). This grouping reflects a strong functional link between organic matter and aluminum dynamics in tropical acidic soils. Organic matter plays a key role in the complexation of Al^{3+} , reducing its mobility and toxicity to roots. This mechanism is an essential lever in improving the functional fertility of plinthosols, as it mitigates the harmful effects of aluminum toxicity while enhancing the soil's exchange capacity.

Finally, the third process closely links iron (Fe) and phosphorus (P). This association reflects the control of phosphorus availability by iron oxides and hydroxides, a process characteristic of highly altered ferralitic and plinthic soils. The strong

chemical affinity between P and Fe leads to phosphorus fixation, limiting its bioavailability to plants, despite measurable levels in the soil. This group thus reveals one of the major mechanisms constraining phosphate nutrition in these tropical systems.

Overall, the organization of variables in the dendrogram is not solely the result of statistical structuring, but reflects a coherent and hierarchical pedogenetic functioning at 0–40 cm. These results indicate that the soil properties measured within the 0–40 cm layer display a chemical and functional organization that is consistent with what would be expected in a less restrictive rooting environment. While the study design does not allow us to attribute this configuration specifically to subsoiling or to the addition of termite mound materials, the observed patterns suggest that the combined field interventions applied in this system are associated with a root zone that is less limiting for maize development.

The hierarchical classification at 0–10 cm (Figure C-5) shows a broadly similar chemical organization, but with a stronger influence of surface amendment and cultivation practices. This comparison confirms that the dominant pedogenetic processes identified at 0–40 cm are already initiated at the surface, while their full functional expression emerges within the mechanically restored rooting zone.

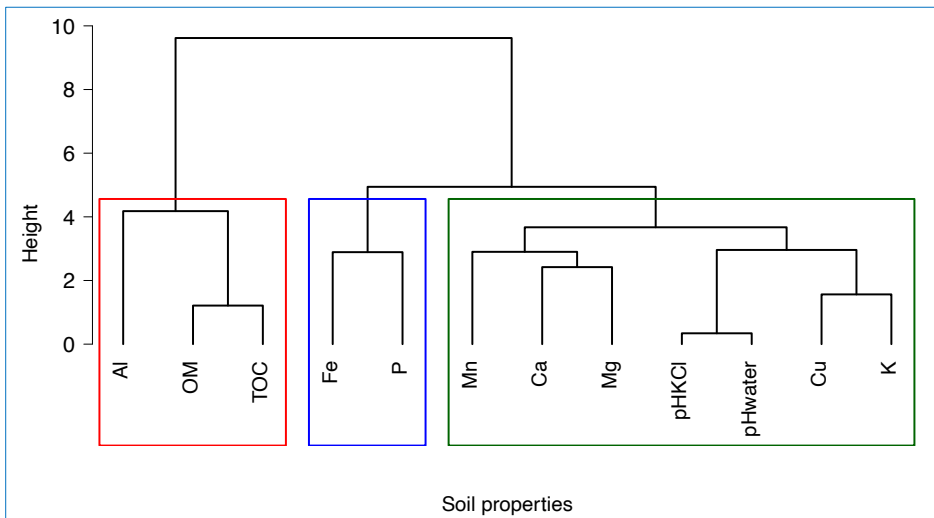


Figure 5-7 : Hierarchical classification of physicochemical properties at 0–40 cm. The dendrogram represents the hierarchical classification of soil properties measured at this depth. The distance matrix was calculated using metric $1-|r|$, based on Pearson’s correlation coefficient, and groupings were performed using the average linkage method. Colored rectangles indicate the main clusters of soil properties corresponding to dominant pedogenetic and functional processes discussed in the text.

5.5.3. Spatial variation in grain maize yield after subsoiling and spreading termite mound material:

Figure 5-8 illustrates the spatial distribution of grain maize yield across the entire study area for the two growing seasons (2022–2023 on the left, 2023–2024 on the right), after subsoiling and the addition of termite mound material. Yields vary greatly across the area, with values ranging from less than 2.3 t ha⁻¹ to more than 11.1 t ha⁻¹ depending on the zone. During the first season, distribution is heterogeneous: some blocks show low yields, while others achieve significantly higher levels, particularly in areas located in low-lying topographical positions near the river, where soil moisture is likely to be more favorable.

During the second season, there is a general improvement in yield in almost all blocks, with an average gain of about one ton per hectare. Blocks B8 and B10 continue to have lower yields overall, as in 2022–2023, but some sub-sectors within these blocks show considerable improvement. This trend suggests a cumulative effect of subsoiling and the addition of termite mound material, the impact of which increases as the amendments are incorporated into the soil profile.

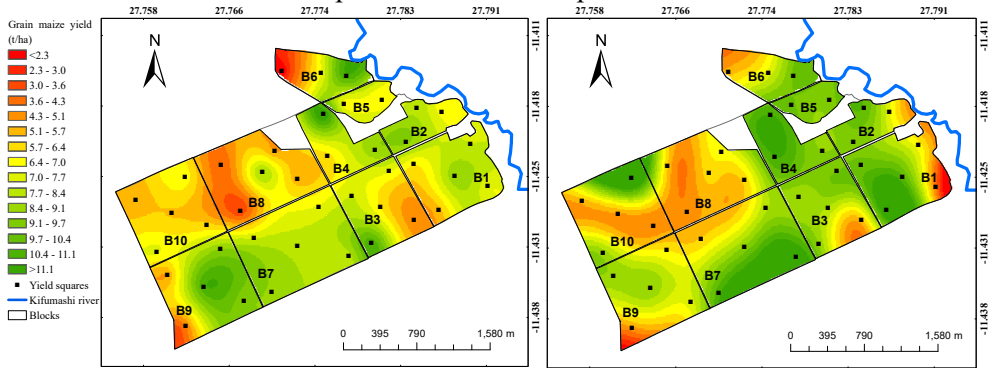


Figure 5-8 : Spatial distribution of grain maize yield after subsoiling and addition of termite mound material. Left: 2022–2023 growing season and right: 2023–2024 growing season. B = blocks (B1–B10).

5.5.4. Correlations between soil properties (0–40 cm) and average maize yield

The correlation heatmap summarizes the relationships between soil properties at 0–40 cm and mean maize yield following subsoiling combined with termite mound amendments (Figure 5-9). Yield shows weak to moderate positive correlations with pH ($r = 0.15$ for pH water; $r = 0.13$ for pH KCl), organic matter and total organic carbon ($r = 0.30$ and $r = 0.36$), as well as available P ($r = 0.15$) and base cations such as Ca and Mg ($r = 0.21$ and $r = 0.11$). Although these coefficients indicate limited

linear dependence, they consistently identify these parameters as the soil properties most positively associated with yield in the restored root zone.

Several strong internal correlations among soil properties are also evident. Extractable Cu shows a marked positive association with pH ($r = 0.80$ for pH water; $r = 0.78$ for pH KCl), while Mn displays a moderately positive association ($r = 0.66$ and $r = 0.65$). Organic matter and TOC are strongly negatively correlated with metals, particularly Cu ($r = -0.91$), Mn ($r = -0.75$), and Fe ($r = -0.47$), indicating clear internal structuring among the soil properties measured at this depth. A strong positive correlation is also observed between Ca and Mg ($r = 0.77$).

In contrast, correlations between yield and metals are negative, with Mn ($r = -0.49$) showing the strongest association, followed by Al ($r = -0.27$), Fe ($r = -0.18$), and Cu ($r = -0.14$). These patterns indicate that metallic elements remain among the soil properties most negatively associated with yield under the explored conditions. This indicates that yield variability in restored plinthosols primarily reflects the combined influence of reduced acidity, increased effective rooting depth, and partial mitigation of metal-related constraints. Correlation patterns observed in the 0–10 cm surface layer (Figure C-6) broadly mirror those found at 0–40 cm, but with consistently weaker coefficients, suggesting that surface chemistry alone does not fully explain yield variability and reinforcing the importance of the subsoiled layer as the effective root exploration zone

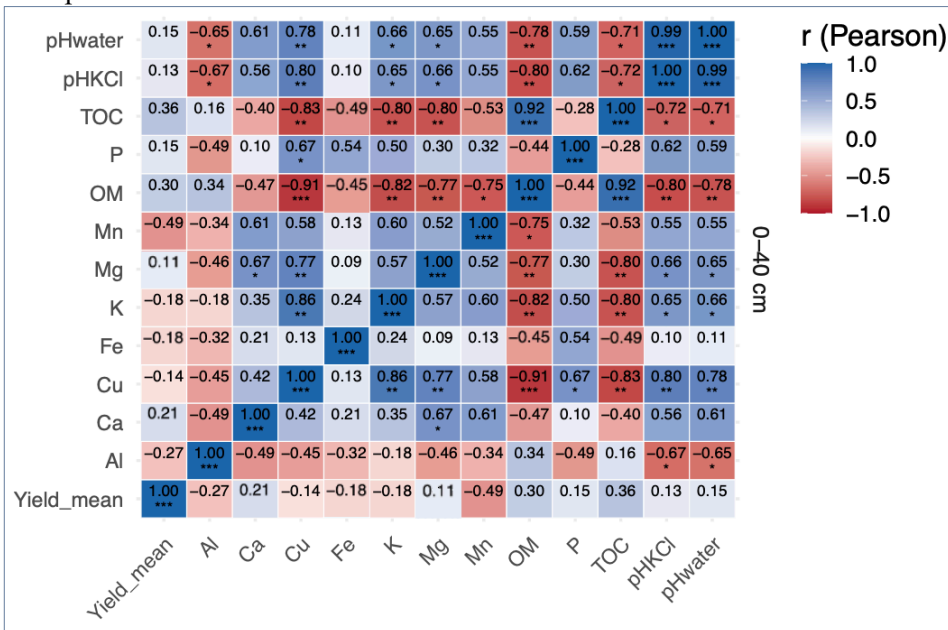


Figure 5-9 : Correlation matrix between mean maize yield (Yield_mean) and physicochemical properties at 0–40 cm. Each cell represents the Pearson correlation

coefficient (r), illustrated by a color gradient (blue = positive correlation, red = negative correlation, white = no relationship). Asterisks indicate the level of statistical significance: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

5.5.5. Maize yield modeling: multiple linear regression with stepwise selection

The stepwise model correctly predicts the observed maize yield, with an R^2 of 0.63 and an average error of 0.60 t ha^{-1} , confirming a satisfactory correspondence between measured and estimated values (Figure 5-10a). Based on the selected predictors (depth₀₋₄₀, pH (KCl), TOC, and Mn), the relationship between soil properties and maize yield can be expressed using the predictive Equation (Yield, Equation (5-4)):

$$\text{Yield (t ha}^{-1}\text{)} = -1.03 + 0.11 \text{ Depth}_{0-40} + 0.87 \text{ pHKCl} + 2.62 \text{ TOC} - 0.1 \text{ Mn} \quad (5-4)$$

Visualization of the standardized beta coefficients clearly shows the relative weight of each variable in the model (Figure 5-10b). Among the predictors selected, total organic carbon (TOC) has the strongest positive influence on yield, with the highest standardized beta coefficient in the model, indicating that it is the most influential positive predictor of yield. This means that an increase in total organic carbon is associated with a proportional increase in yield, all other things being equal. KCl pH also has a marked positive effect, indicating that lower soil acidity is associated with higher yields. The variable depth₀₋₄₀ cm, representing soil conditions up to a depth of 40 cm, also contributes positively to yield. This confirms that blocks with usable soil at greater depths have higher yields. In contrast, extractable manganese is the only predictor with a negative coefficient. Its beta value (-0.69) indicates that high Mn content is associated with a decrease in yield, suggesting that Mn can be a limiting factor when its concentration becomes excessive.

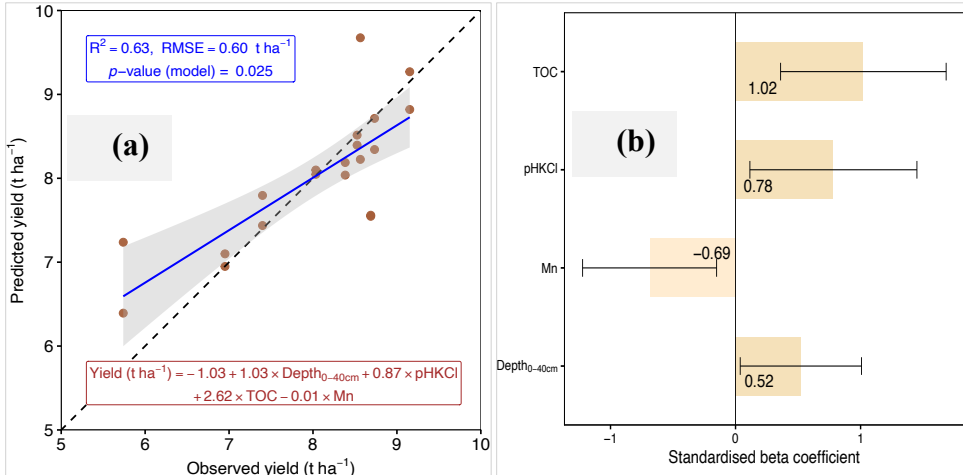


Figure 5-10 : Final regression model explaining average maize yield ($n = 20$). (a): relationship between observed and predicted average yield. (b): standardized beta coefficients of the selected variables, with their 95% confidence intervals. The 20 observations correspond to the 10 blocks for which the yield was obtained at two depths (0–10 cm and 0–40 cm). For each block, the yield used in the model is the average of the two growing seasons, ensuring the statistical independence of the data and avoiding any pseudo-replication.

5.6. Discussion

5.6.1. Distribution and functional significance of physicochemical properties at 0–40 cm

The distribution of soil physicochemical properties at a depth of 0–40 cm reflects significant spatial heterogeneity within the study area, reflecting the functional complexity characteristic of plinthosols subject to both morphological constraints (irregular presence of plinthite) and targeted anthropogenic interventions (subsoiling and amendment with termite mound materials). This depth corresponds to the zone that is effectively made physically and chemically exploitable by maize thanks to subsoiling (≥ 40 cm), making it a particularly relevant functional unit for interpreting the actual functioning of the profile and the edaphic processes influencing productivity. The relatively high concentrations of Fe, Al, and Mn observed at 0–40 cm suggest the expression of plinthite, which is characterized by high concentrations of Fe, Al, and Mn (Asiamah & Dwomo, 2010; Fritsch et al., 2007; Rotta et al., 2015; WRB, 2022). These redox-sensitive elements contribute to the stabilization of the mineral structure but also constitute potential chemical constraints, particularly through phosphorus fixation and aluminum or manganese toxicity under acidic conditions (Gotz et al., 2024; Laurent & Brossard, 1991; Sanchez,

2018; Tshibangu et al., 2022). Their variability at this depth suggests heterogeneity in the degree of weathering and water dynamics within the profile, closely linked to the spatial distribution of plinthite.

Conversely, available cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) and Cu display more widespread and heterogeneous distributions within the 0–40 cm layer. Such patterns suggest partial vertical redistribution of these elements, although the observational design of the study does not allow us to attribute these distributions specifically to subsoiling or to the addition of termite mound materials. Termite mound materials are known to be rich in fine clays, organo-mineral colloids, and basic cations, which can contribute to enriching the exchange complex and increasing cation exchange capacity (de Lima et al., 2018; Jouquet et al., 2015; Mujinya et al., 2013; Padonou et al., 2020). Likewise, subsoiling is reported in the literature to break compacted horizons and enhance macropore continuity, thereby favoring percolation, solution movement, and deeper root exploration (Alonso et al., 2023; Huang et al., 2024a; Šarauskiš et al., 2024; Wang et al., 2023a; Xie et al., 2024). The patterns observed here are consistent with these mechanisms described in tropical soils, where increasing the depth of soil effectively exploitable by roots is considered an agronomic lever as influential as chemical fertility enhancement (Elsheikh et al., 2013; Ngongo et al., 2009; Sanchez, 2018; Sanchez et al., 2003).

Thus, the variability observed at 0–40 cm reflects not only the pedogenetic heritage of the soil, but also the functional reconfiguration of the profile induced by the practices applied. This level then becomes a hybrid soil compartment, marked both by the geo-chemical signature of the parent plinthic material and by the secondary effects of soil amendment and deep tillage. This transformation largely explains why the exploitable depth appears as a structuring variable in subsequent analyses, particularly in the regression model explaining maize yield.

The results for the surface layer (0–10 cm), which is directly influenced by cultivation practices and has a more consistent thickness across the site, are presented in supplementary material (Figure C-1) for comparison. Their analysis confirms the vertical consistency of the profile's functioning while reinforcing the relevance of choosing the 0–40 cm depth as the central reference for the agronomic and pedological interpretation of this study.

A limitation of this study is the absence of untreated control plots and pre-intervention baseline measurements, which prevents direct causal attribution of the observed soil and yield patterns to the management practices. Consequently, our interpretation focuses on spatial variability and soil–yield associations within the mechanically loosened depth (0–40 cm), in line with mechanisms described in the literature for plinthic and ferrallitic soils. In addition, while this concentration-based approach allows for a detailed characterization of soil chemical dynamics, a more

comprehensive assessment of biogeochemical functioning could be obtained by calculating nutrient stocks. Such an approach, integrating the measured concentrations, bulk density, and actual usable depth at each point, would be a relevant way to better quantify the effective nutrient reserves in this highly spatially heterogeneous landscape and to refine long-term management recommendations for cultivated plinthosols.

Moreover, because no control plots without subsoiling and/or without termite mound amendment were available, the respective contributions of mechanical loosening and chemical enrichment cannot be disentangled. As a consequence, the observed variations in rooting depth, soil chemical properties and maize yield should be interpreted as as-sociations characterizing the soil conditions under the current management system, rather than as causal effects attributable to either practice individually or to their combined action. While the reduced stratification of nutrients and the progressive yield increase across seasons are consistent with the combined influence of subsoiling and termite-derived amendments, these trends cannot be conclusively assigned to one intervention independently. Therefore, our interpretation focuses on the agronomic consequences of restoring a mechanically and chemically exploitable rooting depth, acknowledging that the relative weight of each component remains unresolved in the absence of non-intervened controls.

Although available nutrients in this study were extracted using the ammonium acetate–EDTA (AAAc-EDTA) method at pH 4.65, which is widely applied in acidic tropical soils (Houba et al., 1988), it is important to acknowledge that the extraction efficiency and selectivity of this method can change as soil pH increases due to amendments. In particular, the incorporation of termite mound materials —rich in basic cations such as Ca, Mg, and K—can locally raise soil pH (Erens et al., 2015; Jouquet et al., 2015), reducing the extractability of some nutrients by AAAc-EDTA and affecting the relative responses of individual elements. Under these conditions, alternative extractants such as Mehlich-3 (Mehlich, 1984) or Olsen bicarbonate (Olsen et al., 1954) have been shown to provide more consistent estimates of plant-available phosphorus and cationic micronutrients across a broader pH range. Nonetheless, AAAc-EDTA was retained in the present study to maintain comparability with regional soil databases and because most samples remained within acidic to moderately acidic conditions. Future research should include comparative extractions (AAAc-EDTA vs. Mehlich-3/Olsen) to evaluate how changes in pH following termite mound amendment may influence the interpretation of nutrient availability and fertility status.

5.6.2. Organization of soil properties and dominant pedogenic processes

Analysis of the hierarchical classification carried out on the properties measured in the 0–40 cm horizon shows the existence of three major pedogenetic processes that structure the current functioning of the plinthosol after subsoiling and amendment with termite mound materials. The first process is dominated by available base cations (Ca, Mg, and K), associated trace metals (Cu and Mn), and soil acidity indicators (pH in water and KCl), reflecting an acid–base regulation process typical of tropical soils enriched in basic cations. This structure reflects direct control of the soil's acid-base status through the enrichment of basic cations linked to the incorporation of termite mound materials. These materials, known for their richness in fine clays and exchangeable bases, help to increase pH, improve cation exchange capacity, and rebalance the adsorbing complex in initially very acidic soils (Apori et al., 2020; Garba et al., 2011; Jouquet et al., 2015, 2016; Mujinya et al., 2013; Tilahun et al., 2021). The increase in Ca and Mg promotes gradual deacidification of the environment and limits the excessive solubility of Mn, an element that can become phytotoxic (Luo et al., 2025; Sajid et al., 2025; Wala et al., 2025) under the acidic conditions characteristic of unamended plinthosols. This close relationship between pH, available base cations, and Mn therefore reflects a chemical regulation process induced by the amendment, contributing to the creation of a soil environment that is less restrictive for root development. The presence of Cu and K in this process reinforces the hypothesis of direct enrichment of the root zone with essential nutrients, linked to bioturbation and the vertical redistribution of termite mound materials after subsoiling.

The second process is structured around organic matter, total organic carbon, and aluminum. This association reveals the central role of organic matter in regulating aluminum toxicity in acidic tropical soils (Sanchez, 2018). Organic matter can complex Al^{3+} through organo-metallic bonds, thereby reducing its mobility and availability in a form that is toxic to roots (Bell et al., 2024; Jansen et al., 2005; Li et al., 2022; Sanchez, 2018). This complexation helps to reduce chemical stress on the root system and improve conditions for water and nutrient absorption (Hernandez-Soriano & Jimenez-Lopez, 2012). In addition, the increase in organic matter, stimulated by the addition of termite mound material rich in stabilized organo-mineral compounds, improves the soil's buffering capacity, structure, and exchange capacity (Berggren & Mulder, 1995; Brauman, 2000; Chisanga et al., 2020). This process, therefore, plays a fundamental role in improving the functional fertility of plinthosols, helping to simultaneously reduce acidity and aluminum toxicity, two major constraints on maize yield in these tropical environments (Sanchez, 2018).

The third process closely links iron and phosphorus, confirming that P availability is controlled by the oxide phases of the subsoil (Laurent & Brossard, 1991). In plinthic

soils, Fe and Al oxides have a strong chemical affinity for P and can immobilize it through ligand exchange bonds (Gotz et al., 2024; Sanchez, 2018). This interaction explains why, despite the measurable presence of phosphorus in the soil, its availability to plants remains limited, thus constituting a persistent constraint on the phosphorus nutrition of maize. Subsoiling, although it does not directly alter the chemical affinity between Fe and P, does allow roots to explore a larger volume of soil, thereby increasing the likelihood of accessing areas where phosphorus can be locally mobilized. This process suggests that yield improvement is not solely dependent on increased nutrient concentrations, but also on an expansion of the functional soil volume accessible to the root system.

Thus, the organization of variables observed in the dendrogram is not a simple statistical result: it reflects a change in the pedogenetic status of the soil, which is evolving toward a less acidic state, better supplied with available base cations, less constrained by aluminum toxicity, and characterized by a deeper and more functional root zone. This evolution reflects a transition from plinthosol to an agro-pedological functioning more favorable to nutrient absorption and, consequently, to a sustainable increase in maize productivity. The results corresponding to the 0–10 cm depth, characterized by a more constant thickness but a more direct influence of surface cultivation practices, are presented in supplementary material (Figure C-2) for comparison and confirm the vertical consistency of the observed pedogenetic functioning.

However, the identification of these dominant pedogenetic processes suggests that spatial mapping of these mechanisms could be considered in future work. Such an approach would make it possible to better discriminate, at the plot level, between areas with high agronomic potential and those subject to major pedochemical constraints, in order to more finely target management and amendment practices for plinthosols.

5.6.3. Spatial variability in yield after subsoiling and amendment

The high spatial heterogeneity of observed yields (2.3 to 11.1 t ha⁻¹) reflects the strong spatial variability of soil conditions across the site. These patterns are consistent with the fact that subsoiling and termite mound amendments had been implemented operationally across the study area; however, in the absence of untreated control plots, the study cannot attribute this heterogeneity directly to either intervention. These values are significantly higher than the regional averages typically reported for maize in Haut-Katanga, where farmers obtain less than 1 t ha⁻¹ under traditional practices (Nyembo et al., 2018; Tabu et al., 2023b), and they also exceed the upper range generally achieved in improved systems relying primarily on fertilization, varietal improvement and genetic progress (\approx 1.5–8.5 t ha⁻¹; (Banza et al., 2019; Ilunga et al., 2019; Kimuni Luciens et al., 2012; Tabu et al., 2023b, 2024).

This suggests that restoring the exploitable rooting depth can unlock yield levels beyond those commonly reachable through nutrient enrichment alone. Thus, our findings reinforce previous work showing that increased rooting depth is a primary determinant of maize performance under compacted soils (Chen & Weil, 2011; Hamza & Anderson, 2005; Sciarresi et al., 2024; Sun et al., 2023; Zhou et al., 2019), while extending current knowledge by demonstrating that gains can surpass those obtained through fertilization alone when chemical and physical restoration act together.

No laboratory characterization of termite mound materials was performed in this study, as sampling occurred after their incorporation during operational field work. However, previous analyses conducted in the same region indicate that these materials are generally enriched in fine clays, Ca, Mg, K, Fe and exchangeable bases (Adhikary et al., 2016; Erens et al., 2015; Mujinya et al., 2010, 2013), supporting their potential to enhance soil chemical status. These findings align with reports showing that termite-derived amendments contribute to structural stabilization and gradual nutrient enrichment (Abe et al., 2011; Apori et al., 2020; Garba et al., 2011; Jouquet et al., 2004). Our results are consistent with the direction of chemical improvement reported in earlier studies. They further indicate that, within the studied system, higher yields are associated with soil conditions observed in areas where termite mound materials and subsoiling were jointly applied. However, in the absence of untreated control plots, these yield levels should be interpreted as spatial patterns emerging from the combined management context rather than as effects attributable to chemical enrichment alone or to any specific practice.

The highest yields correspond to blocks where exploitable rooting depth was more fully restored, enabling three-dimensional root exploration and greater access to sub-surface nutrients and water. In low-lying positions near the river, water availability likely amplified this effect by reducing drought stress during critical growth stages. This spatial behavior is consistent with studies showing that increased root depth enhances resilience under restrictive physical conditions (Feng et al., 2018; Grevers & De Jong, 1993; Wang et al., 2009), and that subsoiling improves macroporosity, water percolation and deep water recharge (Li et al., 2024a; Ramadhan & Alfaris, 2023; Šarauskiš et al., 2024; Wu et al., 2024) Thus, yield improvement arises not only from chemical fertility, but also from structural modification of the soil that fundamentally alters resource accessibility. Importantly, the maximum yields observed here ($>10 \text{ t ha}^{-1}$) exceed values commonly reported in Ferralsols without deep mechanical intervention (Boansi et al., 2024; Kasongo, 2008; Sikuzani et al., 2014), supporting the hypothesis that restoring exploitable depth may raise the physiological ceiling of maize productivity in these environments.

Similar functional constraints have been documented by Nikkel & Lima (2019), who demonstrated that plinthite ironstone concretions reduce gas exchange, vegetative growth, and phenological development in maize even when nutrients are sufficient. Although their study did not quantify grain yield directly, the observed reductions in plant height and biomass indicate that mechanical limitations to rooting can suppress crop performance independently of chemical fertility. In contrast, the high yields obtained in the present study—particularly where exploitable rooting depth was fully restored—suggest that subsoiling alleviated these growth constraints and enabled maize to realize a higher productive potential. This comparison reinforces the interpretation that physical restriction of rooting depth is a primary bottleneck for maize productivity in plinthic environments, and that depth restoration can unlock yield levels that are not attainable through nutrient enrichment or genetic progress alone.

The increase in yield observed from the first to the second season coincides with relatively comparable climatic conditions between seasons. This temporal pattern suggests that yield levels evolved within a stable climatic context and may reflect progressive changes in soil conditions across seasons. However, in the absence of untreated control plots, this inter-seasonal increase cannot be attributed to cumulative or delayed effects of subsoiling or termite mound amendments but should instead be interpreted as a temporal expression of the managed system as a whole (Brauman, 2000; Chen et al., 2023; Duponnois et al., 2005; Jouquet et al., 2002). Comparable time-lag effects have been observed in tropical soils amended with organo-mineral inputs (Boansi et al., 2024; Tshibangu et al., 2022) and our study extends this understanding to restored plinthic soils.

Beyond intrinsic plinthic heterogeneity, the strong yield variability among blocks likely reflects interactions between past management (legacy effects) and recent restoration. Previous studies show that historical differences in fertilization and tillage can persist and modulate crop responses even after intervention (Boansi et al., 2024; Sanchez, 2018; Suleymanov et al., 2022; Zingore et al., 2007). Our results confirm this persistence while extending current knowledge by demonstrating that such legacies condition the agronomic expression of restored rooting depth. Together, these findings indicate that sustained yield improvements in plinthic tropical soils require not only physical loosening and chemical amendment, but also progressive harmonization of management practices to reduce block-to-block disparities.

5.6.4. Influence of soil properties on maize yield variability

Correlation analysis between soil properties at 0-40 cm, the depth effectively made usable by the maize root system after subsoiling, highlights the main chemical and functional factors controlling productivity in plinthosols amended with termite mound

materials. Unlike a strictly superficial approach, this depth integrates both the mechanical effect of subsoiling on root volume and the chemical effect of the amendment on the functional fertility of the profile.

The positive correlations observed between maize yield, soil pH (water and KCl), and organic matter content (OM, TOC) confirm that reducing acidity and enriching carbon are essential levers for productivity in these highly constrained soils. In plinthosols, low pH is generally associated with increased solubility of aluminum and manganese, two elements that are phytotoxic to roots (Bell et al., 2024; Stoyanova et al., 2009a). The increase in pH observed within the 0–40 cm layer is associated with higher concentrations of Ca and Mg and coincides with improved chemical conditions in the rhizosphere. This pH environment is generally considered more favorable for root functioning and nutrient availability; however, in the absence of untreated control plots, this pattern cannot be causally attributed to the addition of termite mound materials or subsoiling alone.

The positive correlation observed between soil pH and extractable Cu in our dataset likely reflects the strong influence of organic matter and colloidal surfaces on Cu dynamics. Higher pH favors the formation of Cu–organic complexes and enhances adsorption onto reactive surfaces, which can maintain Cu in extractable but non-free ionic forms (Karlsson et al., 2006; Sanders, 2006; Yin et al., 2002). This mechanism may explain why extractable Cu does not decrease with increasing pH in our case, despite the commonly reported inverse relationship between pH and metal solubility in acidic tropical soils. However, because most studies have documented a reduction in Cu solubility with increasing pH in the absence of strong organic complexation, further targeted investigation would be required to disentangle the relative contributions of organic matter, pH buffering, and amendment-related inputs in this plinthosol system. Such work could clarify whether the observed trend is specific to the amendment strategy used here or reflects a broader pedochemical behavior of Cu in amended plinthic soils. In our dataset, soil pH (water / KCl) displays a strong positive association with extractable Cu ($r = 0.80 / 0.78$) and a moderately positive association with extractable Mn ($r = 0.66 / 0.65$), whereas no meaningful relationship is observed for Fe ($r = 0.10 / 0.11$). These contrasted responses are consistent with the element-specific mechanisms governing metal speciation in weathered tropical soils (Sanchez, 2018). The marked sensitivity of Cu and Mn to pH likely reflects enhanced sorption and organo-complexation at higher pH values, which maintain these elements in extractable, yet predominantly non-free ionic forms (Sanders, 2006; Stoyanova et al., 2009; Yruela, 2009). In contrast, Fe mobility remains largely controlled by redox-driven dissolution–precipitation cycles of Fe-(oxyhydr)oxides rather than by proton activity alone (da Silva et al., 2024). This differential behavior provides a mechanistic explanation for the persistence of Cu- and Mn-related yield

constraints despite partial acidity mitigation, while the weaker pH dependence of Fe helps account for its negligible statistical influence on yield variability in this system.

The positive correlation between yield and total organic carbon also highlights the structuring and functional role of organic matter in this system. Not only does it improve cation exchange capacity, but it also acts as a complexing agent for potentially toxic metals, reducing their mobility and bioavailability (Hernandez-Soriano & Jimenez-Lopez, 2012; Hou et al., 2019). The strong negative correlation between organic matter and certain elements such as Mn, Fe, and Cu shows that organic matter plays an essential buffering role in controlling metal toxicity within the root zone restructured by subsoiling, reflecting the role of organic matter in complexing and stabilizing these metals, reducing their bioavailability (Li et al., 2024b; Montiel-Rozas et al., 2016). Mujinya et al. (2010) add that the presence of organic matter can lead to the formation of complexes with metals such as aluminum and iron and contributes to the overall cation exchange capacity of the soil, which affects the retention of metal cations. Thus, at this depth, organic amendments act as fertility regulators and barriers against metal toxicity.

The positive, albeit moderate, correlations observed between yield and available base cations (Ca and Mg) confirm that these elements not only play a nutritional role but also contribute to acidity neutralization and aluminum desaturation of the exchange complex. In highly acidic soils, calcium and magnesium act as chemical antagonists to aluminum, reducing its fixation on exchange sites and limiting its absorption by roots (Bell et al., 2024). Their increased presence in the 0–40 cm zone is observed within the depth that is mechanically loosened and functionally accessible to the maize root system. However, in the absence of untreated control plots, this pattern cannot be attributed to the amendment, to subsoiling, or to their combined effect, and should be interpreted as a spatial association rather than a causal response.

Conversely, the negative correlations observed between yield and Al, Fe, Cu, and Mn confirm that, despite the restoration practices implemented, the mineralogical signature of plinthitic material remains a significant constraint in certain areas of the profile. These elements, which are abundant in ferrallitization and plinthification processes, can become phytotoxic when their concentration and solubility increase, particularly in microenvironments that are still highly acidic or poorly desaturated (Ngon Ngon et al., 2009; Soil Survey Staff, 2014; WRB, 2022).

A comparable pattern concerns aluminium. In this study, ammonium acetate–EDTA extractable Al concentrations range from 24.3 to 201.6 mg kg⁻¹ at 0–10 cm and from 26.5 to 225.4 mg kg⁻¹ at 0–40 cm, with respective means of 85.4 mg kg⁻¹ and 94.9 mg kg⁻¹ (Table C-1). Although extractable concentrations alone do not define a critical phytotoxicity threshold, the literature generally reports that phytotoxic effects in maize emerge when the exchangeable Al³⁺ fraction exceeds ~1–2 cmolc kg⁻¹ (≈ 90–

180 mg kg⁻¹), particularly under acidic conditions that sharply increase biologically active Al (Foy et al., 1978; Ryder et al., 2003). Although extractable soil Al concentrations alone cannot define a toxicity threshold, experimental work on maize indicates that phytotoxic effects emerge when root tissue Al reaches 13 mg kg⁻¹ (dw), corresponding to reduced root elongation and biomass (Lidon & Barreiro, 1998). In our case, soil pH values are predominantly near neutral, suggesting that most of the measured Al is likely complexed with organic matter or adsorbed onto Fe/Al oxides, thereby reducing its occurrence as free phytotoxic Al³⁺.

This interpretation is consistent with the moderate negative correlation observed between aluminium and yield at 0–40 cm ($r = -0.29$): aluminium remains an agronomic constraint, yet less influential than manganese ($r = -0.49$). This difference likely reflects the partial mitigation of Al toxicity following the increase in pH and organic matter as associated with the amendments, which reduces the proportion of exchangeable Al³⁺ and limits root growth inhibition. However, the occurrence of locally high concentrations combined with small-scale pH variability implies that episodes of aluminium toxicity cannot be entirely ruled out, particularly in microsites with low buffering capacity and low organic matter content. As with Mn, future work quantifying exchangeable or soluble Al would be required to determine the extent to which aluminium still contributes to soil constraints limiting maize productivity in this restored system.

Manganese shows a comparable behaviour but with a stronger agronomic influence. It exhibited strong spatial variability, ranging from 8.6 to 567.9 mg kg⁻¹ at 0–10 cm and 15.9 to 702.0 mg kg⁻¹ at 0–40 cm, with mean values of 183.3 mg kg⁻¹ and 177.1 mg kg⁻¹, respectively (Table C-1). These concentrations fall mostly within the range considered adequate to moderately high for maize (~30–250 mg kg⁻¹, (Foy et al., 1978; Stoyanova et al., 2009a)), but local “hotspots” clearly exceed commonly reported phytotoxic thresholds (~250–300 mg kg⁻¹). Such elevated values may induce toxicity under acidic or poorly buffered conditions that increase Mn solubility and plant uptake (Doncheva et al., 2009; Fageria, 2001).

While Mn extractability was determined using AAAC-EDTA, this extractant primarily reflects a potentially plant-available pool rather than the fraction that is actually taken up by roots or directly phytotoxic. In plinthic and highly weathered tropical soils, Mn solubility and plant uptake are strongly modulated by moisture- and redox-driven dynamics: reducing conditions during wet phases increase the availability of Mn²⁺ through the reduction of Mn oxides (Mn⁴⁺, Mn³⁺), whereas drying promotes re-oxidation and immobilization, limiting its availability to roots (Khoshru et al., 2023). Because such temporal fluctuations were not captured in this study—sampling was conducted at a single time point and no Mn concentrations were measured in plant tissues—the observed negative association between Mn and yield

should be interpreted as an indicator of potential Mn-related stress rather than direct confirmation of toxicity (Mundus et al., 2012). These redox-driven changes in Mn availability suggest that season-dependent solubility pulses may transiently increase Mn-related constraints in maize, beyond what can be inferred from single-time-point soil concentrations. Future work quantifying Mn speciation under contrasting moisture conditions, combined with Mn concentrations in plant tissues, would help determine whether reduced yield reflects direct toxicity, nutrient imbalance, or transient redox-driven pulses of Mn availability.

The significant negative correlation between Mn and yield ($r = -0.49$) therefore indicates that Mn already acts as an agronomic constraint in the mechanically loosened rooting zone (0–40 cm), despite average concentrations remaining close to sub-toxic levels. This suggests that subsoiling combined with termite-derived amendments reduced Mn solubility through partial acidity mitigation but did not fully eliminate Mn-related stress. Future research quantifying Mn speciation under contrasting moisture conditions, together with Mn concentrations in plant tissues, would more clearly discriminate between direct toxicity and nutrient-interaction effects. Work by Ji et al. (2013) has shown that when mechanical constraints are removed by deep subsoiling, the maize root system can extend its exploration to approximately 35–40 cm, thereby significantly increasing the volume of soil explored for water and nutrients. This restored functional depth in de-compacted plinthosols fully justifies the integrated analysis of the 0–40 cm layer in the present study.

However, the fact that these correlations are observed in the 0–40 cm zone, currently accessible to roots thanks to subsoiling, indicates an essential point: yield improvement does not depend solely on the chemical composition of the soil, but above all on the ability of the root system to explore a larger volume of soil. Subsoiling has broken the physical constraints associated with plinthitis, increasing the exploitable root volume and allowing maize to access previously inaccessible water and nutrient reserves (Ramadhan & Alfari, 2023; Šarauskis et al., 2024; Wu et al., 2024). Thus, the relationship between soil properties at 0–40 cm and maize yield reflects a real change in the functioning of the soil–plant system. The observed productivity results from the interaction between (i) a reduction in chemical toxicity, (ii) an improvement in soil organo-mineral status, and (iii) an increase in the volume of soil effectively exploited by the roots.

The correlations observed in the 0–10 cm layer, presented in the supplementary material (Figure C-3), show patterns similar to those identified at 0–40 cm and indicate a more homogeneous distribution of soil properties near the surface. However, in the absence of untreated control plots, this homogenization cannot be attributed specifically to the addition of termite mound materials and should be

interpreted as a spatial association within the managed system rather than as a direct causal effect.

5.6.5. Stepwise regression: depth as a direct determinant of yield

The multiple linear regression model constructed in this study has a coefficient of determination of 0.63 and an average error of 0.60 t ha⁻¹, which is a satisfactory performance for agronomic data obtained under real field conditions. In environments subject to high spatial heterogeneity, the literature indicates that an R² between 0.40 and 0.60 is generally considered satisfactory (Moriassi et al., 2007). Here, an R² of 0.63 means that nearly two-thirds of the observed yield variability between blocks is explained by soil variables, which gives the model strong explanatory power for a complex edaphic system such as plinthic soils. This level of explicability is all the more remarkable given that no climatic or agronomic management variables (seed density, weed control, water stress) were included, suggesting that soil properties are one of the major determinants of yield in this pedological context.

The reliability of the statistical model is based not only on its performance (R² = 0.63), but above all on the rigor of the process that led to the selection of predictors. In highly altered tropical soils, where physicochemical properties are often interdependent (pH–available cations–organic matter–metals), the major risk is multicollinearity, which produces unstable models and coefficients that are impossible to interpret correctly (Olaluwoye et al., 2025). To circumvent this bias, the model was constructed using a strategy of progressively reducing the explanatory space: only the monotonic relationship between yield and soil properties was first verified via a robust correlation with non-normal distributions (Spearman), before the Akaike information criterion (AIC) automatically selected the combination of variables that best explained yield while penalizing redundant variables (Bedrick & Tsai, 1994; Venables & Ripley, 2002). A final filter using the variance inflation factor (VIF < 3) allowed independent predictors to be retained, ensuring the numerical stability of the model and the validity of the estimated coefficients, an approach recommended to avoid overfitting in environmental models (Akinwande et al., 2015; O'Brien et al., 2019). Thus, the model does not describe a simple statistical correlation: it identifies soil variables whose effect on yield is real, non-collinear, and agronomically interpretable.

The use of standardized beta coefficients enhances the interpretability of the model by quantifying the relative influence of each variable independently of its unit of measurement (Nieminen, 2022). This process revealed the importance of organic carbon, KCl pH, exploitable depth, and manganese in the model. Organic carbon appears to be the most influential predictor of yield. This result is consistent with the functioning mechanisms of highly altered soils, in which organic matter is the main

source of ex-change complex loads and therefore the main lever of fertility (Sanchez, 2018). The role of KCl pH confirms that acidity is a major limiting factor for yield, as it controls the solubility of aluminum and manganese, two elements that become toxic when pH decreases (Hou et al., 2019; Li et al., 2024b).

The exploitable depth (0–40 cm) is a particularly interesting agronomic variable in this model. It does not act as a simple classification factor but as a quantitative predictor reflecting functional root volume. Each increase in exploitable depth results in an increase in the volume of soil explored by the root system, and therefore an increase in the water and nutrient reservoir. Several studies show that increasing the exploitable soil depth can increase crop yields by up to 70%, depending on the initial level of stress (Huang et al., 2023; Jiao et al., 2023; Ramadhan & Alfaris, 2023; Singh et al., 2019; Wu et al., 2024; Yang et al., 2022). The fact that depth is a predictor automatically retained by the statistical model confirms that agronomic interventions (subsoiling + termite amendment) have permanently altered the functioning of the root system by creating a continuous exploitable horizon.

The negative influence of manganese, the last significant predictor in the model, adds a dimension of soil toxicology that is rarely included in agronomic models. The fact that Mn remains present in the final model despite strict selection by AIC and VIF indicates that its effect on yield is real, direct, and independent of other soil properties. This result is consistent with observations that manganese becomes phytotoxic under acidic conditions, reducing root elongation and disrupting leaf enzyme mechanisms (Jee & Park, 2025; Luo et al., 2025; Sajid et al., 2025; Shafique et al., 2020; Wala et al., 2025). Stoyanova et al. (2009a) observed a reduction in leaf chlorophyll and stunted growth in maize due to manganese toxicity. The combination of organic surface enrichment and a gradual reduction in acidity through deep tillage is therefore an effective lever for reducing this risk of toxicity.

The model's performance is also based on the methodological choice to use the average yield of the two growing seasons for each block. This decision eliminates pseudo-replication and ensures the statistical independence of the observations, a necessary condition for the use of linear models (Hayward et al., 2015; Michener, 1997). By doing so, the model not only captures a one-off statistical relationship but also highlights a more robust and reproducible agronomic relationship over time, implicitly integrating part of the interannual variability. However, the future integration of climatic variables (rainfall, temperature, ET_0), as well as agronomic parameters (seed density, residue management, water stress), would further refine the predictive model, improve its accuracy, and strengthen its ability to be generalized to other similar agro-pedological contexts.

The sequential procedure, consisting of correlation screening, AIC-based variable selection, and VIF filtering, is well suited to highly interdependent tropical soils, as it

isolates interpretable predictors and reduces collinearity-driven artefacts, thereby strengthening agronomic interpretation. However, this approach may also suppress weak interactions that could become relevant under different environmental conditions, and its reliance on linear relationships may underestimate non-linear or threshold-based responses. Thus, while the data-mining process provides a robust explanatory framework for identifying key soil determinants of yield, complementary approaches such as factorial field trials or time-series analysis would be required to fully assess causal pathways and capture temporal variability.

5.7. Conclusions

This study shows that, across blocks, plinthosols managed with subsoiling and termite mound amendments exhibit spatial associations between a deeper functionally exploitable rooting zone, higher maize yields, and changes in soil vertical organization, acidity, organic carbon content, and aluminum and manganese constraints. However, in the absence of untreated control plots, these patterns should be interpreted as co-occurring spatial trends within the managed system rather than as demonstrated causal effects of either practice. As a result, yields reached levels that are not only well above regional averages but also exceed those commonly reported in improved systems, demonstrating that restoring exploitable rooting depth can raise the productivity ceiling of plinthosols.

The pedological dynamics observed are dominated by three structuring mechanisms: (i) acid–base regulation and enrichment in base cations; (ii) aluminum complexation by organic matter; and (iii) the control of phosphorus availability by iron oxides. The regression model confirms that exploitable depth, total organic carbon, and pH are the main determinants of yield, while manganese remains a limiting factor. These findings directly address the three research questions: restoring exploitable depth improves yield; specific soil properties—particularly pH, organic carbon, and Mn—explain the observed spatial variability; and structural and chemical effects interact over time to reinforce productivity.

The main limitations of this study concern the absence of untreated control plots and the single-time-point sampling, which do not allow the contributions of subsoiling and termite mound amendment to be assessed at all, nor the seasonal fluctuations of Mn driven by redox cycles to be captured. Future work integrating factorial experiments, the quantification of nutrient stocks, climatic and hydrological data, as well as Mn concentrations in plant tissues, would strengthen causal interpretation and enhance the predictive capacity of the models. Finally, mapping the identified pedogenetic processes could support more targeted and sustainable management of plinthosols in Haut-Katanga.

Chapitre 6

Simulation of the growth and yield of maize (*Zea mays* L.) on a loosened plinthosol amended with termite mound material in the Lubumbashi region*

*Ce chapitre est adapté à

Mukalay, J. B., Wellens, J., Meersmans, J., Sikuzani, Y. U., Lenge Mukonzo, E. K., & Colinet, G. (2025). Simulation of the Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.) on a Loosened Plinthosol Amended with Termite Mound Material in the Lubumbashi Region. *Agriculture*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/agriculture15212272>

6.1. Avant-propos

Les chapitres précédents ont montré que les interventions combinées de sous-solage et d'amendement par des matériaux de termitières induisent des transformations physiques, chimiques et hydriques du sol, dont les effets sur la productivité du maïs sont fortement spatialement différenciés. Si les analyses pédologiques, géochimiques et agronomiques permettent d'identifier les principaux déterminants du rendement, elles restent toutefois limitées dans leur capacité à intégrer dynamiquement les interactions entre le sol, l'eau, la plante et le climat au cours du cycle cultural.

Dans ce contexte, la modélisation biophysique constitue un outil complémentaire essentiel pour relier les propriétés fonctionnelles du sol aux trajectoires de croissance de la culture et aux rendements observés. Le modèle APSIM, largement utilisé pour simuler la croissance des cultures dans des environnements contrastés, offre un cadre mécaniste permettant d'intégrer la structure du sol, la disponibilité hydrique, le développement foliaire et l'accumulation de biomasse.

Ce chapitre vise à évaluer la capacité du modèle APSIM, couplé aux données de télédétection Sentinel-2, à reproduire les dynamiques temporelles du Leaf Area Index (LAI) et les rendements du maïs observés sur les plinthosols restaurés. L'objectif est double : (i) tester la robustesse du modèle dans un contexte pédologique fortement contraint et spatialement hétérogène, et (ii) analyser comment les modifications structurelles, hydriques et chimiques du sol se traduisent en trajectoires de croissance différenciées entre blocs.

En intégrant modélisation et télédétection, ce chapitre propose une lecture dynamique et intégratrice du fonctionnement du système sol-plante, et ouvre des perspectives pour le développement d'outils d'aide à la décision adaptés à la gestion des plinthosols tropicaux.

6.2. Abstract

The low fertility of plinthosols is a major constraint on agricultural production, largely due to the presence of plinthite, which restricts the availability of water and nutrients. This study aimed to simulate the growth and yield of grain maize on a loosened plinthosol amended with termite mound (from *Macrotermes falciger*) material in the Lubumbashi region. A 660-hectare perimeter was established, subdivided into ten maize blocks (B1-B10) and a control block (B0), which received the same management practices as the other blocks except for subsoiling and termite mound amendment. The APSIM model was used for simulations. The leaf area index (LAI) was estimated from Sentinel-2 imagery via Google Earth Engine, using the Simple Ratio (SR) spectral index, and integrated into APSIM alongside agro-environmental variables. Model performance was assessed using cross-validation (2/3 calibration, 1/3 validation) based on the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and root mean square error (RMSE). Results revealed a

temporal LAI dynamic consistent with maize phenology. Simulated LAI matched observations closely ($R^2 = 0.85-0.93$; $NSE = 0.50-0.77$; $RMSE = 0.29-0.40 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Maize grain yield was also well predicted ($R^2 = 0.91$; $NSE > 0.80$; $RMSE < 0.50 \text{ t ha}^{-1}$). Simulated yields reproduced the observed contrast between treated and control blocks: 10.4 t ha^{-1} (B4, 2023–2024) versus 4.1 t ha^{-1} (B0). These findings highlight the usefulness of combining remote sensing and biophysical modeling to optimize soil management and improve crop productivity under limiting conditions

Keywords: APSIM, maize (*Zea mays* L.), Google Earth Engine, SR (Simple Ratio), LAI, plinthosol, Lubumbashi

6.3. Introduction

In the Democratic Republic of the Congo (DRC), agriculture remains a cornerstone of the national economy, employing over 60% of the population and contributing around 17.4% of GDP (ISS Africa, 2024). Yet, despite its central role, agricultural production continues to face major challenges in ensuring food security and generating sufficient income for rural households (Badibanga & Ulimwengu, 2020; Ciza et al., 2021; Mulume et al., 2022; Mulumeoderhwa et al., 2022; Mushagalusa Balasha & Nkulu Mwine, 2021). The main staple crops include cassava, plantains, maize, groundnuts, and rice. Most farmers practice subsistence agriculture, while commercial production remains marginal (Doocy et al., 2017; Mulimbi et al., 2019; Mulimbi, et al., 2023b; Ochieng et al., 2014; Tambwe et al., 2011).

In the south-eastern DRC (Haut-Katanga province), food deficits persist, and the population relies heavily on maize imports from neighboring southern African countries to meet local demand (Kasongo et al., 2019; Tabu et al., 2023a, 2024). Maize is particularly critical, as it constitutes the main dietary energy source and plays a key role in local food systems. Therefore, improving local maize productivity is essential for achieving food self-sufficiency. However, one of the main constraints limiting yield potential is soil degradation, largely driven by the dominance of highly weathered and nutrient-depleted soils (Banza et al., 2019b; Kasongo, 2008; Ngongo et al., 2009; Useni et al., 2014). These soils are typically characterized by low chemical fertility, the frequent presence of plinthite at or near the surface (Ngongo et al., 2009), and the widespread occurrence of large termite mounds (Adhikary et al., 2016; Mujinya et al., 2014). The shallow nature of plinthic soils restricts root development and nutrient availability, thus reducing their agricultural potential (Legros, 2013; Liu et al., 2020; Sanchez, 2018; Sarkar & Bandyopadhyay, 2018; Yaro et al., 2006).

To address these constraints, an innovative soil management strategy has been implemented in the Lubumbashi region. It combines subsoiling—to disrupt the hardened plinthite layer—with the use of termite mound materials (from *Macrotermes falciger*) as a natural amendment. These materials, rich in fine particles and exchangeable bases (Baumgartner et al., 2021; de Lima et al., 2018; Enagbonma & Babalola, 2019; Eze et al., 2019; Jouquet et al., 2015; Kaschuk et al., 2006; Mujinya

et al., 2013; Padonou et al., 2020; Rajeev & Sanjeev, 2011; Seymour et al., 2014), are excavated and spread across subsoiled plots (Figure 6-1), improving soil structure, enhancing fertility, and facilitating mechanized maize cultivation. Unlike conventional soil rehabilitation techniques that rely mainly on organic or mineral fertilizers, this approach directly modifies soil physical constraints while simultaneously improving nutrient status, making it particularly suited to plinthic landscapes.

Despite its increasing adoption by local farmers, few scientific studies have evaluated the agronomic and modeling implications of this practice. Most previous works on plinthosols have focused on soil characterization or amendment effects under controlled conditions but lack process-based modeling to assess long-term crop responses under real field variability. This knowledge gap justifies the need for an integrated assessment combining field data with crop simulation.



Figure 6-1: On the (left), petroplinthite exposed on the soil surface before land improvement works; on the (right), the same site after land preparation for maize cultivation in Lubumbashi (photo credit: John BANZA M.).

Crop models offer a powerful means to analyze and predict the effects of management practices on soil–plant–climate interactions, supporting more sustainable and resilient agricultural systems. Among them, APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) is widely recognized for its ability to integrate dynamic processes governing crop growth, soil water and nutrient fluxes, and management practices (Chen et al., 2016; Chimonyo et al., 2016; Correndo et al., 2021; Ebrahimi-Mollabashi et al., 2019; Harrison et al., 2019; Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014; Wu et al., 2021; Yang et al., 2020). The model has been successfully applied to assess the effects of organic and mineral amendments (Adam et al., 2020; Chauhan et al., 2013; He et al., 2025; Li et al., 2024a; Mohanty et al., 2012, 2020) and soil tillage techniques, including subsoiling (Vogeler et al., 2019, 2021).

This study therefore aims to evaluate the performance of the APSIM model in simulating maize growth and yield on plinthosols improved through subsoiling and amendment with termite mound materials in the Lubumbashi region. It specifically seeks to answer the following question: How does the combined use of subsoiling and termite mound amendments influence maize grain yield performance, and how

accurately can APSIM reproduce these effects under local conditions? The study is based on the hypothesis that the combination of subsoiling and termite mound amendment enhances maize productivity by improving soil physical conditions and nutrient availability, and that the APSIM model can accurately simulate these effects when properly calibrated for plinthosols.

6.4. Materials and Methods

6.4.1. Study sites

This study was conducted in Lubumbashi, Haut-Katanga province, Democratic Republic of the Congo, specifically at the FarmCo farm. The study site is located in the suburbs of Lubumbashi, approximately 60 km east of the city, along the Kasenga road in the Kifumanshi river valley (Figure 6-2). The study area covers approximately 660 hectares, subdivided into ten blocks. The pedological cover of the region is dominated by plinthitic Ferralsols, according to the WRB classification (Ngongo et al., 2009).

A detailed soil survey conducted before deep tillage revealed surface-exposed plinthite in several blocks (notably B3, B7, B8, B9, and B10), sometimes occurring at depths shallower than 10 cm. In the remaining blocks, plinthite was present in all profiles but generally appeared at depths greater than 10 cm.

The soils of the site are characterized by a shallow effective depth, high compaction of subsoil horizons, and marked textural variability, making their agricultural use difficult without mechanical intervention or suitable amendments.

To overcome these constraints, systematic excavation of lateritic layers was carried out across the entire area to fragment compact horizons. This operation was followed by deep mechanical subsoiling, aimed at improving soil structure, water percolation, and root development. In parallel, materials from inactive giant termite mounds, which are abundant in the area, were excavated, leveled, and spread over the subsoiled plots to expand the cultivated surface, facilitate the use of agricultural machinery, and serve as organo-mineral amendments.

In this region, the average density of inactive termite mounds (from *Macrotermes falciger*) is approximately seven units per hectare, with an individual volume of about 256 m³ (Mujinya et al., 2014). The total mobilizable volume is therefore estimated at 1,800 m³ ha⁻¹.

Assuming uniform spreading, this corresponds to an average thickness of 18 ± 2.3 cm ha⁻¹, equivalent to roughly 2,000 t ha⁻¹, considering a bulk density of 1.2 g cm⁻³ (Santhoshkumar et al., 2024). Although all blocks received termite mound material, a larger proportion was applied to those where plinthite had been more extensively excavated, to ensure uniform leveling of the field and to compensate for the volume loss resulting from subsoiling. This site is one of the largest farms in the Lubumbashi region, known for its large production of maize grain for human consumption in the form of flour.

The outskirts of Lubumbashi belong to the C_{w6} climate (humid subtropical climate with hot summers and dry winters) according to the Köppen classification. The area is characterized by a dry season (May to September), a rainy season (November to March), and two transition months (April and October) (Assani, 1999). Average annual rainfall is 1,270 mm. The average annual temperature is 20.1°C, with daily minimum and maximum temperatures reaching 8°C during the coldest month and 32°C during the hottest month, respectively (Malaisse, 2011).

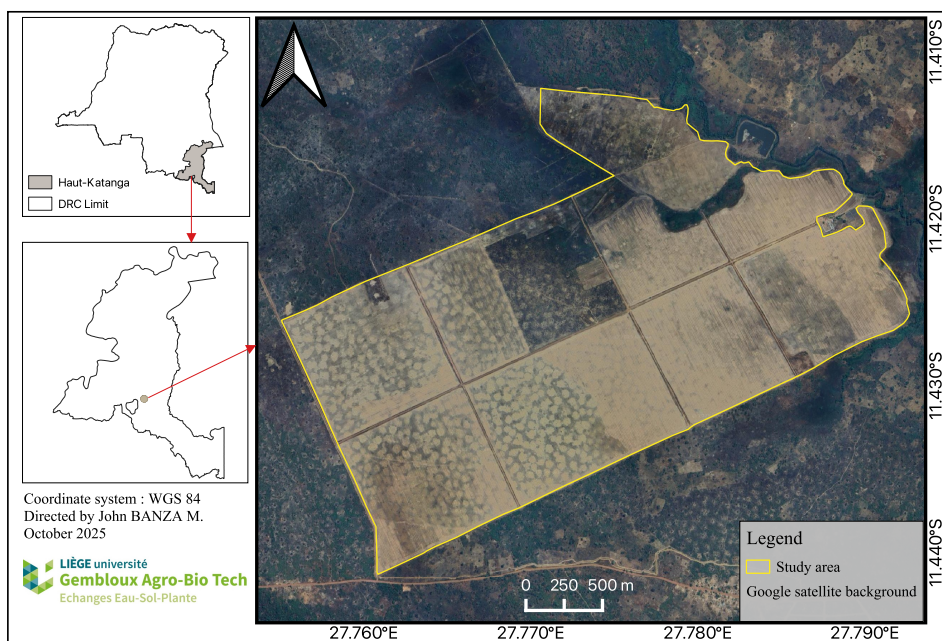


Figure 6-2 : Location of the study site, FarmCo farm, in Lubumbashi, in the province of Haut-Katanga.

6.4.2. APSIM Model description

APSMI NextGen version 2024.10.7607.0 was used for scenario analysis in this study. This model was developed to simulate biophysical processes in agricultural systems in response to environmental variations (Holzworth et al., 2018). A wide range of models is available in APSIM for major crop, pasture, and tree species, as well as key agricultural system processes at a daily time step (Keating et al., 2003). The APSIM-Maize crop module was used to simulate the growth and yield of grain maize on plinthite soil over three growing seasons. The processes that affect growth and yield in APSIM-Maize are simulated by interactions between daily weather data, cultivars, soil properties, and different management practices (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014).

The parameters calibrated to simulate maize growth and yield at the study site are detailed below and were integrated using a step-by-step approach. Phenological phase

progression is expressed in thermal time, thus expressing values in degree days (Wilson et al., 1995).

6.4.3. Parametrization and Calibration

6.4.3.1. Climate data

Agrometeorological data were obtained from the NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER CERES/MERRA-2) satellite database (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, accessed on 10 February 2025) for the period from January 1, 2016 to December 31, 2024, covering the entire study duration. This source was used because no operational local weather stations were available in the study area. The extracted variables included temperature, precipitation, relative humidity, wind speed, and solar radiation (Figure 6-3). Although NASA POWER data have demonstrated high reliability in several agroclimatic contexts (Khatibi & Krauter, 2021; Mourtzinis et al., 2017; Negm et al., 2018; White et al., 2011), their use may introduce uncertainty associated with the relatively coarse spatial resolution ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$, approximately 55 km) and the gridded interpolation process, which does not always capture fine-scale topographic or microclimatic variations (Bosilovich et al., 2016). According to Glotter et al. (2016) and Mourtzinis et al. (2017), this uncertainty typically ranges between 5 % and 15 % depending on the variable considered but remains acceptable for agroclimatic modeling applications, particularly in tropical regions where in situ observations are scarce. In this context, NASA POWER products provide a reliable and widely validated alternative for crop modeling and reference evapotranspiration estimation (Negm et al., 2018).

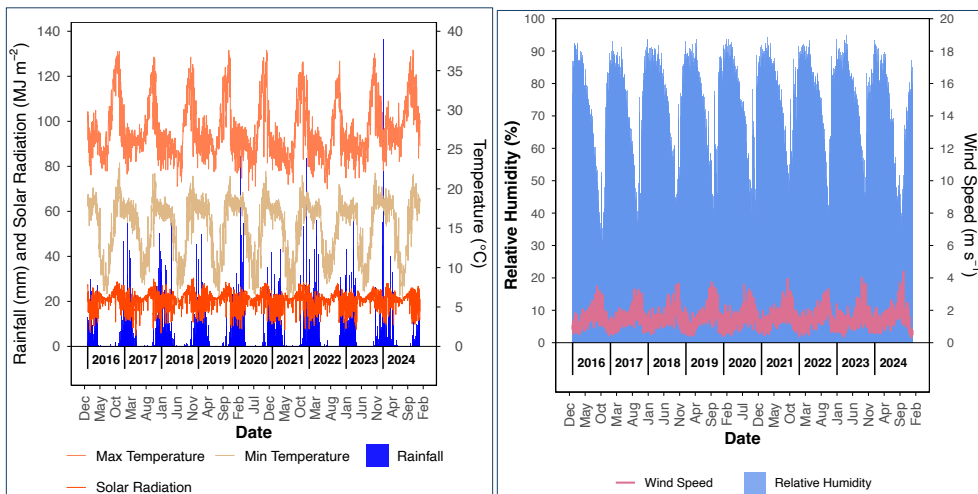


Figure 6-3 : Meteorological characteristics of the site covering the study period.

6.4.3.2. Reference evapotranspiration

The FAO Penman–Monteith approach (Allen et al., 1998) was used to calculate evapotranspiration from maize plants during the study period. This method, which requires the use of meteorological variables, is widely recognized for its ability to provide accurate and unambiguous estimates of ET_0 in various environments around the world (Estévez et al., 2009; Gong et al., 2006; Jerszurki et al., 2019; Sharifi & Dinpashoh, 2014). Figure 6-4 shows the results of reference evapotranspiration variation from 2016 to 2024 at the study site.

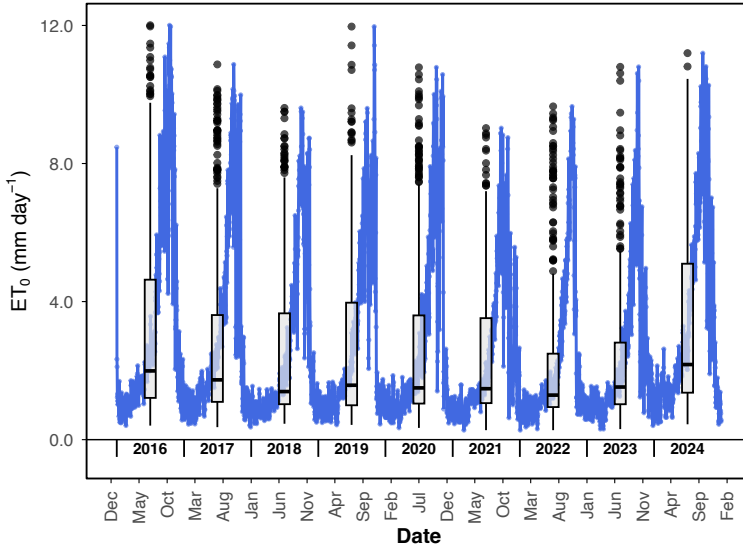


Figure 6-4 : Temporal dynamics of reference evapotranspiration (ET_0) from 2016 to 2024. The blue line represents daily ET_0 values calculated from meteorological observations, while the boxplots with black circles show the monthly distribution (median, inter-quartile range, and extreme values/outliers). The x-axis illustrates monthly variability.

6.4.3.3. Maize yield

Maize grain yield was measured in subplots measuring one square meter each, clearly marked out in the different blocks (Figure 6-5). At least five measurements per block were taken during the first (2022-2023) and second (2023-2024) growing seasons, and the average yield per block was then calculated for each season. The yield for the 2016-2017 growing season was considered the control (B0), corresponding to the period before the implementation of subsoiling and termite mound material spreading. As a result, only blocks B1 to B10 benefited from these interventions.

In terms of crop management, all blocks, including the control block B0, benefited from the same technical itineraries, including mechanical tillage, harrowing, sowing,

mineral fertilization, and the application of a pre-emergence herbicide. Maize was sown at the time of the application of NPK (10-20-10) base fertilizer at a rate of 200 kg ha⁻¹, followed by a urea supplement applied 45 days after sowing at a rate of 200 kg ha⁻¹. The SC719 maize variety was grown at a spacing of 0.75 m between rows and 0.25 m within rows, giving a density of 53,333 plants per hectare. Harvesting took place when the plants reached harvest maturity (Tableau 6-1), i.e., when the seeds had a moisture content of 13%.

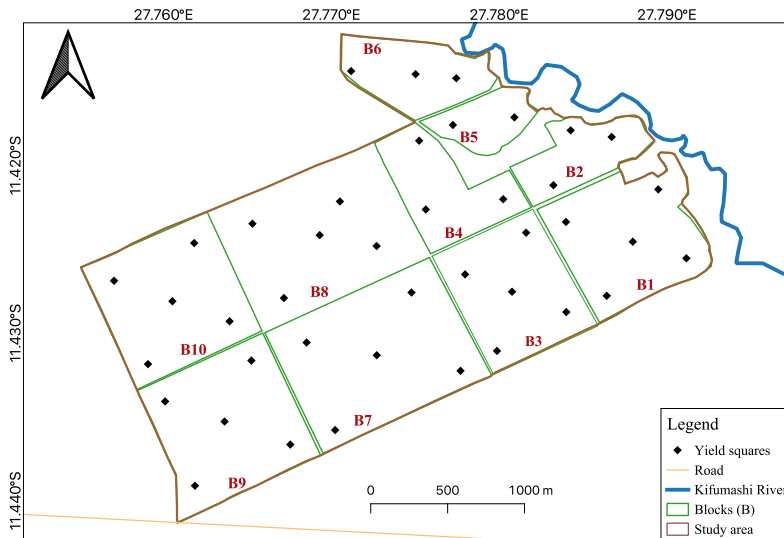


Figure 6-5 : Yield harvest plots.

Tableau 6-1 : Sowing and harvest dates in the blocks. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound material. B0: control without subsoiling and amendment with termite mound material.

Maize Blocks	Season 2016–2017		Season 2022–2023		Season 2023–2024	
	Sowing	Harvest	Sowing	Harvest	Sowing	Harvest
B1			22 November 2022	23 June 2023	23 November 2023	23 June 2024
B2			24 November 2022	21 June 2023	23 November 2023	22 June 2024
B3			30 November 2022	25 June 2023	30 November 2023	25 June 2024
B4			02 December 2022	27 June 2023	30 November 2023	27 June 2024
B5			05 December 2022	24 June 2023	02 December 2023	24 June 2024
B6			07 December 2022	27 June 2023	30 December 2023	30 June 2024
B7			03 December 2022	24 June 2023	30 November 2023	26 May 2024
B8			04 December 2022	26 June 2023	02 December 2023	26 June 2024
B9			25 November 2022	22 June 2023	22 November 2023	24 June 2024
B10			27 November 2022	24 June 2023	22 November 2023	24 June 2024
B0	09 December 2016	24 June 2017				

6.4.3.4. Soil properties

A detailed description of a soil profile of ± 1 m in each block was carried out in each block following the FAO soil description guidelines (WRB, 2022). Composite soil samples were collected in 2022 from the diagnostic horizons, air-dried for five days, sieved to 2 mm, for chemical analyses. Analyses were performed at the Soil Chemistry Laboratory, Gembloux Agro-Bio Tech (Gembloux, Belgium). Soil pH was determined pH in water; organic C and total N were determined using the Walkley–Black and Kjeldahl methods, respectively. Particle size distribution was obtained using the pipette method following the XFX 31-107 protocol. Undisturbed samples were also collected using Kopecky cylinders to measure bulk density and assess soil water dynamics at the Soil Physics and Mechanics Platform (PhyMeSol), Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liège, Gembloux, Belgium. Saturated hydraulic conductivity (Ksat) was measured with the constant-head permeameter, and water retention was determined using Richard’s apparatus.

For the control block (B0), soil analyses previously conducted in 2016 in Belgium were used. The same analytical protocols were applied, except for hydraulic parameters, which were estimated using the pedotransfer functions of Saxton & Rawls (Saxton & Rawls, 2006). The results relating to water content, physicochemical properties (Tableau 6-2), and particle size distribution (Tableau 6-3) were incorporated into the APSIM model for the simulations.

Tableau 6-2 : Soil properties of the site used in the simulations: saturation water content (Ksat), drained upper limit (DUL), lower limit of available soil water (LL), plant available water capacity (PAWC), bulk density (BD), saturated hydraulic conductivity (Ksat), and total organic carbon (TOC). Blocks 1 to 10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound materials. Block 0: control without subsoiling or amendment with termite mound materials.

Soil depth (cm)	SAT	DUL	LL	PAWC	BD (g cm ⁻³)	Ksat (mm day ⁻¹)	pH water	TOC (%)
		(m ³ m ⁻³)						
Block 1								
0-26	0.49	0.26	0.16	0.10	1.4	7,780	8.2	0.9
26-50	0.45	0.18	0.08	0.11	1.5	86	8.0	0.4
Block 2								
0-27	0.42	0.22	0.16	0.06	1.5	51.7	6.9	0.8
27-79	0.43	0.24	0.20	0.04	1.5	664	5.6	0.2
Block 3								
0-30	0.41	0.19	0.11	0.08	1.6	86	7.9	1.1
30-43	0.30	0.19	0.08	0.07	1.9	6,130	6.0	0.6
43-80	0.28	0.14	0.08	0.06	1.9	7,780	5.5	0.4
Block 4								
0-20	0.45	0.23	0.18	0.05	1.5	125	8.4	1.2
20-35	0.55	0.26	0.19	0.07	1.2	126	8.0	1.8
Block 5								
0-46	0.55	0.30	0.24	0.06	1.2	625	6.1	2.0
46-92	0.36	0.24	0.20	0.04	1.7	276	7.2	0.4
92-150	0.33	0.27	0.23	0.04	1.8	63.9	7.8	0.2
Block 6								
0-25	0.48	0.21	0.14	0.08	1.4	333	5.9	1.2
25-132	0.38	0.19	0.15	0.047	1.7	32.9	6.1	0.2
Block 7								
0-20	0.46	0.26	0.176	0.10	1.4	1,210	8.0	1.2
20-30	0.37	0.18	0.09	0.10	1.7	4,320	6.5	0.2
30-75	0.28	0.15	0.09	0.060	1.9	864	5.6	0.2
Block 8								
0-35	0.45	0.16	0.10	0.07	1.5	44.7	6.0	0.7
35-110	0.34	0.12	0.06	0.05	1.7	400	5.8	0.2
Block 9								
0-30	0.56	0.26	0.09	0.17	1.8	1,810	7.1	1.4
30-70	0.45	0.19	0.09	0.10	1.5	892	5.3	0.7
Block 10								
0-27	0.45	0.18	0.13	0.06	1.5	1,410	7.5	2.3
27-130	0.39	0.21	0.16	0.05	1.6	767	7.0	0.3
Block 0								
0-27	0.30	0.16	0.09	0.07	1.9	398	5.3	0.7
27-44	0.28	0.11	0.07	0.04	1.9	91.5	5.0	0.3

Tableau 6-3 : Soil particle size distribution of blocks used for simulations. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound material. B0: control without subsoiling or amendment with termite mound material.

Blocks	Horizons	Depth (cm)	Clay	Silt	Sand
			(%)		
B1	Ap	0-26	19.4	33.2	47.4
	AB	26-50	18.0	50.7	31.3
B2	Ap	0-27	21.1	40.4	38.5
	AB	27-79	28.4	37.7	33.9
B3	Ap	0-30	22.2	47.6	30.2
	AB	30-43	20.0	45.2	34.8
	Bs	43-80	30.6	44.5	24.9
B4	Ap	0-20	24.1	57.9	18.0
	AB	20-35	16.1	52.3	31.6
B5	Ap	0-46	18.6	56.0	25.4
	AB	46-92	37.6	30.2	32.2
	Bs	92-150	44.0	27.2	28.8
B6	Ap	0-25	19.7	32.9	47.4
	AB	25-132	40.2	28.1	31.7
	Bs	132-201	34.6	38.0	27.4
B7	Ap	0-20	20.6	50.5	28.9
	AB	20-30	18.0	51.7	30.3
	Bs	30-75	24.3	51.3	24.4
B8	Ap	0-35	18.8	41.2	40.0
	Bcs	35-110	34.1	45.0	20.9
B9	Ap	0-30	22.2	53.2	24.6
	Bcs1	30-70	27.8	49.6	22.6
B10	Ap	0-27	12.0	43.5	44.5
	Bs	27-130	21.8	46.4	31.8

6.3.3.5. Leaf Area Index

The leaf area index (LAI) was determined for maize crops using Sentinel-2 satellite images, available via Google Earth Engine (GEE, <https://code.earthengine.google.com>, accessed on 22 February 2025). LAI is a key parameter for quantifying leaf area per unit of soil surface area and is crucial for assessing crop health and productivity. In the APSIM model, LAI directly controls the solar radiation intercepted by the canopy and, consequently, the ability to capture light for photosynthesis. Remote sensing is an effective tool for studying the seasonal dynamics of LAI, particularly in the absence of field measurements (Gitelson et al., 2003; Turner et al., 1999). Sentinel-2 imagery is particularly suitable for this purpose due to its high spatial (10 m) and temporal (5-day) resolution, enabling precise monitoring throughout the growing season (Cohrs et al., 2020). The study area was

defined by a shapefile delineating the boundaries of the experimental fields to ensure accurate geospatial analysis. Sentinel-2 images were atmospherically corrected using the Surface Reflectance (Level-2A) product available in GEE, which applies the Sen2Cor algorithm to remove atmospheric and scattering effects. Only cloud-free scenes (cloud cover < 20%) were retained for analysis (Tableau 6-4).

Tableau 6-4 : Number of Sentinel images used per month and per year in the LAI estimate.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2016												2
2017	2	2	2	2	3	4						
2022											3	3
2023	2	2		2	7	7					3	3
2024		4	3	3	7	5					4	2

Blue cells (with white font) indicate months in which usable Sentinel-2 images (cloud cover < 20%) were available. White cells indicate months without usable images, or months outside the maize growing period (sowing to harvest).

The Simple Ratio (SR) index, computed from the near-infrared (B8) and red (B4) bands of Sentinel-2, was selected to derive the LAI (SR; Equation (6-1)). The choice of SR was guided by its strong linear relationship with canopy density, its low sensitivity to soil background variations, and its robust performance under moderate vegetation cover—conditions typical of maize fields in southern DRC (Cohrs et al., 2020; Jiang, 2005; Joseph. White et al., 1997). Previous studies have shown that SR maintains a higher dynamic range than NDVI in dense canopies and exhibits strong correlations with measured LAI ($R^2 > 0.70$, $RMSE < 0.5$) (Blinn et al., 2019; Deng et al., 2006). Although more complex indices such as EVI2 or MSAVI can reduce saturation effects in very dense vegetation, their performance advantage remains limited under moderate canopy conditions and in environments with variable atmospheric effects. Consequently, SR was considered the most suitable and operationally efficient index for this study, providing a good balance between simplicity, sensitivity, and proven accuracy.

To improve classification precision and minimize background noise, a supervised classification was applied using the Support Vector Machine (SVM) algorithm. The SVM classifier was trained with 120 reference samples (60 vegetation and 60 non-vegetation) distributed across the study area. The overall classification accuracy reached 94%, with a Kappa coefficient of 0.89, indicating an “almost perfect”

agreement according to the thresholds proposed by Landis and Koch (Landis & Koch, 1977) and consistent with recent Sentinel-2 classification results (Foody, 2020). This approach allowed for a better separation of vegetated and non-vegetated areas, reducing noise and improving the reliability of the LAI estimates (Mountrakis et al., 2011).

$$SR = \frac{BB}{B4} \quad (6-1)$$

This calculation yields values ranging from 0 (bare soil) to higher values for more densely vegetated areas. The SR is particularly relevant in this study, as this ratio is sensitive to the leaf area present in the canopy, a key factor in LAI estimation.

LAI was then estimated from SR using an empirical relationship specific to maize (LAI; Equation (2)), where a factor of 0.32 and a bias of -0.06 are empirical coefficients specific to maize cultivation and can sometimes be adjusted according to the region (Nguy-Robertson et al., 2012). These coefficients have been specifically adjusted for maize cultivation based on agronomic research and are widely used to estimate LAI from SR in studies on this crop. Although no direct in-field calibration was performed, the empirical SR–LAI relationship was locally validated by comparing SR-derived LAI values with APSIM estimates on matching dates, confirming consistent trends and no systematic bias.

$$LAI = 0.32 \times SR - 0.06 \quad (6-2)$$

LAI values were extracted for each image based on the previously defined crop blocks. For each image in the collection, the average LAI was calculated for each block using the 'reduceRegion' function in GEE. This operation made it possible to determine the average LAI for each crop area on each image capture date. These results enabled a visual and temporal assessment of crop health, tracking the progression of leaf development from sowing to harvest (Supplementary Figure D-1), which was important in calibrating the APSIM model. In addition, all LAI values for each block and each image were exported as a CSV file, allowing for detailed analysis and comparison with APSIM-simulated values and performance statistics.

6.4.3.6. Crop parameters and LAI calibration

The parameter ranges used for APSIM calibration were defined based on values from the literature and local agronomic observations to realistically represent maize growth under the edapho-climatic conditions of Lubumbashi. Phenological parameters (juvenile, flowering, and grain-filling phases) were adjusted according to degree-day observations from the field and technical data provided by SEED-CO Zambia for the SC719 variety. These values are consistent with those reported

by Holzworth et al. (2018), Sheng et al. (2019), and Chauhdary et al. (2024) for maize hybrids cultivated in similar tropical environments.

Morphological parameters (plant height, maximum grains per cob, and potential grain size) were adapted from field measurements, while parameters related to canopy dynamics (LAI) were calibrated using SR-derived values for each block and acquisition date from Sentinel-2 imagery. Parameters that could not be directly observed were kept within the default APSIM ranges, following the recommendations of Keating et al. (2003).

Each parameter was thus adjusted within a biologically and agronomically plausible range, ensuring the internal consistency of the model. For LAI calibration, the values estimated on each Sentinel-2 image acquisition date were used to represent leaf growth dynamics throughout the crop cycle, using a cross-validation approach (2/3 of the data for calibration and 1/3 for validation) similar to that applied for maize grain yield (Tableau 6-5).

Tableau 6-5 : Input parameters used for calibrating the APSIM model for the SC719 maize variety and fertilization, accompanied by their descriptions and values. °Cd: degree day.

Cultivar parameters	Description	Unit	values	Source
Density		Plants m ²	6	Adjusted
Juvenile.Target	Development time of the juvenile phase	°Cd	170	Adjusted
FloweringToGrainFilling.Target	Time required to transition from flowering to grain filling	°Cd	175	Adapted
FlagLeafToFlowering.Target	Time from flag leaf appearance to flowering	°Cd	50	Adjusted
GrainFilling.Target	Time required for grain filling	°Cd	860	Default
MaturityToHarvestRipe	Time from maturity to harvest	°Cd	10	Default
Photosensitive.Target	Photoperiod sensitivity	-	0 ; 12.5 ; 24	Default
Height	Height crop	cm	243	Adjusted
MaximumGrainsPerCob	Maximum number of grains per ear	number	1050	Adjusted
MaximumPotentialGrainSize	Maximum theoretical grain size	g	0.80	Adjusted
Root.SpecificRootLength	Specific root length	Cm g ⁻¹	100	Default
Proportion of plant mortality	Proportion of plant mortality (dimensionless, between 0 and 1)	-	0.02	Adapted
LAI	Leaf area index	m ² leaf m ⁻² soil	X ^a	Calibrated
Fertilizer				
N Fertilization	Urea (45% N)	kg ha ⁻¹	200	Adapted

X^a: LAI values obtained after calculating the SR were used for each acquisition date and block individually.

6.4.4. Cross-validation

Cross-validation was conducted by pooling data from the three growing seasons (2016-2017, 2022-2023, and 2023-2024), resulting in n = 21 observations. After random sampling, approximately two-thirds of the dataset (12 blocks from the 2022-2023 and 2023-2024 seasons) were used for model calibration, while the remaining one-third (8 blocks from the same seasons and 1 block from the 2016-2017 season)

were used for validation. This randomized cross-validation approach ensured that both calibration and validation datasets captured the variability observed across seasons and management conditions within the same experimental site.

For LAI, the cross-validation followed the same structure as that used for grain yield, with identical calibration and validation blocks and seasons. However, the number of available observations (n) depended on the number of cloud-free Sentinel-2 images providing valid Simple Ratio (SR) values for each block. Each SR-derived LAI estimate corresponded to one image acquisition date, so n varied according to the temporal frequency of usable images within each growing season. This approach ensured methodological consistency with yield calibration while accounting for the variability in Sentinel-2 data availability across blocks and seasons.

This approach ensured a rigorous separation between model training and evaluation while testing the model's ability to generalize within the same pedoclimatic context but on unseen observations. Commonly applied in agro-environmental modeling, this method provides a robust assessment of APSIM's stability and predictive performance under realistic spatial and temporal variability (Holzworth et al., 2018). Commonly used in agro-environmental modeling, this method allows the robustness of the APSIM model to be evaluated by testing its ability to predict yields on blocks not used during calibration. The model was evaluated using the following statistical metrics:

Coefficient of determination (R^2), which measures the proportion of variance explained by the model (R^2 ; Equation (6-3)). A coefficient of determination (R^2) greater than 0.70 is generally considered indicative of good model performance in crop growth simulations (Moriassi et al., 2007). A value close to 1 indicates a strong correlation between simulated and observed values, reflecting good model performance.

$$R^2 = \frac{\sum(Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})}{\sqrt{\sum(Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2 \sum(Y_{sim} - \bar{Y}_{sim})^2}} \quad (6-3)$$

RMSE (root mean square error), quantifying the average standard deviation between simulated and observed yields (RMSE; Equation (6-4)). Lower RMSE values (< 0.5 for LAI or $< 1 \text{ t ha}^{-1}$ for yield) indicate higher model accuracy.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2} \quad (6-4)$$

NSE (Nash–Sutcliffe efficiency), which evaluates the accuracy of the model by comparing it to the average of the observations (NSE; Equation (6-5)). A model is considered satisfactory for $NSE > 0.50$, good for $NSE > 0.65$, and very good for $NSE > 0.75$ (Moriassi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{sim})^2}{(\sum(Y_{obs} - Y_{obs}))^2} \quad (6-5)$$

MAE (Mean Absolute Error), which represents the average of the absolute differences between simulated and observed values, providing a complementary error measure less sensitive to outliers (MAE; Equation (6-6)). In crop yield simulations,

MAE values below 0.5 t ha⁻¹ are generally considered indicative of acceptable model accuracy (Moriassi et al., 2007).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |Y_{obs} - Y_{sim}| \quad (6-6)$$

where Y_{obs} represents the observed value, Y_{sim} represents the simulated value, \bar{Y} represents the mean of the values, and n is the number of observations.

Overall, high R^2 and NSE values combined with low RMSE and MAE indicate strong agreement between simulated and observed data, demonstrating the satisfactory performance of the APSIM model.

6.4.5. Simulation runs

All simulations were carried out using a common set of calibrated parameters. They covered the period from sowing to harvest (Table 6-1) for each block and season. Additional APSIM simulation outputs showing the temporal evolution of LAI and grain yield for representative blocks are provided in the Supplementary Materials (Figures D-2 to D-7).

Figure 6-6 below shows the methodological diagram used for the construction and calibration of the APSIM model.

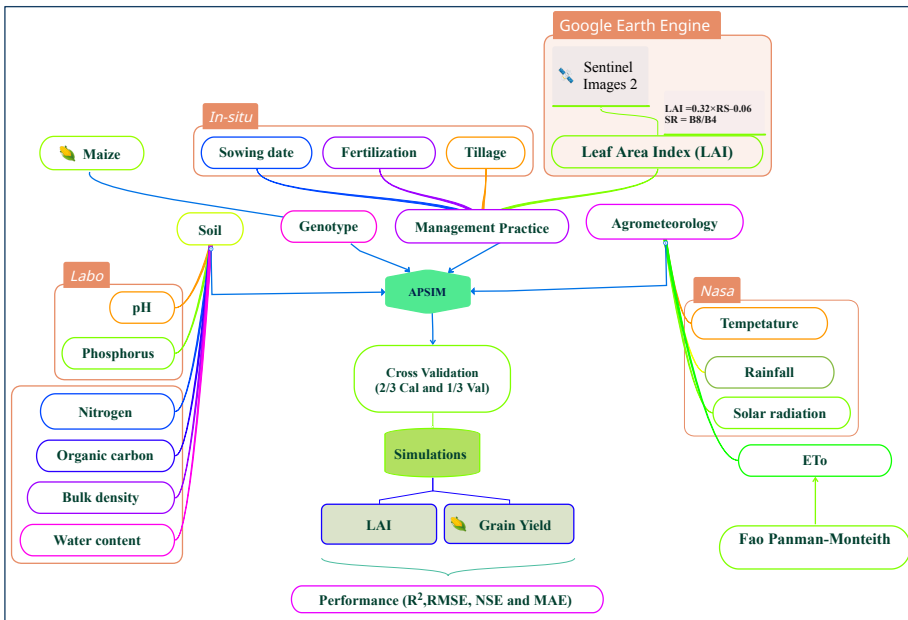


Figure 6-6 : Flowchart of the APSIM model construction, calibration, and validation process.

6.4.6. Data analysis

All statistical analyses in this study were performed using R software, version 4.4.1.

6.5. Results

6.5.1. Performance of the APSIM model for LAI simulation

The cross-validation analysis of the APSIM model (Tableau 6-6; Figure 6-7) revealed a strong agreement between simulated and observed LAI values. The model accurately reproduced the temporal dynamics of canopy development across calibration and validation datasets, as illustrated by the clustering of points along the 1:1 line. Overall, the statistical indicators confirm satisfactory model accuracy, with high coefficients of determination and Nash–Sutcliffe efficiencies exceeding commonly accepted thresholds for good model performance ($NSE > 0.5$). The moderate error values further indicate that APSIM reliably captures leaf area variability between the different experimental blocks.

Tableau 6-6 : Summary of APSIM model performance indicators in cross-validation on LAI. R^2 coefficient of determination; NSE = Nash–Sutcliffe efficiency; RMSE = root mean square error; MAE = Mean Absolute Error; n = number of blocks.

Set	LAI ($m^2 m^{-2}$)		Metrics				
	Observed Mean	Simulated Mean	R^2	NSE	RMSE	MAE	n
					$(m^2 m^{-2})$		
Calibration	0.50	0.39	0.87	0.71	0.32	0.25	220
Validation	0.51	0.42	0.85	0.70	0.35	0.27	148
Overall	0.50	0.40	0.86	0.67	0.33	0.26	368

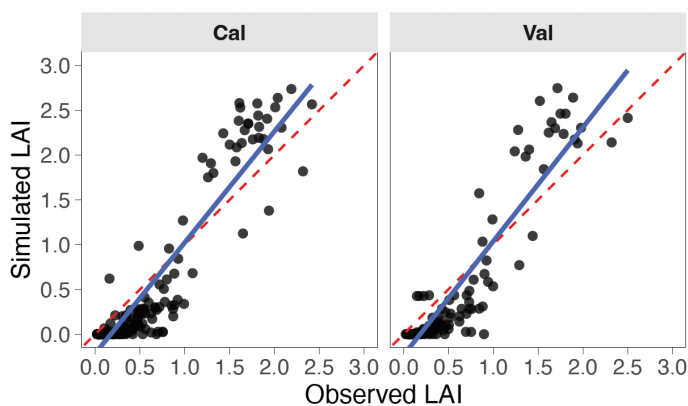


Figure 6-7 : Observed vs. simulated LAI (APSIM) for calibration (Cal) and validation (Val). Each black circle represents one observed–simulated data pair. The solid line: linear fit; dashed line: 1:1 (ideal agreement).

The simulated leaf dynamics during the crop cycle show that the APSIM model is capable of accurately representing maize growth through the simulation of the leaf

area index (Figure 6-8). The simulated values generally follow the trend of the observations across all blocks, with a peak corresponding to the phase of full leaf cover, followed by a gradual decline at the end of the maize crop cycle (senescence).

For the 2022-2023 growing season (red box), the linear adjustments between observed and simulated values show a strong correlation, confirming that the model is well-suited to the field data. In 2023-2024 (blue box), the trends remain similar, although some blocks show more marked deviations, particularly block B8, which performs less well ($NSE = 0.50$; $RMSE \geq 0.30 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), suggesting more pronounced heterogeneity in plant structure.

For the 2016-2017 season, the model shows a satisfactory ability to reproduce LAI variations ($NSE = 0.67$), including under control conditions (B0) without amendment or subsoiling.

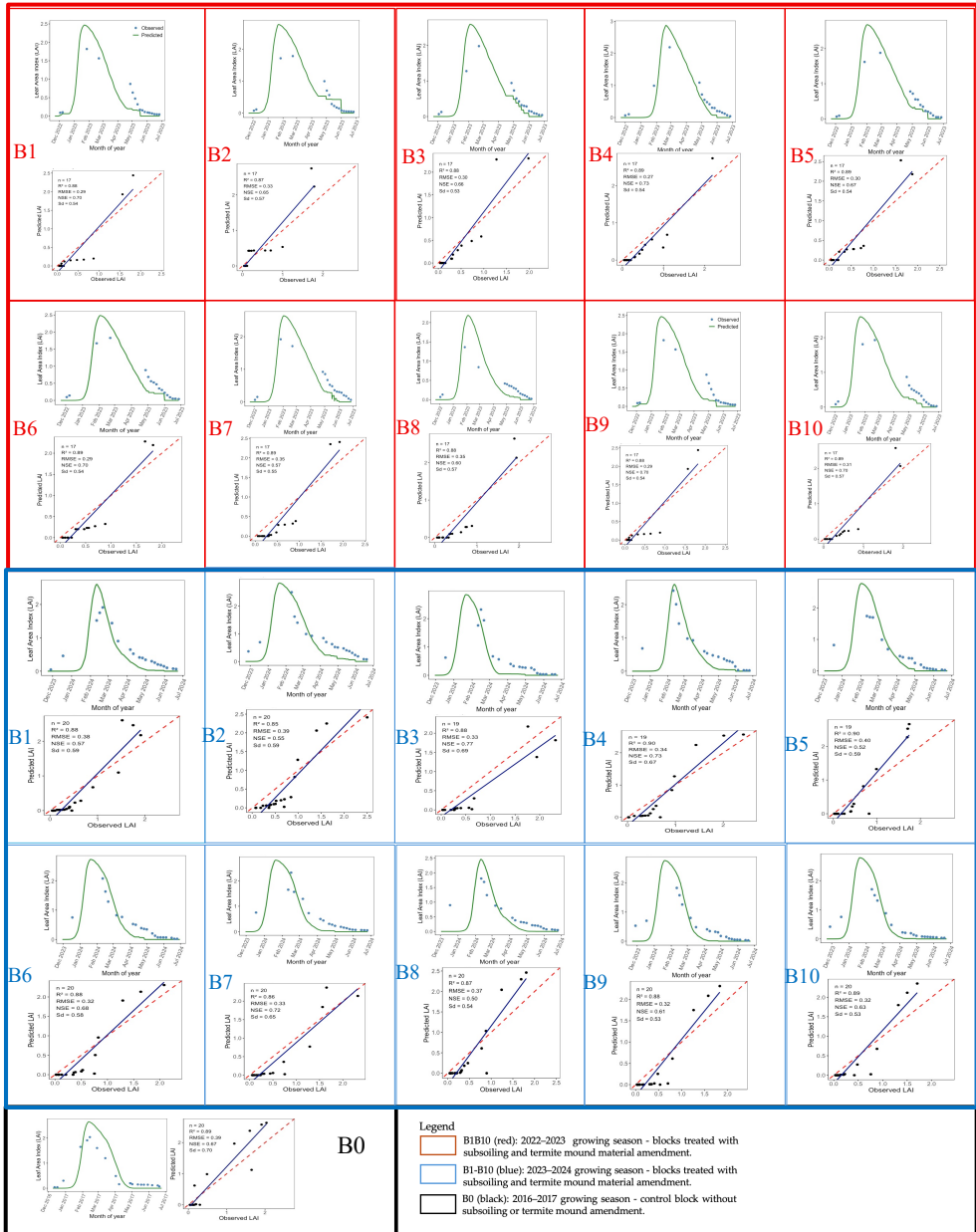


Figure 6-8 : Temporal evolution of simulated and observed LAI during maize growth and model performance across blocks. The solid line indicates the linear regression, and the dashed line the 1:1 line. n represents the number of valid observations derived from cloud-free Sentinel-2 images (Simple Ratio), and sd denotes the standard deviation.

6.5.2. Evaluation of APSIM model performance in cross-validation of maize grain yield

These results demonstrate that the APSIM model is capable of accurately reproducing maize yields over different years and experimental blocks while maintaining good stability between calibration and validation (Tableau 6-7). Slightly more efficient on the training set, the model shows no signs of overfitting, which reinforces its applicability for larger-scale simulations.

Cross-validation results demonstrate that APSIM performs robustly in simulating maize grain yield across seasons and experimental blocks. The model showed a strong correlation between observed and simulated yields, with minimal deviation from the 1:1 line, reflecting good agreement and stable calibration–validation consistency. Error statistics confirm the reliability of APSIM predictions, with low discrepancies and a homogeneous error distribution, indicating no overfitting. Overall, the model successfully reproduces yield variations under contrasting soil management conditions, highlighting its potential for broader application in similar agroecological environments.

Tableau 6-7 : Performance metrics of APSIM model: cross-validation with 2/3 calibration and 1/3 validation. R^2 = coefficient of determination; NSE = Nash–Sutcliffe efficiency; RMSE = root mean square error; MAE = Mean Absolute Error; n = number of measures.

Set	Maize Grain Yield (t ha ⁻¹)			Metrics			
	Observed Mean	Simulated Mean	R^2	NSE	RMSE	MAE	n
	(t ha ⁻¹)						
Calibration	7.3	7.4	0.92	0.99	0.48	0.47	12
Validation	7.5	7.5	0.89	0.88	0.46	0.44	9
Overall	7.4	7.4	0.91	0.90	0.47	0.45	21

The integration of all seasons, including the 2016-2017 control (Figure 6-9), reinforces the overall consistency of the model, with a very strong relationship between simulated and observed values ($Y = 1.00X + 0.01$; $R^2 = 0.91$; NSE = 0.90), reflecting low residual variability and good generalization capacity of the model across seasons and different agronomic conditions.

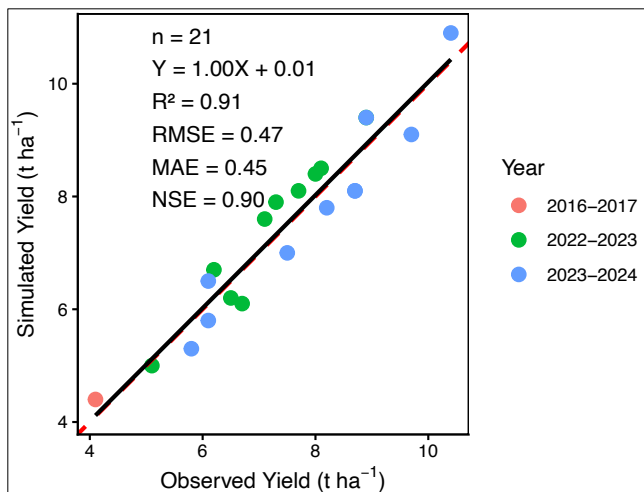


Figure 6-9 : Relationship between simulated and observed maize grain yield in the blocks. The solid line represents the linear regression line, and the broken line represents the 1:1 line, the best-fit line.

6.5.3. Performance of the APSIM model in predicting yields

Analysis of simulated and observed yields in the different blocks indicates that the APSIM model is capable of accurately reproducing maize grain yield production trends (Tableau 6-8). The results show that for the 2022-2023 and 2023-2024 seasons, the simulated values generally remain close to the observations, with moderate differences between the two. The blocks that benefited from subsoiling and amendment with termite mound materials (B1-B10) show higher yields, reaching 10.4 t ha⁻¹ in 2023-2024 for B4, reflecting the positive effect of these interventions on productivity. Conversely, the control block (B0) in 2016-2017, without subsoiling or the addition of termite mound materials, showed a lower yield (4.1 t ha⁻¹ observed versus 4.4 t ha⁻¹ simulated), highlighting the limiting effect of the properties of unamended plinthosols on maize production.

Although the accuracy of the model is generally satisfactory, some differences are observed, particularly in B5 (2022-2023) and B9 (2023-2024), where the differences between observed and simulated yields exceed 0.5 t ha⁻¹, suggesting possible adjustments to the model based on the specific conditions of these blocks.

Tableau 6-8 : Measured and simulated maize grain yield in the blocks. B1-B10: blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound materials. B0: control without subsoiling and amendment with termite mound materials. (-) indicates that no yield measurement or simulation was available for that block during the corresponding growing season.

Block	Maize Grain Yield (t ha ⁻¹)					
	2022-2023		2023-2024		2016-2017	
	Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred
B0	(-)	(-)	(-)	(-)	4.1	4.4
B1	7.1	7.6	8.7	8.1	(-)	(-)
B2	8.1	8.5	8.9	9.4	(-)	(-)
B3	7.3	7.9	8.2	7.8	(-)	(-)
B4	8.9	9.4	10.4	10.9	(-)	(-)
B5	6.7	6.1	9.7	9.1	(-)	(-)
B6	6.1	6.5	6.1	6.4	(-)	(-)
B7	8.0	8.4	8.7	8.1	(-)	(-)
B8	5.1	5.0	5.8	5.3	(-)	(-)
B9	7.7	8.1	6.1	5.8	(-)	(-)
B10	6.2	6.7	7.5	7.0	(-)	(-)

6.6. Discussion

6.6.1. Evaluation of the accuracy of LAI derived from Sentinel-2 and its simulation with APSIM

The integration of Sentinel-2 imagery in LAI estimation enabled effective monitoring of maize canopy dynamics across the different blocks. The use of the Simple Ratio (SR) index proved relevant, as it is less prone to spectral saturation than other indices (e.g., NDVI, EVI) and is better suited to variable canopy densities (Cohrs et al., 2020; Joseph. White et al., 1997). The strong correlation between observed and simulated LAI values ($R^2 = 0.86$; $NSE = 0.67$) indicates that the APSIM model accurately reproduced the main growth stages, particularly the expansion phase followed by progressive senescence, consistent with maize phenology (Holzworth et al., 2014; Jin et al., 2017).

The differences observed among blocks nevertheless reflect the influence of local conditions on canopy response. Blocks showing slightly lower LAI values (e.g., B8) may have been affected by differences in compaction, texture, or water availability, which influence root growth and water uptake (Mountrakis et al., 2011; Prudnikova et al., 2019). In this block, although subsoiling and amendment were implemented, soil variability could result from uneven subsoiler penetration depth or an uneven distribution of termite mound material within the plot, leading to locally less improved

zones and slightly limited canopy development. This may also suggest an insufficient first pass of the subsoiler in that block.

The model also satisfactorily reproduced the LAI dynamics in the control block (B0), confirming its ability to represent foliar growth processes under restrictive soil conditions. The absence of marked differences between the control and some improved blocks could be explained by a relative homogeneity of canopy cover at full growth stage, or by the model's limited sensitivity to certain fine structural soil variables (e.g., bulk density, macroporosity, micro-aggregation) whose spatial variability is not explicitly represented in APSIM, as well as by the spatial resolution of Sentinel-2 data, which tends to smooth local canopy contrasts and reduce the detection of intra-plot variability (Song et al., 2024). Nevertheless, the results suggest that termite mound amendments contributed to improving soil structure, porosity, and stability, thereby promoting better water infiltration and enhanced rhizosphere aeration. These conditions supported more efficient root expansion, improved light interception, and more stable photosynthetic activity throughout the growing cycle. These findings are consistent with Santos et al. (2020) and Dilla et al. (2018), confirming that LAI is a sensitive indicator of soil structure, water status, and foliar development interactions.

6.6.2. Evaluation of the performance of the APSIM model for simulating maize grain yields

The yield simulations obtained with APSIM ($R^2 = 0.91$; NSE = 0.90) confirm the robustness of the model and its ability to generalize production trends observed across seasons and blocks. These results are consistent with those of Song et al. (2010) and Robertson et al. (2005), who demonstrated the reliability of APSIM in predicting maize grain yield across diverse pedoclimatic conditions.

The LAI dynamics described above directly explain the yield patterns obtained. Indeed, a more stable and prolonged leaf development in the improved blocks favored greater light interception, leading to higher cumulative photosynthesis and, consequently, greater carbon assimilation for grain formation (Host et al., 2020). These results confirm the role of LAI as an integrative indicator of maize physiological vigor, linking soil structural conditions to final productivity (Dilla et al., 2018; Jin et al., 2017).

The productivity gap between the control block (B0) and the improved blocks (B1–B10), although moderate, illustrates the positive effect of subsoiling and termite mound amendments on crop performance. These materials are rich in fine particles, calcium, magnesium, and stable organic matter, which improve cation exchange capacity and availability of essential nutrients (Ackerman et al., 2007; Adhikary et al., 2016; Chisanga et al., 2020; Jouquet et al., 2016). Their incorporation into the cultivated horizon increases porosity and available water capacity while reducing bulk density, thus promoting better root exploration and more efficient carbon translocation to grains (Padonou et al., 2020; Ramadhan & Alfaris, 2023).

In parallel, termite mound materials host an active microflora and microfauna that enhance progressive mineralization of organic matter and stimulate soil biological activity (Brauman, 2000; Duponnois et al., 2005, 2006). These biological dynamics, coupled with improved physical structure, sustain a more continuous nitrogen and phosphorus supply, contributing to stronger vegetative growth and a more complete grain filling (Chen et al., 2023).

Conversely, unimproved plinthosols are characterized by low hydraulic conductivity, high mechanical resistance, and reduced biological activity, which limit root growth and nutrient uptake (De Azevedo & Bueno, 2017; Dos Anjos et al., 2019; WRB, 2022).

The moderate discrepancies between simulated and observed values in some blocks (e.g., B5 and B9, $> 0.5 \text{ t ha}^{-1}$) may arise from uncertainties in input data (meteorology, soil properties), incomplete parameterization of the root profile, or microclimatic variability not captured by gridded data. Future studies could include local meteorological measurements, along with data on root vertical distribution and the active organic matter fraction, to refine calibration and improve the representation of water and nutrient fluxes in the model. (Holzworth et al., 2018) emphasized that a finer optimization of coefficients related to soil properties and biotic factors can significantly improve the accuracy of APSIM's growth and yield simulations. Furthermore, the consistency of APSIM performance across contrasting blocks suggests that, with appropriate soil and climate parameterization, the model can be effectively adapted to other plinthic and ferrallitic environments in sub-Saharan Africa, thereby extending its applicability beyond the study site.

Finally, beyond model validation, these results highlight the relevance of combining biophysical modeling and remote sensing for spatial assessment of cropping practices. This integrated approach provides a solid basis for the development of decision support systems (DSSs) and sustainable intensification strategies in sub-Saharan Africa. The integration of APSIM with high-resolution satellite data also opens promising perspectives for precision agriculture, enabling the identification of water stress zones and the targeted management of inputs.

6.7. Conclusions

This study confirmed the ability of the APSIM model to accurately simulate maize growth and yield on subsoiled plinthosols amended with termite mound materials in Lubumbashi. The integration of APSIM and Sentinel-2 data provided reliable estimates of leaf area index and yield, successfully reproducing the positive effects of soil improvement practices on productivity. However, slight discrepancies between simulated and observed values highlight the need for refined calibration, supported by complementary datasets such as local meteorological observations, measurements of root vertical distribution, belowground biomass dynamics, and the active organic matter fraction. Incorporating these variables would enhance the representation of soil-plant interactions and improve predictive accuracy. From an operational perspective, the APSIM-Sentinel-2 framework offers strong potential as a decision

support tool for crop monitoring and the optimization of management practices in near-real time. Overall, this modeling framework provides a robust scientific basis for promoting sustainable intensification, that is, increasing productivity while preserving soil quality and environmental integrity, and for strengthening the climate resilience of maize production systems on degraded or plinthic soils in southern DRC and similar sub-Saharan agroecological zones.

Chapitre 7

Discussion générale

7.1. Comprendre les dynamiques pédogénétiques pour éclairer les contraintes des plinthosols

L'analyse critique de la littérature montre que la plinthite constitue un élément structurant des paysages tropicaux, non seulement par sa distribution spatiale, dont plus de 60 millions d'hectares à l'échelle intertropicale (WRB-IUSS, 2015), mais surtout par l'ensemble des processus pédogénétiques, hydrologiques et biochimiques qu'elle gouverne. Loin d'être une simple curiosité morphologique, la plinthite impose des contraintes systématiques aux agroécosystèmes tropicaux. C'est précisément cette articulation entre processus de formation, expression géomorphologique et conséquences agronomiques qui apparaît déterminante pour comprendre les limites fonctionnelles des plinthosols et pour orienter les stratégies de restauration testées dans cette thèse.

La dynamique pédogénétique à l'origine de la plinthite résulte d'un couplage fort entre le climat tropical saisonnier, l'hydrodynamique du sol et la composition du matériau parental. Les cycles répétés de réduction–oxydation, eux-mêmes produits par l'alternance d'engorgement et de dessiccation constituent la clé de voûte de la mobilisation, du transfert et de la précipitation des oxydes de fer (Dos Anjos et al., 1995; Jacobs et al., 2002; Nahon, 2003). Sous saturation, le fer est réduit et déplacé ; lors du ressuyage, il se réorganise en phases plus cristallisées telles que goethite, hématite ou ferrihydrite (Miguel et al., 2013; Payton et al., 1992), consolidant progressivement les horizons plinthitiques. Le rôle de l'anthropisation, notamment via le défrichage et l'augmentation de l'exposition des horizons superficiels, accélère ensuite le durcissement irréversible en pétroplinthite (Eghbal et al., 2012; Martins et al., 2018b).

Ces mécanismes ne s'expriment toutefois pas de manière uniforme : ils sont modulés par la lithologie composée des matériaux issus de roches basiques altérées favorisant la plinthisation (Giorgis et al., 2014; Quesada et al., 2011), et par la topographie, les zones de bas-fond ou de drainage imparfait constituant des niches particulièrement propices (Asiamah, 1999; Osher & Buol, 1998; Seibert et al., 2007). L'impact de ces organisations sur le fonctionnement des paysages est majeur : les horizons plinthitiques créent des discontinuités hydrauliques, guident les écoulements latéraux, modèlent la segmentation fonctionnelle des versants et participent parfois à l'inversion du relief (Laurent et al., 2017). La plinthite apparaît ainsi comme un véritable marqueur morpho-géochimique des paléoenvironnements tropicaux (Alexandre, 2002; Widdowson, 2009), dont l'expression actuelle reflète des héritages pédologiques très anciens et largement irréversibles à l'échelle humaine.

Ces trajectoires pédogénétiques expliquent la sévérité des contraintes agro-environnementales aujourd'hui observées dans les plinthosols, où s'articulent un verrou physique et chimique étroitement interdépendants. Le verrou physique se manifeste par une perméabilité très faible, une densité apparente élevée, l'engorgement périodique et une profondeur exploitable limitée, autant de facteurs qui réduisent l'allongement racinaire, diminuent la capacité de stockage de l'eau et

augmentent la vulnérabilité des cultures aux stress hydriques courts (Daniels et al., 1978; de Moraes et al., 2006; Shaw et al., 1997). Le verrou chimique se superpose à ces limitations : l'acidité marquée, la faiblesse de la CEC, la pauvreté en matière organique et en bases cationiques, ainsi que l'immobilisation du phosphore par les oxydes de fer et d'aluminium (Costantini & Priori, 2007; Garcia et al., 2013) réduisent fortement la disponibilité des nutriments. Dans les environnements acides, ces conditions favorisent en outre la toxicité aluminique et manganique, bien documentée comme facteur inhibant la division cellulaire, la croissance racinaire et l'efficacité photosynthétique (Sanchez, 2018; Stoyanova et al., 2009).

À cette dimension intrinsèque s'ajoutent des effets rétroactifs sur la dynamique érosive. La présence d'une couche indurée proche de la surface limite l'infiltration profonde, intensifie le ruissellement et accélère l'érosion des horizons supérieurs (Eswaran et al., 1990; Oluwatosin et al., 2020). Une fois exposée, la plinthite se durcit rapidement, formant des cuirasses quasi stériles où la restauration agronomique devient extrêmement difficile (Panagos et al., 2013; Yaro et al., 2006). Ces mécanismes sont cumulatifs, auto-renforçants et, surtout, asymétriques : une dégradation superficielle de quelques centimètres peut suffire à enclencher un processus irréversible à l'échelle de plusieurs générations.

Dans ce contexte, les stratégies de gestion décrites dans la littérature apparaissent souvent fragmentaires. Les amendements organiques augmentent temporairement l'activité biologique (Kumar et al., 2018), les techniques CES (conservation de l'eau et des sols) atténuent la variabilité hydrique locale (Wildemeersch et al., 2015), les amendements calciques corrigent l'acidité superficielle (Asiamah & Dwomo, 2010; Nyachiro & Briggs, 1987), mais aucune de ces pratiques ne s'attaque simultanément à la contrainte physique profonde et au déficit chimique structurel. La plinthite, par son origine pédogénétique et son comportement hydromécanique, nécessite des interventions capables d'agir sur plusieurs compartiments du sol à la fois.

Cette lacune scientifique constitue le moteur de la démarche adoptée dans cette étude, en cherchant à comprendre dans quelle mesure des interventions mécaniques profondes en particulier le sous-solage, capable de fragmenter les horizons plinthitiques discontinus combinées à des amendements issus des matériaux de termitières peuvent recomposer au moins partiellement, les fonctions physiques, hydriques et chimiques des plinthosols.

Au-delà d'une juxtaposition de pratiques, l'originalité de l'approche testée réside dans une logique d'interaction "mécanique × amendements". Le sous-solage agit comme un levier structural en augmentant le volume de sol accessible, la continuité porale et la percolation, tandis que les matériaux de termitières agissent comme un levier biogéochimique en régulant l'acidité, en enrichissant le complexe adsorbant et en modifiant la qualité de la rhizosphère. L'hypothèse centrale n'est donc pas un effet additif, mais une synergie : l'amélioration chimique n'est pleinement valorisée que si la contrainte physique est partiellement levée, et inversement l'amélioration structurale ne se traduit en gains agronomiques durables que si la contrainte chimique est atténuée.

7.2. Organisation spatiale, processus fonctionnels et effets intégrés du sous-solage et des matériaux de termitières sur les plinthosols du site d'étude

Les résultats cartographiques montrent que le périmètre expérimental ne constitue pas un ensemble pédologique homogène, mais une mosaïque de plinthosols. Cette mosaïque permet d'observer, à l'échelle d'un même agroécosystème, comment la restauration s'organise selon deux axes fonctionnels complémentaires : (i) une restauration structurale (profondeur exploitable, continuité hydraulique) et (ii) une restauration chimique (désacidification, enrichissement en bases, réduction de la phytotoxicité métallique). La variabilité spatiale des réponses suggère que ces deux dimensions ne progressent pas nécessairement au même rythme, ce qui explique la coexistence de zones quasi restaurées et de zones où l'héritage plinthitique demeure dominant. La profondeur du sol apparaît comme l'un des axes majeurs de structuration de cette mosaïque. Les cartes montrent en effet des secteurs où l'épaisseur exploitable est inférieure à 9 cm, avec affleurement ou quasi-affleurement de la cuirasse ferrugineuse au centre du périmètre, tandis que des profondeurs plus importantes caractérisent les positions de bas de versant et les zones proches de la rivière. Cette configuration est typique des paysages plinthitiques, où la présence d'horizons indurés limite l'enracinement, impose un perchage hydrique et gouverne fortement la distribution spatiale de la fertilité (Brogowski & Kwasowski, 2012; Daniels et al., 1978; de Moraes et al., 2006; WRB, 2022).

Le sous-solage a permis d'augmenter localement la profondeur exploitable, mais les secteurs très peu profonds demeurent structurellement contraignants, suggérant que des interventions supplémentaires seraient nécessaires pour rendre ces zones pleinement fonctionnelles. Dans cette optique, la profondeur 0–40 cm, rendue effectivement exploitable par l'action de la sous-soleuse lors des travaux mécaniques, peut être considérée comme un horizon fonctionnel hybride, combinant l'empreinte géochimique du substrat plinthitique et les effets récents des interventions mécaniques et biogéochimiques. Cette profondeur ne correspond toutefois pas à une couche uniforme sur l'ensemble du site, mais représente la profondeur cible atteinte dans les secteurs où l'action du sous-solage a été la plus efficace.

Sur le plan chimique, tant dans l'horizon de surface (0–10 cm) que dans la zone rendue exploitable après sous-solage (0–40 cm), les contrastes marqués de pH, depuis des valeurs fortement acides jusqu'à une alcalinité modérée, reflètent l'influence de l'apport hétérogène des matériaux de termitières. Ces derniers, riches en CaCO_3 et en cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+}), exercent un rôle important dans la neutralisation de l'acidité : le carbonate de calcium réagit avec les protons (H^+), élève le pH et réduit la solubilité de l'aluminium et du manganèse sous leurs formes toxiques, mécanisme bien documenté dans les sols tropicaux (Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2015; Mujinya et al., 2013; Sanchez, 2018). Les zones où le pH tend vers la neutralité reflètent ainsi une expression variable de ce processus de désacidification. Toutefois, la présence ponctuelle de valeurs de pH supérieures à 8 indique qu'une alcalinisation

locale peut se produire lorsque les apports carbonatés sont concentrés. Il convient néanmoins de souligner que ces valeurs élevées demeurent spatialement limitées et résultent probablement d'un effet transitoire lié à la dissolution progressive des carbonates abondants dans les matériaux des termitières. Dans un contexte tropical caractérisé par des pluies saisonnières importantes, les carbonates tendent à se dissoudre et à être redistribués dans le profil, ce qui suggère que ces pics alcalins pourraient s'atténuer au cours du temps. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'Erens et al. (2015) et Mujinya et al. (2010), qui ont rapporté des valeurs de pH atteignant 8 dans les matériaux de termitières de la région de Lubumbashi.

Du point de vue agronomique, le maïs présente une plage de tolérance relativement large vis-à-vis du pH du sol, avec un optimum généralement compris entre 5,5 et 7,1 (Baquy et al., 2018), mais une capacité d'adaptation pouvant s'étendre jusqu'à des valeurs proches de 8 selon les conditions nutritionnelles (Nordquist et al., 1996). Des recherches récentes montrent des mécanismes (ex. sécrétion d'acides organiques par les racines, adaptations génétiques) par lesquels certaines variétés de maïs peuvent atténuer les effets du stress alcalin et continuer à croître, ce qui est cohérent avec une capacité d'adaptation à des $\text{pH} > 7.5$ dans certaines conditions (Liu et al., 2025b).

Dans le contexte étudié, initialement marqué par une forte acidité et une toxicité aluminique potentielle, l'élévation du pH vers la neutralité constitue un levier agronomique majeur. Les valeurs ponctuellement supérieures à 8 peuvent toutefois réduire la disponibilité de certains micronutriments (notamment Fe, Zn et Mn), ce qui souligne l'importance d'une gestion raisonnée des doses et des modalités d'incorporation des matériaux de termitières ainsi que d'un suivi nutritionnel adapté. Le choix du maïs se justifie par son importance stratégique dans les systèmes agricoles du Haut-Katanga (Nyembo et al., 2018), son adaptation aux pratiques locales de gestion du sol et sa capacité à valoriser l'amélioration de la profondeur exploitable et de la disponibilité en bases échangeables observée après restauration.

Le carbone organique total et le phosphore demeurent globalement faibles à l'échelle du site, traduisant la pauvreté intrinsèque caractéristique des sols plinthitiques et ferrallitiques tropicaux (Dos Santos et al., 2018; Kasongo, 2008; Sanchez, 2018; Sanchez et al., 2003). Concernant le carbone organique, plusieurs travaux indiquent que les matériaux de termitières présentent eux-mêmes des teneurs relativement faibles en carbone, ce qui peut expliquer l'effet limité de ces amendements sur l'enrichissement organique du sol (Erens et al., 2015; Mujinya et al., 2013). Pour le phosphore, sa faible disponibilité observée, malgré l'apport d'amendements, s'explique principalement par les processus de fixation sur les oxydes de fer et d'aluminium abondants dans les horizons plinthitiques. Ces oxydes exercent une forte capacité de sorption du phosphore, réduisant sa mobilité et sa biodisponibilité dans les sols tropicaux fortement altérés (Gotz et al., 2024; Rotta et al., 2015; Sanchez, 2018; Tshibangu et al., 2022).

La distribution des cations basiques disponibles (Ca, Mg et K) révèle des zones ponctuelles de fertilité accrue, étroitement associées à une incorporation plus marquée des matériaux de termitières. Les teneurs en calcium, magnésium et potassium

peuvent localement atteindre, en surface, respectivement plus de 18 267 mg kg⁻¹, 2 987 mg kg⁻¹ et 942 mg kg⁻¹, confirmant la forte richesse nutritionnelle des matériaux de termitières et leur rôle dans l'enrichissement chimique des horizons superficiels (Abe et al., 2011; Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2016; Kpangba et al., 2020; Mujinya et al., 2013; Ou et al., 2025). Ces teneurs sont nettement supérieures aux valeurs de référence généralement rapportées pour les sols du Haut-Katanga, où les concentrations en calcium, magnésium et potassium dans les plinthosols non amendés demeurent habituellement faibles à modérées (Kasongo, 2008; Ngongo et al., 2009). Plus largement, dans de nombreux sols tropicaux acides, les teneurs en cations basiques restent généralement inférieures à ~1 000–1 600 mg kg⁻¹ pour le calcium, ~120–240 mg kg⁻¹ pour le magnésium et ~80–120 mg kg⁻¹ pour le potassium (Havlin et al., 2016; Sanchez, 2018). Les valeurs observées dans la présente étude dépassent largement ces ordres de grandeur, ce qui souligne l'impact chimique marqué de l'amendement par les matériaux de termitières sur l'enrichissement des horizons superficiels en cations basiques.

L'origine de ces concentrations élevées en cation basiques est principalement biogénique. Trapnell et al. (1976) ont montré que les termites du genre *Macrotermes* concentrent activement le calcium à partir des matériaux végétaux ingérés, notamment le bois et la litière riches en Ca, lesquels sont ensuite incorporés dans les monticules au cours des processus de construction et de bioturbation. Toutefois, les teneurs excessives en calcium observées localement appellent à une gestion prudente des apports, afin d'éviter une alcalinisation excessive du sol et l'apparition de déséquilibres nutritionnels, notamment par antagonisme avec certains micronutriments (Lehto, 1994; Sediqi et al., 2024).

À l'inverse, la répartition spatiale du fer, de l'aluminium, du cuivre et du manganèse témoigne de la forte empreinte plinthitique du site. Leur distribution hétérogène, peu modifiée par l'apport des matériaux de termitières, reflète à la fois leur rôle structural majeur dans l'organisation minéralogique des horizons riches en plinthe et leur implication fonctionnelle dans les processus biogéochimiques du sol. De nombreux travaux indiquent que les plinthosols présentent naturellement des teneurs élevées en Fe, Al, Cu et Mn, héritées des processus de ferrallitisation et d'accumulation des oxydes métalliques (Garcia et al., 2013; Nahon, 2003; Ngon Ngon et al., 2009; Silva Martins et al., 2012; Yoboue et al., 2019). Ces éléments jouent un rôle central dans la fixation du phosphore par adsorption sur les oxydes de fer et d'aluminium et conditionnent, selon le pH et l'état redox du sol, l'expression de toxicités aluminique et manganique susceptibles de limiter l'enracinement et la nutrition des cultures (Gotz et al., 2024; Laurent & Brossard, 1991; Tshibangu et al., 2022). Si les concentrations mesurées se situent majoritairement dans des plages considérées comme adéquates à modérément élevées pour le maïs, certaines zones présentent néanmoins des teneurs dépassant les seuils généralement admis, en particulier pour le manganèse (> 250–300 mg kg⁻¹) et l'aluminium (≈ 90–180 mg kg⁻¹), suggérant un risque localisé de contraintes chimiques persistantes (Foy et al., 1978; Ryder et al., 2003).

La comparaison entre l'horizon de surface (0-10 cm) et la zone rendue exploitable après sous-solage (0-40 cm) montre, contrairement à la stratification marquée classiquement observée dans les ferralsols, une distribution relativement homogène des nutriments entre les deux horizons. Cette homogénéité traduit une modification profonde du fonctionnement du sol induite par les pratiques culturales, en particulier le sous-solage, qui a rompu les discontinuités physiques du profil et favorisé la circulation verticale de l'eau et la redistribution des éléments nutritifs. La réduction des gradients verticaux pour le Ca, le Mg, le K et le Cu témoigne ainsi de la mise en place d'un volume de sol fonctionnellement continu, désormais accessible au système racinaire, conformément aux effets reconnus du sous-solage (Alonso et al., 2023; Huang, et al., 2024a ; Liu, et al., 2024a; Šarauskis et al., 2024; Sun et al., 2023; Wang et al., 2023b; Xie et al., 2024).

Malgré cette redistribution, la matière organique et le phosphore assimilable restent significativement plus élevés dans l'horizon 0–10 cm. Ce maintien d'un gradient superficiel reflète la dominance des processus biologiques dans cet horizon enrichi par les matériaux de termitières, caractérisés par des apports organiques stabilisés, des particules fines et une forte activité microbienne (Brauman, 2000; Chen et al., 2023; Duponnois et al., 2005; Jouquet et al., 2002). Le carbone organique y est continuellement renouvelé, favorisant la rétention des nutriments, tandis que le phosphore demeure fortement fixé en profondeur par les oxydes de fer et d'aluminium dominants des plinthosols, limitant sa migration verticale (Gotz et al., 2024; Hinsinger, 2001; Sanchez, 2018).

Les observations issues des profils pédologiques confirment et complètent les analyses spatiales en révélant une forte hétérogénéité verticale des propriétés physico-chimiques, reflet de l'interaction entre l'héritage plinthitique et les effets différenciés du sous-solage et des amendements aux matériaux de termitières. Les valeurs de pH, variant de conditions acides à légèrement alcalines selon les horizons, traduisent une amélioration globale de l'environnement chimique de la zone racinaire, tout en indiquant la persistance d'une acidité d'échange en profondeur, décelé par l'écart entre pH eau et pH KCl. Ce comportement est caractéristique des sols tropicaux fortement altérés, où les oxydes de fer et d'aluminium maintiennent des réserves d'acidité malgré une élévation du pH en surface (Kasongo, 2008; Kasu-Bandi et al., 2019; Sanchez, 2018; WRB, 2022). La distribution du carbone organique, avec des teneurs maximales dans certains horizons Ap, reflète un enrichissement localisé lié à l'incorporation des matériaux de termitières et à l'intensification des processus biologiques de surface, sans enrichissement durable des horizons profonds, comme largement documenté dans les systèmes plinthitiques (Asiamah & Dwomo, 2010; Kumar et al., 2018; Wildemeersch et al., 2015). De même, la faible disponibilité globale du phosphore, malgré des enrichissements ponctuels, confirme sa forte fixation par les oxydes de Fe et d'Al, limitant sa mobilité verticale et son accessibilité dans la zone racinaire profonde (Gotz et al., 2024; Hinsinger, 2001; Rotta et al., 2015; Sanchez, 2018).

La distribution des cations basiques disponibles, globalement élevée mais spatialement hétérogène, illustre l'apport nutritif substantiel des matériaux de termitières, riches en cations basiques et en particules fines, tout en soulignant que ces enrichissements restent majoritairement concentrés dans les horizons travaillés (Adhikary et al., 2016; Erens, Mujinya, et al., 2015; Jouquet et al., 2015, 2016; Mujinya et al., 2013). Leur diminution progressive avec la profondeur traduit la persistance des contraintes liées à la géométrie des horizons plinthitiques et à la continuité limitée de la porosité verticale, même après sous-solage (Fritsch et al., 2007). À l'inverse, la répartition du fer, de l'aluminium, du manganèse et du cuivre, peu affectée par les amendements, atteste du contrôle dominant de l'héritage géochimique du matériau parental. Ces éléments structurent durablement le fonctionnement chimique du profil, interviennent dans la fixation du phosphore et conditionnent l'expression de toxicités aluminique et manganique lorsque l'acidité persiste (Gotz et al., 2024; Rotta et al., 2015; Sanchez, 2018; Tshibangu et al., 2022). L'ensemble des profils démontre une restauration fonctionnelle partielle, mais significative des plinthosols, caractérisée par l'amélioration des horizons superficiels et intermédiaires, tandis que les contraintes profondes héritées de la plinthite continuent de limiter la durabilité agronomique à long terme (Sanchez, 2018; WRB, 2022).

L'analyse intégrée des propriétés du sol dans la zone rendue exploitable par les racines (0–40 cm) met en exergue un système pédologique façonné par l'interaction entre des processus hérités de la pédogenèse plinthitique et des interventions agronomiques induits par le sous-solage et l'amendement aux matériaux de termitières. L'examen multivarié révèle trois processus fonctionnels majeurs structurant le fonctionnement actuel du profil.

Le premier processus est dominé par les cations basiques disponibles (Ca, Mg, K), les éléments traces (Cu, Mn) et les indicateurs de l'acidité. Il traduit une régulation acido-basique typique des sols tropicaux enrichis en cations basiques. L'augmentation du pH, consécutive à l'enrichissement du complexe adsorbant, limite la solubilité du manganèse sous ses formes phytotoxiques, un mécanisme largement documenté dans les sols acides amendés (Luo et al., 2025; Wala et al., 2025). La redistribution verticale de ces cations, favorisée par la fracturation mécanique du profil, suggère une amélioration de la continuité verticale des flux hydriques et nutritifs au sein de la zone racinaire.

Le deuxième processus associe étroitement la matière organique, le carbone organique total et l'aluminium, illustrant le rôle central de la matière organique dans la complexation de l' Al^{3+} , contrainte chimique majeure des sols tropicaux acides. Les matériaux de termitières, riches en complexes organo-minéraux stabilisés, renforcent cette fonction tampon, améliorent la stabilité structurale et réduisent la toxicité aluminique au niveau des apex racinaires (Bell et al., 2024; Hernandez-Soriano & Jimenez-Lopez, 2012). Ce mécanisme est particulièrement déterminant dans les plinthosols, où la contrainte spatiale imposée par la plinthite accentue la sensibilité du système racinaire aux stress chimiques.

Le troisième processus repose sur l'association étroite entre le fer et le phosphore, traduisant le contrôle pédogénétique classique exercé par les oxydes de Fe et d'Al sur la disponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques et plinthitiques. Si le sous-solage ne modifie pas la nature chimique de cette fixation, il accroît néanmoins le volume de sol effectivement exploré par les racines, augmentant la probabilité d'accéder à des micro-zones où le phosphore peut être temporairement mobilisé (Laurent & Brossard, 1991; Plassard et al., 2015; Sanchez, 2018).

Pris dans leur ensemble, ces processus indiquent que l'organisation actuelle du sol ne procède pas d'une simple juxtaposition de propriétés physico-chimiques, mais de l'expression intégrée d'un héritage pédogénétique plinthitique profondément remanié par les interventions anthropiques. Le profil se structure désormais selon une organisation fonctionnelle hiérarchisée, opposant une zone superficielle remaniée, enrichie et mieux régulée du point de vue acido-basique et hydrique, à une zone sous-jacente dominée par la plinthite, dont la compacité et la forte teneur en oxydes de fer continuent de contraindre l'enracinement et les flux verticaux. Cette configuration témoigne d'une trajectoire de restauration partielle mais effective, dans laquelle les interventions mécaniques profondes et les apports biogéniques n'effacent pas l'empreinte pédogénétique héritée, mais en reconfigurent les effets fonctionnels. Elle souligne que l'amélioration durable des plinthosols repose sur une articulation étroite entre actions physiques, enrichissements organo-minéraux et compréhension fine des processus pédogénétiques qui contrôlent la dynamique chimique et hydrique du profil.

7.3. Réponses physiques et hydriques des profils plinthitiques améliorés sous l'effet du sous-solage et des matériaux de termitières

L'examen intégré des profils pédologiques montre que l'association du sous-solage et des matériaux de termitières a entraîné une reconfiguration profonde, mais inégale du fonctionnement du sol, mettant simultanément en lumière les contraintes intrinsèques des plinthosols et les limites structurelles de leur remise en état. Les variations granulométriques observées entre blocs traduisent d'abord l'héritage pédogénétique du matériau parental. La différenciation verticale, marquée par une augmentation progressive des teneurs en argile dans les horizons profonds, s'inscrit dans le schéma classique d'illuviation caractéristique des environnements tropicaux très altérés (Sanchez et al., 2003). Ce processus, résultant du transfert préférentiel de particules fines vers les horizons associés à la plinthite, a été largement documenté par Fritsch et al. (2007), Nahon (2003) et précisé dans la classification WRB (2022). À l'inverse, la dominance plus marquée des fractions sableuses dans plusieurs horizons superficiels porte la signature d'une longue histoire d'érosion, de décapage superficiel et de perturbations anthropiques, phénomènes fréquents dans les paysages ferrallitiques cultivés soumis à des dynamiques rapides d'altération et de lessivage (Kasongo, 2008; Sanchez, 2018).

Si cette organisation texturale verticale reflète la structure naturelle des plinthosols, l'introduction de matériaux de termitières en modifie sensiblement l'expression,

notamment dans l'horizon supérieur. La richesse de ces matériaux en argiles fines, en complexes organo-minéraux stabilisés et en cations basiques tel que décrites par Jouquet et al. (2015) et Mujinya et al. (2013), contribue à renforcer la cohésion, la stabilité structurale et l'aptitude à la rétention hydrique des horizons de surface. Toutefois, leur efficacité dépend fortement du degré de fragmentation préalable du profil. Là où le sous-solage a efficacement rompu les lentilles compactées ou sub-indurées, leur incorporation est nette et s'accompagne d'une transformation tangible des horizons Ap. À l'inverse, lorsque la plinthite demeure à faible profondeur ou que le travail mécanique n'a pas été suffisamment profond ou homogène, l'amendement n'affecte que les premiers centimètres et ses effets restent plus modestes.

La densité apparente illustre parfaitement cette structure stratifiée du profil. Les horizons de surface affichent des valeurs relativement faibles, compatibles avec une porosité accrue et un meilleur équilibre aéro-hydrique, conformes aux gammes décrites pour les sols tropicaux cultivés (Brady & Weil, 2008). Cependant, cette densité augmente rapidement avec la profondeur pour atteindre près de $1,9 \text{ g cm}^{-3}$ dans les horizons plinthitiques, valeurs typiques d'un matériau compact à porosité restreinte. Cette transition verticalisée correspond aux observations de la FAO (2001), sur la pétroplinthite et atteste de la persistance d'un horizon contraignant malgré les travaux mécaniques. Elle constitue l'un des déterminants majeurs de la circulation de l'eau, de la pénétration racinaire et de la distribution des nutriments, rappelant que l'effet profond du sous-solage reste conditionné par la nature même des constituants plinthitiques et leur variabilité spatiale.

Les propriétés hydrauliques renforcent ce constat. Les valeurs élevées de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) dans les horizons superficiels traduisent une amélioration de la connectivité porale et une infiltration nettement plus rapide, c'est qui est une marque directe du travail mécanique et de l'incorporation de matériaux finement structurés. En revanche, la chute abrupte de K_{sat} dans les horizons plinthitiques profondes révèle la persistance d'une barrière hydrodynamique robuste. Les résultats concordent avec ceux de Moraes et al. (2006), Jacobs et al. (2002), et Liu et al. (2020) qui montrent que la plinthite, même fracturée, conserve une micro-structure à porosité serrée et à faible perméabilité. Les observations de Wu et al. (2010), soulignant que l'augmentation durable de la perméabilité d'un horizon plinthitique nécessite des interventions chimiques lourdes, confirment la difficulté à lever cette contrainte par les seules actions mécaniques.

L'analyse des paramètres hydriques, notamment la capacité au champ et le point de flétrissement, révèle une réponse essentiellement superficielle du profil. L'augmentation de la capacité au champ dans les premiers centimètres s'explique par la multiplication des mésopores issus de l'apport de matériaux de termitières, alors que le maintien de valeurs élevées du point de flétrissement en profondeur révèle une proportion substantielle de micropores retenant l'eau sous des potentiels élevés, donc peu accessibles aux plantes. Cette configuration, décrite par Dalmago et al. (2009) ainsi que Feiza et al., (2015), confirme que l'essentiel de la réserve en eau utile se concentre désormais dans les 30 à 40 premiers centimètres, c'est-à-dire dans la zone

effectivement rendue fonctionnelle par le sous-solage. Les travaux récents de Alonso et al. (2023), Wang et al. (2023b), Wu et al. (2024), Yang et al. (2024), et Liu et al. (2024a) montrent d'ailleurs que les effets positifs du sous-solage sur l'hydrodynamique du profil dépendent étroitement de l'interaction entre texture, profondeur exploitée et connectivité porale.

L'ensemble de ces résultats conduit à un constat central : le sol, après intervention, adopte un fonctionnement bifonctionnel. Les horizons superficiels, restructurés, enrichis et mieux connectés hydrauliquement, constituent désormais une zone racinaire efficace, favorable à l'infiltration, à la rétention et à la distribution de l'eau. Les horizons profonds, dominés par la plinthite, demeurent en revanche un déterminant géologique pesant, difficilement modifiable à court terme et encore fortement contraignant pour l'enracinement. Cette configuration hybride illustre à la fois les potentialités agronomiques ouvertes par l'approche sous-solage + amendement aux matériaux des termitières, et les limites structurelles inhérentes à la morphologie plinthitiques. Elle souligne la nécessité d'une compréhension fine de la géométrie pédologique, condition indispensable pour optimiser la redistribution des amendements et maximiser leurs effets dans des sols où les contrastes physiques demeurent marqués.

La question de la durabilité des gains structuraux doit toutefois être considérée. Bien que le sous-solage profond améliore nettement, à court terme, la continuité porale, la conductivité hydraulique et l'exploration racinaire, ces bénéfices restent fortement conditionnels et peuvent s'atténuer au cours du temps. Dans les sols à horizons plinthitiques, la fracturation mécanique tend à évoluer sous l'effet (i) de la reconsolidation naturelle du profil, (ii) du tassement induit par le trafic des engins et les opérations culturales, et (iii) de la réorganisation de la porosité lors des cycles humidification–dessiccation, pouvant conduire à une diminution progressive de la macroporosité fonctionnelle et à une reprise des limitations mécaniques. La persistance de l'effet dépend ainsi de facteurs clés tels que la texture et la minéralogie, l'humidité du sol au moment de l'intervention, la profondeur réellement atteinte, ainsi que le niveau de protection du sol contre le ruissellement et l'érosion.

Ainsi, la restauration observée dans cette étude doit être interprétée comme une trajectoire potentiellement réversible si elle n'est pas accompagnée de pratiques de gestion visant à limiter la compaction, renforcer l'agrégation et maintenir une couverture protectrice de surface. Dans cette perspective, l'intérêt d'une approche intégrée apparaît central : l'apport de matériaux de termitières, en contribuant à l'amélioration du statut organo-minéral, à la stabilité structurale et à la régulation chimique de la rhizosphère, pourrait favoriser la consolidation des gains induits par le sous-solage. Un suivi pluriannuel des propriétés hydrodynamiques, de la stabilité structurale et de la dynamique du rendement demeure néanmoins nécessaire pour confirmer la robustesse de ces effets à plus long terme.

7.4. Dynamiques de rendement et déterminants agronomiques dans un plinthosol restructuré par le sous-solage et les matériaux de termitières

La forte variabilité spatiale des rendements observés au sein du périmètre expérimental, allant de moins de 2,5 t ha⁻¹ à plus de 11,1 t ha⁻¹, constitue l'indicateur agronomique le plus intégrateur de l'effet combiné du sous-solage et de l'amendement aux matériaux de termitières. Le rendement apparaît ici comme la traduction fonctionnelle la plus directe des transformations induites dans le système sol-plante, révélant à la fois les gains structurels obtenus et les limites locales de la restauration. Cette hétérogénéité reflète la forte variabilité spatiale des conditions édaphiques à l'échelle du site, notamment en termes de profondeur exploitable, de texture, de chimie du sol et de fonctionnement hydrique. Bien que les travaux de sous-solage et l'épandage des matériaux de termitières aient été réalisés de manière opérationnelle sur l'ensemble du périmètre, l'absence de parcelles strictement non traitées ne permet pas d'attribuer formellement cette variabilité à l'une ou l'autre intervention prise isolément.

Néanmoins, les niveaux de rendement atteints sont nettement supérieurs à la moyenne régionale rapportée par FAOSTAT (0,77 t ha⁻¹ en 2023), ainsi qu'aux valeurs généralement observées sous pratiques agricoles traditionnelles dans le Haut-Katanga, où les agriculteurs produisent le plus souvent moins de 1 t ha⁻¹ (Nyembo et al., 2018; Tabu et al., 2023a). Ils dépassent également la plage supérieure des rendements obtenus dans des systèmes améliorés reposant principalement sur la fertilisation minérale, l'amélioration variétale et le progrès génétique ($\approx 1,5\text{--}8,5$ t ha⁻¹; (Banza et al., 2019a; Ilunga et al., 2019; Kimuni Luciens et al., 2012; Tabu et al., 2023b, 2024). Ces performances confirment que la combinaison du sous-solage et des matériaux de termitières a profondément modifié le fonctionnement hydrique, chimique et mécanique des profils plinthitiques, en levant partiellement les contraintes liées à la plinthite. Toutefois, la réponse agronomique demeure fortement spatialisée, traduisant la persistance d'hétérogénéités édaphiques héritées, qui conditionnent localement l'efficacité des interventions et soulignent la nécessité d'une gestion différenciée des sols plinthitiques.

Il convient également de noter qu'avant la mise en œuvre du sous-solage et de l'amendement par matériaux de termitières, les gestionnaires du site rapportaient un rendement moyen d'environ 4,1 t ha⁻¹ pour la saison culturale 2016–2017 sur une parcelle cultivée sans ces interventions (B0). Toutefois, cette parcelle ne couvrait qu'une superficie inférieure à 10 ha, en raison de fortes contraintes physiques liées à la présence de termitières géantes et à la faible profondeur de la cuirasse ferrugineuse. L'horizon plinthitique y était situé à au moins 20 cm de profondeur (Tableau 6-3), offrant localement une zone d'enracinement relativement favorable. Ce rendement relativement élevé peut ainsi s'expliquer par la combinaison d'une contrainte mécanique modérée du profil et de l'effet de la fertilisation minérale appliquée. Malgré cela, les rendements actuellement observés dans les blocs restaurés, atteignant localement plus de 11 t ha⁻¹, dépassent largement ce niveau de référence et concernent

des superficies beaucoup plus étendues. Cela indique que l'approche intégrée associant sous-solage et amendement aux matériaux de termitières a permis d'élargir spatialement et d'intensifier durablement le potentiel productif des plinthosols du site, au-delà des conditions initialement favorables mais très localisées.

Les rendements les plus élevés se situent globalement dans les zones où la profondeur exploitable a nettement augmenté, où le pH a été rapproché de la neutralité, et où le carbone organique ainsi que les cations basiques disponibles (Ca, Mg, K) présentent des niveaux renforcés. Dans ces environnements, les effets combinés du sous-solage et des matériaux de termitières convergent pour lever simultanément les contraintes physiques (faible profondeur utile, compaction, discontinuité porale) et les contraintes chimiques (acidité, toxicité aluminique et manganique). Cette synergie est largement confirmée dans la littérature comme l'un des principaux moteurs de la productivité dans les sols tropicaux altérés (Sanchez, 2018; Sanchez et al., 2003). À cela s'ajoute l'influence du gradient hydrologique : les zones proches de la rivière bénéficient d'une disponibilité hydrique plus régulière et d'un stock accru de matière organique, renforçant les gains observés, conformément aux travaux de Pessoa et al. (2024), sur la résilience physiologique des cultures face aux variations hydriques.

Toutefois, cette relation positive n'est pas linéaire. Lors de la seconde saison, certaines micro-dépressions et zones situées à proximité immédiate de la rivière ont présenté des rendements plus faibles, indiquant l'effet défavorable de l'engorgement temporaire du profil. Comme l'ont démontré Liu et al. (2024a), Huang et al. (2022), Wu et al. (2018) et Tian et al. (2019), même de brèves phases d'engorgement réduisent l'aération du sol, limitent l'activité racinaire et perturbent la translocation des assimilats, ce qui compromet la formation du grain. Ainsi, si la disponibilité hydrique constitue un déterminant majeur de la productivité, son excès peut neutraliser une partie des bénéfices du sous-solage et des amendements, en particulier dans les secteurs à perméabilité réduite.

À l'inverse, les blocs où persistent une faible épaisseur de sol, une compaction élevée ou une acidité marquée (notamment dans les blocs B8 et B10 au cours de la première saison) présentent des rendements nettement inférieurs. Ces zones illustrent le rôle limitant de la plinthite, dont la faible profondeur et la perméabilité restreinte entravent la percolation et la progression racinaire, comme l'indique le WRB (2022). La présence de concentrations élevées en Mn, Cu ou Fe renforce ces contraintes : en conditions acides, ces éléments deviennent phytotoxiques, inhibant l'allongement racinaire, perturbant la photosynthèse ou immobilisant des nutriments essentiels (Mubemba et al., 2017; Stoyanova et al., 2009; Yruela, 2009). Les corrélations négatives observées dans les horizons de 0-10 cm et 0-40 cm entre ces éléments et le rendement confirment que la signature géochimique plinthitique demeure un déterminant structurant de la productivité, même après intervention.

Une dimension centrale de ces dynamiques réside dans l'évolution interannuelle du rendement. L'augmentation moyenne d'environ une tonne par hectare observée entre la première et la deuxième saison ne peut être attribuée à des variations climatiques

majeures, les conditions agro-météorologiques étant restées globalement similaires. Elle traduit plutôt l'effet cumulatif d'un système en cours de restauration, dans lequel les bénéfices du sous-solage et de l'amendement biogénique ne s'expriment pleinement qu'après un certain délai. Au fil du temps, la fragmentation progressive des horizons indurés, la stabilisation d'agrégats plus fonctionnels, la minéralisation graduelle de la matière organique issue des termitières et l'enrichissement continu du complexe adsorbant en cations basiques contribuent à améliorer la continuité porale, la capacité d'échange et la disponibilité des ressources édaphiques. Des dynamiques similaires ont été décrites par Wildemeersch et al. (2015) dans des sols plinthitiques marginalisés, où plusieurs cycles culturaux étaient nécessaires avant que les bénéfices des interventions ne se traduisent pleinement en gains agronomiques.

L'analyse statistique apporte un appui solide à cette lecture fonctionnelle. Les corrélations positives entre le rendement, le pH, le carbone organique et les cations basiques disponibles montrent que la neutralisation de l'acidité et l'amélioration du statut organique constituent des leviers structurants de la productivité. Comme le rappellent Sanchez (2018), Bell et al. (2024) et Hernandez-Soriano & Jimenez-Lopez (2012), l'élévation du pH et l'accroissement du carbone organique agissent simultanément sur plusieurs fronts : amélioration de la disponibilité des nutriments, complexation des formes toxiques de métaux, réduction de la solubilité de l'aluminium et du manganèse et stabilisation des charges de surface. La matière organique joue à cet égard un rôle pivot : en augmentant la capacité d'échange cationique et en participant à la formation de complexes organo-métalliques stables, elle limite la mobilité des métaux, réduit leur toxicité et facilite l'absorption racinaire (Hou et al., 2019; Montiel-Rozas et al., 2016; Mulaji, 2011).

Les modèles de régression pas à pas permettent de quantifier de manière robuste l'importance relative des facteurs contrôlant la productivité du maïs dans ce contexte. Le carbone organique apparaît comme le prédicteur le plus influent, ce qui est cohérent avec le fonctionnement des sols altérés, où l'horizon de surface constitue la principale source de charges du complexe adsorbant et donc un levier essentiel pour la disponibilité des nutriments. Le pH KCl se positionne également comme un déterminant majeur, confirmant que la toxicité aluminique et manganique demeure l'une des contraintes les plus sévères dans les environnements acides. La capacité d'un sol à neutraliser cette toxicité, par élévation du pH ou complexation de l' Al^{3+} et du Mn^{2+} apparaît ainsi comme un facteur clé de la performance agronomique. La présence du calcium parmi les prédicteurs positifs (particulièrement pour la profondeur de 0-10 cm) dans les modèles interannuels renforce cette interprétation : cet élément joue simultanément un rôle structural, en stabilisant les agrégats, et un rôle chimique antagoniste vis-à-vis de l'aluminium échangeable, comme documenté par Bell et al. (2024) et Meriño-Gergichevich et al. (2010).

La profondeur exploitable (0–40 cm) constitue néanmoins le pivot agronomique du système. Au-delà des seules propriétés chimiques, elle traduit directement le volume de sol effectivement accessible au système racinaire, en particulier dans les zones où l'action de la sous-soleuse a été la plus efficace, sans pour autant être homogène à

l'échelle du site. Son influence positive, sélectionnée de manière robuste par les critères d'information et confirmée par la stabilité des modèles ($VIF < 3$), indique que le sous-solage a profondément modifié le fonctionnement du profil. D'un sol initialement discontinu et fortement contraint par la plinthite, il a favorisé l'émergence d'un continuum pédologique fonctionnel, élargissant l'accès des racines aux réserves hydriques et nutritives auparavant peu ou pas exploitables. Ce constat est en accord avec les travaux de Ji et al. (2013), Wu et al. (2024) et Šarauskis et al. (2024), qui démontrent que la levée des contraintes mécaniques augmente le rendement en étendant le volume racinaire actif et en renforçant la connectivité hydrique du profil.

L'analyse des modèles selon la profondeur montre une hiérarchisation claire des facteurs limitants. Dans l'horizon superficiel (0–10 cm), le cuivre, le fer et le manganèse apparaissent conjointement comme des facteurs négatifs du rendement, traduisant l'influence persistante de la signature géochimique plinthitique dans la zone la plus biologiquement active du sol. En revanche, à l'échelle de la profondeur fonctionnellement exploitable (0–40 cm), seul le manganèse demeure systématiquement retenu parmi les variables explicatives négatives, indiquant que son effet limitant persiste indépendamment des autres paramètres du sol et des améliorations apportées par les interventions. La persistance du manganèse parmi les variables sélectionnées dans le modèle final, malgré des critères de sélection stricts, suggère un effet toxique réel et structurel. De nombreux travaux montrent que le Mn peut limiter la croissance racinaire, perturber l'activité enzymatique et réduire l'efficacité photosynthétique, même à des concentrations modérées, en particulier en conditions acides ou à drainage imparfait (Luo et al., 2025; Sajid et al., 2025; Wala et al., 2025).

Ces éléments convergent vers un diagnostic clair : le site n'évolue pas vers une homogénéité pédologique, mais vers un système restructuré où coexistent des zones proches de la restauration et d'autres encore dominées par la contrainte plinthitique. La variabilité spatiale du rendement n'est donc pas un artefact statistique ; elle reflète directement l'interaction entre la géométrie des horizons, l'efficacité locale du sous-solage, la dynamique chimique induite par les matériaux de termitières et l'histoire hydrologique du paysage. De ce fait, toute stratégie de gestion future devra s'appuyer sur cette lecture spatialisée et dynamique, plutôt que sur l'hypothèse d'une réponse uniforme à l'échelle du périmètre.

Bien que les résultats révèlent des modifications structurales et chimiques favorables ainsi qu'une réponse agronomique significative, la durabilité du système au sens temporel ne peut être pleinement établie sur la base des données actuellement disponibles. La persistance du manganèse comme facteur limitant et l'hétérogénéité spatiale observée suggèrent que la restauration demeure partielle et différenciée selon les secteurs du périmètre. L'étude couvre deux campagnes culturales consécutives, ce qui permet d'apprécier la cohérence interannuelle des réponses observées, mais ne permet pas d'évaluer la stabilité des effets à long terme. La persistance des modifications structurales, l'évolution du statut chimique du sol et le maintien des

gains de rendement nécessiteraient un suivi pluriannuel afin de confirmer la robustesse du système dans le temps.

Dans ce contexte, l'apport d'un modèle mécaniste tel qu'APSIM permet d'explorer, au-delà des observations empiriques, les interactions dynamiques entre propriétés du sol, climat et croissance du maïs.

7.5. Contribution du modèle APSIM à l'interprétation des dynamiques sol-plante dans des plinthosols restaurés par sous-solage et matériaux de termitière

L'intégration de la modélisation avec APSIM (Agricultural Production Systems SIMulator) dans cette étude a constitué un apport fondamental pour comprendre les trajectoires fonctionnelles du système sol-plante après sous-solage et amendement aux matériaux de termitières. Alors que les sections précédentes ont démontré l'hétérogénéité spatiale des propriétés morphologiques, physique, chimiques et hydriques du sol, APSIM permet d'en restituer la traduction dynamique dans la croissance du couvert, et la formation du rendement. Le modèle offre un cadre mécaniste cohérent reliant les processus pédologiques détaillés dans cette étude aux réponses physiologiques du maïs, et permet ainsi d'évaluer de manière intégrée la performance du système restauré.

La simulation de l'indice de surface foliaire (LAI) montre une bonne concordance avec les observations de terrain, avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,86 et un coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,67. Ce niveau de performance atteste de la capacité d'APSIM à reproduire les grandes phases de l'ontogenèse du maïs dans les environnements tropicaux, notamment l'expansion foliaire rapide, le maintien du couvert et la sénescence progressive, comme documenté dans des travaux antérieurs (Balboa et al., 2019a, 2019b; Chauhan et al., 2013; Dilla et al., 2018; Peake et al., 2013; Zhao & Yang, 2019; Zhao et al., 2025). Dans un contexte où les mesures directes du LAI sur le terrain étaient limitées, la télédétection a constitué une source essentielle d'observations indépendantes permettant de confronter les simulations du modèle à des données réelles et spatialement continues (Asner et al., 2003; Liu et al., 2024b). L'utilisation du Simple Ratio dérivé des images Sentinel-2 a été particulièrement pertinente, ce rapport spectral étant moins sensible à la saturation dans les couverts denses. La bonne convergence entre LAI simulé et observé confirme que le modèle capte correctement les processus biophysiques, malgré la forte variabilité texturale, hydrique et chimique du site. Les différences marquées entre blocs dans le LAI simulé, notamment la moindre vigueur observée au bloc B8, soulignent toutefois la sensibilité du couvert foliaire à des contraintes locales telles que la compaction résiduelle, l'efficacité variable du sous-solage ou une profondeur exploitable limitée. La modélisation montre ainsi que les bénéfices de la combinaison sous-solage et matériaux de termitières dépendent étroitement de la qualité réelle de l'intervention mécanique et de l'homogénéité de l'incorporation des amendements.

La simulation du rendement affiche une précision encore plus élevée, avec un R^2 de 0,91 et un NSE de 0,90, ce qui montre qu'APSIM a correctement intégré les

interactions entre structure du sol, disponibilité hydrique, développement foliaire et accumulation de biomasse grain (Holzworth et al., 2018; Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; McCown et al., 1996). Cette performance est nettement supérieure à celle obtenue avec le modèle linéaire multiple développé à partir des variables pédologiques ($R^2 \approx 0,60$), suggérant que l'approche mécaniste d'APSIM permet de mieux intégrer les interactions non linéaires entre disponibilité en eau, conditions nutritionnelles et développement phénologique que les modèles statistiques statiques (Boote et al., 1996; Holzworth et al., 2014; Keating et al., 2003; Sinclair & Seligman, 2000).

Concrètement, alors qu'un modèle linéaire établit une relation directe et additive entre variables pédologiques et rendement, APSIM simule explicitement les processus intermédiaires reliant ces variables au développement de la culture (Keating et al., 2003; McCown et al., 1996). Dans cette étude, la profondeur exploitable ainsi que les propriétés physiques et chimiques du sol influencent la disponibilité en eau et le statut nutritionnel de la plante, lesquels conditionnent la croissance racinaire, la dynamique du LAI, l'interception du rayonnement et l'accumulation de biomasse avant d'affecter le rendement final. Ces rétroactions successives, mises à jour de manière journalière dans le modèle, traduisent une représentation dynamique et non linéaire du fonctionnement sol-plante que ne permet pas une approche statistique statique.

Les blocs présentant les rendements les plus élevés sont également ceux où le LAI simulé s'est maintenu plus longtemps, confirmant que cet indicateur constitue un intégrateur robuste du fonctionnement physiologique et du statut hydrique du sol (Dilla et al., 2018; Jin et al., 2017). Ces résultats sont cohérents avec les observations faites dans les systèmes tropicaux où la stabilité du couvert constitue un déterminant essentiel du rendement (Jarlan et al., 2008; Lawal et al., 2022; Lukeba et al., 2013). Il est important de souligner que, bien qu'APSIM ne modélise pas explicitement certains processus chimiques spécifiques aux plinthosols (tels que la complexation de l'aluminium ou la fixation du phosphore par les oxydes de fer), le modèle en capte indirectement les effets à travers leurs impacts sur la disponibilité hydrique, la dynamique de l'azote et la croissance racinaire. Ainsi, les contraintes chimiques identifiées dans les analyses pédologiques sont partiellement intégrées dans les simulations via leurs conséquences fonctionnelles sur la croissance et l'absorption des nutriments.

Les écarts modérés entre valeurs simulées et observées dans quelques blocs reflètent les limites inhérentes à la modélisation, notamment les incertitudes sur les propriétés hydriques profondes, la distribution verticale réelle des racines ou encore la variabilité microclimatique qui n'est pas intégralement captée par les données météorologiques utilisées dans APSIM.

Le choix d'APSIM dans cette étude se justifie par sa structure mécaniste détaillée, permettant de représenter de manière intégrée les interactions entre le sol, la plante, le climat et les pratiques culturales, ainsi que leur influence sur le développement phénologique et le rendement du maïs. Dans le contexte des plinthosols restaurés, APSIM présente l'avantage d'intégrer explicitement les modifications des propriétés physiques et chimiques du sol résultant d'interventions agronomiques visant à améliorer la fertilité, la disponibilité en eau et le fonctionnement global du système sol-plante.

À la différence des autres modèles comme AquaCrop, qui repose sur une approche plus simplifiée principalement centrée sur l'efficacité d'utilisation de l'eau et la réponse au stress hydrique, APSIM permet une représentation plus détaillée de la structure du profil de sol, de la croissance racinaire et de la partition de la biomasse. Toutefois, AquaCrop présente l'avantage d'une calibration plus simple et d'un nombre réduit de paramètres, ce qui peut le rendre plus accessible dans des contextes de données limitées (Abedinpour et al., 2012; Vanuytrecht et al., 2014; Wellens et al., 2013). Dans le cas des plinthosols fortement hétérogènes étudiés ici, la capacité d'APSIM à intégrer ces processus et leurs rétroactions a constitué un atout déterminant, bien que le modèle ne prenne pas explicitement en compte certains processus géochimiques spécifiques aux horizons plinthitiques.

Au-delà de l'évaluation des performances du modèle, APSIM apporte une contribution essentielle à la compréhension mécaniste des améliorations observées après sous-solage et amendement. Les simulations montrent que les gains de rendement résultent d'une combinaison d'effets, incluant l'augmentation de la réserve hydrique utile liée à la fracturation mécanique, l'amélioration du statut nutritionnel et de la capacité d'échange après apport de matériaux de termitières. Cette lecture intégrée confirme et complète les conclusions tirées des analyses pédologiques, statistiques et géospatiales.

La convergence entre dynamiques simulées, mesures de terrain et données Sentinel-2 montre que la combinaison de la modélisation APSIM et de la télédétection offre un outil particulièrement puissant pour spatialiser les réponses de la culture, diagnostiquer les zones encore contraintes par la plinthite et orienter des stratégies de gestion différenciée. Dans les paysages tropicaux hétérogènes, cette approche permet d'identifier avec précision les secteurs où la restauration est pleinement opérationnelle et ceux où les contraintes profondes persistent.

Enfin, l'intégration d'APSIM ouvre des perspectives opérationnelles importantes pour la gestion durable des plinthosols. La capacité du modèle à simuler différents scénarios, tels que la répétition du sous-solage, l'ajustement des quantités de matériaux de termitières, la gestion de l'eau ou le choix de variétés plus adaptées, constitue une base solide pour optimiser les pratiques agricoles dans ces environnements contraints. Couplée aux informations spatiales fournies par la télédétection, cette approche se présente comme un outil stratégique pour soutenir la prise de décision et favoriser une intensification durable de la production sur sols plinthitiques.

7.6. Portée agronomique, écologique et économique de la restauration des plinthosols

Les résultats de cette recherche apportent des contributions majeurs sur les potentialités et les limites des plinthosols tropicaux lorsqu'ils sont restaurés par une stratégie intégrée combinant sous-solage profond et amendements à base de matériaux de termitières. Au-delà de la compréhension des mécanismes physico-chimiques révélés, l'étude ouvre des perspectives agronomiques, écologiques et économiques d'importance stratégique pour la gestion durable des sols fortement altérés du Haut-Katanga et, plus largement, des paysages tropicaux africains.

Sur le plan agronomique, la restauration partielle, mais substantielle de la profondeur exploitable apparaît comme l'un des leviers déterminants de l'amélioration de la productivité du maïs. L'extension du volume racinaire fonctionnel conditionne directement la capacité des cultures à extraire l'eau et les nutriments, particulièrement dans les sols présentant des contraintes mécaniques marquées (Huang et al., 2023; Ji et al., 2013; Šarauskis et al., 2024; Wu et al., 2024). Dans les plinthosols, où l'horizon induré constitue un obstacle majeur au développement racinaire (Soil Survey Staff, 2014; World Reference Base for Soil Resources (WRB), 2022), le sous-solage permet une levée partielle mais déterminante de cette barrière, en améliorant la continuité verticale de la porosité et en élargissant l'espace d'exploration du système racinaire. Parallèlement, l'amélioration du pH ainsi que l'enrichissement en calcium, magnésium et carbone organique consécutifs à l'apport de matériaux de termitières contribuent à atténuer les toxicités aluminique et manganique, contraintes majeures des sols acides tropicaux (Bell et al., 2024; Sanchez, 2018). Cette levée simultanée des limitations physiques et chimiques explique les gains de rendement observés et confirmés par les analyses de corrélation et les modèles de régression. Le caractère déterminant du carbone organique, principale source de charges du complexe adsorbant dans les sols pauvres (Garcia et al., 2024; Obalum et al., 2017; Paul, 2016), souligne que la restauration fonctionnelle de ces sols dépend étroitement du rétablissement conjoint de la structure et du statut organo-minéral.

Sur le plan écologique, l'utilisation de matériaux de termitières qui sont des produits biogéochimiques issus l'activité de termites capables de concentrer les argiles fines, les cations basiques et les complexes organo-minéraux stabilisés, constitue un levier potentiel de restauration des fonctions du sol, comme largement documenté dans la littérature (Adhikary et al., 2016; Jouquet et al., 2015, 2016; Mujinya et al., 2013, 2014). Au-delà de leur intérêt agronomique, ces monticules représentent aussi un capital pédologique local dont l'usage fait aujourd'hui l'objet d'une concurrence croissante. Dans la zone périurbaine de Lubumbashi, la demande en matériaux de construction conduit à une exploitation soutenue des termitières pour la fabrication de briques, tandis que leur valorisation agricole demeure marginale chez les petits exploitants (Adhikary et al., 2016; Erens et al., 2015). Cette dynamique d'extraction, essentiellement orientée vers un usage non agricole, entraîne une disparition progressive de ces structures biogéniques et, avec elle, une perte irréversible de micro-

réservoirs de particules fines et de bases échangeables, c'est-à-dire de "hotspots" de fertilité potentiellement mobilisables pour restaurer des sols fortement altérés. Dans ce cadre, la valorisation raisonnée des matériaux de termitières en agriculture peut être envisagée non seulement comme une option technique, mais comme un choix de gestion des ressources visant à réorienter une fraction de cette biomasse pédologique vers la production alimentaire et la sécurisation des fonctions du sol, plutôt que vers un usage extractif dissipatif.

Bien que certaines de ces fonctions n'aient pas été mesurées directement dans cette étude, les propriétés physico-chimiques observées (élévation du pH, enrichissement en cations basiques, amélioration relative de la rétention en eau des horizons de surface) suggèrent que l'incorporation des matériaux de termitières pourrait contribuer, conformément aux travaux antérieurs, à une meilleure structuration du sol, à une augmentation de la capacité d'échange cationique effective et à une amélioration de la disponibilité en eau pour les cultures, notamment dans les contextes tropicaux soumis à des stress hydriques intermittents (Bouchot et al., 2011; Eze et al., 2014; Ezeaku & Anikwe, 2006). En parallèle, la complexation des métaux par les composés organiques limite la mobilité et la toxicité du Fe, Mn et Cu (Hernandez-Soriano & Jimenez-Lopez, 2012; Montiel-Rozas et al., 2016), améliorant la qualité chimique et biologique de la rhizosphère. Ces processus, en consolidant les fonctions de régulation hydrique, chimique et biologique du sol, inscrivent les interventions dans une logique d'intensification écologique (Giller et al., 2021), fondée sur la mobilisation des processus biophysiques plutôt que sur une simple augmentation des intrants. Enfin, la proximité de la cuirasse et la limitation de l'infiltration profonde peuvent accroître le ruissellement et le risque d'érosion hydrique, surtout après mise à nu du sol. La durabilité de la restauration implique donc de coupler les interventions de "réparation" (mécanique/biogénique) à des pratiques de protection de surface (couvert permanent, réduction du travail du sol, aménagement antiérosif), afin d'éviter une dégradation rapide des horizons améliorés.

Sur le plan économique, les performances atteintes jusqu'à plus de 11 t ha⁻¹ contre une moyenne régionale d'environ 0,77 t ha⁻¹ (FAOSTAT) montrent que la valorisation agronomique de sols initialement considérés comme marginaux peut devenir économiquement viable et potentiellement transformative pour les systèmes de production du Haut-Katanga. Les matériaux de termitières constituent une ressource locale à faible coût, mobilisant essentiellement de la main-d'œuvre, et représentant une alternative partielle ou totale à des engrais minéraux souvent peu efficaces dans ces sols fortement acides (Apori et al., 2020; Chisanga et al., 2020; Garba et al., 2011; Kpangba et al., 2020; Padonou et al., 2020). Par ailleurs, les tendances observées entre saisons montrent que les bénéfices ne se limitent pas à une réponse ponctuelle : ils s'accumulent au cours du temps, conformément aux dynamiques décrites dans les travaux sur les systèmes restaurés (Wildemeersch et al., 2015). En termes de transférabilité, l'approche testée correspond davantage à un contexte mécanisé (sous-solage, logistique d'épandage) qu'aux conditions des petits exploitants. Néanmoins, plusieurs voies d'adaptation sont envisageables : cibler

prioritairement les zones où la plinthite est discontinue ou sub-affleurante, privilégier des apports biogéniques localisés (micro-doses/poquets, bandes amendées, priorité aux parcelles proches des termitières), et combiner l'amendement avec des techniques de conservation des eaux et des sols (couverture végétale, cordons, bandes enherbées) afin de sécuriser la réserve hydrique et limiter l'érosion. Une analyse coût-bénéfice (main-d'œuvre, transport, opportunité de la ressource "termite") et une évaluation de l'acceptabilité sociale (accès au foncier, organisation collective, réglementation locale) seraient nécessaires pour identifier les modalités réalistes d'adoption à petite échelle.

L'intégration des outils de télédétection (Image Sentinel-2) et de modélisation APSIM renforce cette dimension économique en permettant de cibler les interventions, d'identifier les zones les plus réactives ou les plus contraintes, d'ajuster les doses d'amendements, de planifier les passages de sous-soleuse et d'optimiser la gestion hydrique. Ces approches constituent un socle opérationnel pour développer une agriculture de précision adaptée aux conditions hétérogènes des plinthosols, potentiellement capable de réduire les coûts d'exploitation tout en augmentant la résilience et la rentabilité.

7.7. Limites de l'étude

Bien que cette recherche apporte des avancées majeures dans la compréhension du fonctionnement des plinthosols restaurés par sous-solage et amendements de termitières, plusieurs limites méthodologiques, analytiques et structurelles doivent être prises en compte afin d'en préciser la portée et d'orienter les perspectives futures.

Une première limite tient à la variabilité spatiale intrinsèque du site, caractéristique des paysages plinthitiques. Malgré l'utilisation d'un dispositif en blocs et de méthodes d'interpolation spatiale (Spline with Barriers), certaines hétérogénéités fines, notamment la géométrie latérale des lentilles plinthitiques, micro-gradients hydrologiques n'ont pu être pleinement capturées. De nombreux travaux montrent que les plinthosols présentent une variabilité latérale marquée à l'échelle métrique (Fritsch et al., 2007; Laurent et al., 2017), ce qui limiterait l'extrapolation des résultats hors des zones directement échantillonnées.

Dans le prolongement de cette contrainte spatiale, une seconde limite méthodologique importante concerne l'absence de parcelles témoins strictement non traitées. L'ensemble du périmètre ayant fait l'objet, à des degrés variables, d'interventions de sous-solage et/ou d'amendement par matériaux de termitières, il n'a pas été possible de disposer d'un référentiel spatialement comparable représentant l'état initial des plinthosols sans intervention. Cette situation limite la capacité à attribuer de manière causale les effets observés spécifiquement au sous-solage, aux matériaux de termitières ou à leur combinaison. Bien que certaines parcelles historiques (saison 2016–2017) aient fourni un point de référence partiel, celles-ci ne présentaient pas des conditions strictement équivalentes en termes de surface, de géométrie des horizons plinthitiques et de contraintes paysagères. De plus, les différences interannuelles liées aux conditions climatiques, à la gestion culturale et à

l'évolution du sol empêchent toute comparaison directe pleinement contrôlée. Comme l'ont souligné plusieurs auteurs, l'évaluation rigoureuse des effets des pratiques de restauration nécessite idéalement des dispositifs factoriels incluant des témoins non traités (Kwanchai & Arturo, 1984; Sanchez et al., 2003). Dans le contexte opérationnel de cette étude, l'objectif était toutefois d'évaluer la performance fonctionnelle d'un système déjà restauré à l'échelle du paysage.

Une troisième limite concerne non pas la résolution verticale des observations, puisque les fosses pédologiques ont été décrites par horizons réels et que des échantillons non perturbés et perturbés ont été prélevés dans chacun d'eux pour les analyses physico-chimiques et hydrauliques, mais plutôt la résolution fonctionnelle du profil. En effet, si la structure morphologique des horizons a été correctement caractérisée, certaines dimensions clés du fonctionnement interne du sol n'ont pas pu être mesurées, notamment la continuité et la connectivité des macropores créés par le sous-solage, leur persistance temporelle, ainsi que la distribution verticale et latérale effective des racines dans un matériau plinthitique très hétérogène. Or, plusieurs travaux montrent que ces propriétés, difficiles à appréhender sans mesures tridimensionnelles ou sans suivi hydrique continu, conditionnent fortement l'efficacité durable du sous-solage (McCallum et al., 2004; Vero et al., 2014). Leur absence limite la possibilité d'évaluer pleinement l'évolution fonctionnelle du profil restauré.

Une quatrième limite découle de l'utilisation exclusive de données météorologiques satellitaires (NASA POWER). Bien qu'elles constituent une alternative fiable dans les régions dépourvues de stations locales (Khatibi & Krauter, 2021; Mourtzinis et al., 2017; Negm et al., 2018; White et al., 2008), ces données présentent une résolution spatiale relativement grossière ($\approx 0,5^\circ \times 0,5^\circ$, soit ~ 55 km) et reposent sur des interpolations quadrillées qui ne capturent pas les variations topographiques, hydrologiques ou microclimatiques fines du paysage. Dans un environnement hétérogène comme le périmètre étudié, marqué par des gradients locaux d'humidité liés à la proximité de la rivière, ces limites peuvent entraîner un lissage des conditions réelles. L'absence de mesures microclimatiques in situ pourrait introduire ainsi une incertitude supplémentaire dans l'interprétation des simulations APSIM.

Une cinquième limite réside dans le caractère court (deux saisons) du suivi. Les processus de restauration organo-minérale, la stabilisation des agrégats, la minéralisation progressive de la matière organique issue des termitières et la redistribution des cations basiques s'inscrivent dans des dynamiques pluriannuelles (Brauman, 2000; Pessoa et al., 2024; Wildemeersch et al., 2015). Les tendances observées ici ne reflètent donc qu'un segment précoce de la trajectoire de restauration, ce qui limite les conclusions concernant la durabilité à long terme.

Une sixième limite concerne le modèle APSIM. Bien que performant dans cette étude, il repose sur des hypothèses structurelles et ne simule pas explicitement certains processus essentiels aux sols plinthitiques : (i) la dynamique spatiale de la macroporosité issue du sous-solage, (ii) les interactions fines entre la plinthite, la matière organique et les métaux, notamment les processus de complexation, de

fixation et de redistribution des oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, qui jouent un rôle déterminant dans la disponibilité du phosphore, la toxicité aluminique et manganique, ainsi que la stabilité organo-minérale du sol, (iii) la distribution réelle des racines dans un profil hétérogène. Comme l'ont montré Holzworth et al. (2018) et Chimonyo et al. (2016), la performance d'APSIM dans les environnements tropicaux dépend fortement de la qualité de la paramétrisation du sol. Or, plusieurs paramètres clés de la dynamique du sol tels que la répartition verticale réelle des racines ou la fraction active de la matière organique qui sont rarement disponibles faute de mesures directes. En leur absence, le recours à des valeurs par défaut ou à des estimations augmente l'incertitude de la simulation, en particulier dans des systèmes aussi hétérogènes que les plinthosols.

Enfin, l'absence de mesures directes de la biologie du sol. Dans un système fortement influencé par l'introduction de matériaux de termitières, l'activité biologique joue un rôle central. L'absence de données sur l'activité microbienne, la biomasse microbienne ou les communautés fongiques restreint l'interprétation des mécanismes biologiques impliqués dans l'amélioration des propriétés du sol (Brauman, 2000; Duponnois et al., 2005, 2006; Jouquet et al., 2002).

Ainsi, si ces limites n'altèrent pas la robustesse des tendances observées, elles soulignent la nécessité d'approches intégrées, multidimensionnelles et prolongées dans le temps pour consolider l'interprétation des processus démontrés et guider les travaux futurs sur les plinthosols tropicaux restaurés.

Chapitre 8

Conclusion générale et perspectives

8.1. Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif d'analyser la restauration fonctionnelle des Plinthosols à travers une approche intégrée combinant le sous-solage mécanique et l'amendement par des matériaux de termitières géantes, dans les conditions agroécologiques de la région de Lubumbashi (Haut-Katanga, République Démocratique du Congo). À travers l'intégration d'analyses pédologiques, physico-chimiques et hydrodynamiques du sol, d'analyses géospatiales et agronomiques, ainsi qu'une modélisation biophysique, ce travail visait à comprendre comment ces interventions peuvent transformer le fonctionnement de plinthosols longtemps considérés comme l'un des principaux verrous à l'intensification agricole dans cette région.

Appliquées sur un périmètre de 660 ha dominé par les plinthosols, les interventions combinées ont révélé un potentiel de restauration significatif. Le sous-solage, lorsqu'il est réalisé dans des zones où la plinthite est discontinue, favorise un meilleur accès du système racinaire à l'eau et aux nutriments. Parallèlement, l'incorporation de matériaux de termitières enrichit les horizons superficiels en cations basiques, s'accompagne d'une amélioration relative du carbone organique total et du phosphore assimilable, atténue l'acidité et contribue à une réduction partielle des contraintes chimiques associées aux éléments traces métalliques liés à la plinthite.

Les profils pédologiques présentent majoritairement des textures limono-sableuses à limono-argileuses, avec une augmentation progressive de la fraction argileuse en profondeur, traduisant des processus d'illuviation caractéristiques. Il en résulte un profil restructuré, dans lequel l'horizon de surface voit son fonctionnement amélioré, tandis que la contrainte plinthitique du sous-sol persiste mais devient partiellement contournée par la reconfiguration verticale du système sol-plante.

Sur le plan hydrodynamique, la conductivité hydraulique à saturation demeure généralement faible dans les horizons profonds, limitant la transmission verticale de l'eau. En revanche, les horizons de surface présentent une capacité de rétention hydrique plus élevée, suggérant une amélioration relative de la disponibilité en eau dans la zone effectivement explorée par les racines. Cette organisation hydrique traduit une redistribution fonctionnelle de l'eau au sein du profil restauré.

Les rendements observés, très hétérogènes (de moins de 2,3 à plus de 11 t ha⁻¹ selon les blocs), reflètent fidèlement l'hétérogénéité des conditions pédologiques et hydriques du périmètre. Même dans les zones les plus contraintes, les niveaux de production demeurent nettement supérieurs à la moyenne régionale, généralement inférieure à 1 t ha⁻¹ sous pratiques culturales traditionnelles, notamment sur des sols fortement altérés dominés par des Plinthosols. La hausse moyenne d'environ une tonne par hectare entre les deux saisons témoigne d'une dynamique cumulative caractéristique des processus de restauration progressive, incluant la stabilisation structurale, la minéralisation lente de la matière organique issue des matériaux de termitières et la redistribution des cations du sol.

Les analyses multivariées indiquent que trois processus pédogénétiques dominent la dynamique fonctionnelle du sol restauré : (i) la régulation acido-basique par les cations basiques disponibles et le pH, (ii) la complexation de l'aluminium par la matière organique, réduisant sa toxicité, et (iii) le contrôle de la disponibilité du phosphore par le fer. Les modèles de régression, considérés dans leur ensemble, montrent que la profondeur exploitable, le carbone organique total, le calcium et le pH du sol constituent les principaux déterminants positifs du rendement, tandis que le cuivre, le fer et le manganèse demeurent des facteurs limitants, bien que leur biodisponibilité soit partiellement atténuée par la matière organique et avec des effets variables selon la profondeur du sol.

Les simulations réalisées avec le modèle APSIM apportent une validation de ces résultats. Le modèle reproduit de manière satisfaisante l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI) et les rendements en grain, démontrant sa capacité à intégrer les interactions entre structure du sol, disponibilité hydrique, développement foliaire et accumulation de biomasse grain. Le couplage entre la modélisation et la télédétection (Sentinel-2) a permis d'établir un lien quantitatif entre l'état structural du sol et la performance de la culture, ouvrant la voie à une utilisation future de ces outils dans des systèmes d'aide à la décision destinés à orienter les pratiques de gestion des sols, à suivre la réponse des cultures et à optimiser les interventions agronomiques dans les environnements tropicaux.

Au-delà des performances agronomiques, cette thèse montre que la combinaison du sous-solage et des matériaux de termitières constitue une stratégie pertinente tant sur les plans écologique qu'économique. Elle valorise une ressource biogénique abondante, localement disponible et peu coûteuse, réduit la dépendance aux engrais minéraux souvent peu efficaces dans les sols acides tropicaux, et offre une voie concrète de restauration agroécologique pour des sols longtemps considérés comme marginaux. Dans l'ensemble, cette recherche démontre que la gestion intégrée des contraintes physiques, chimiques et hydriques des plinthosols permet une reconfiguration fonctionnelle du profil, susceptible d'améliorer la performance agronomique des systèmes de culture.

Afin de synthétiser l'ensemble des mécanismes identifiés et des contributions apportées par ce travail, une représentation conceptuelle intégrative est proposée à la Figure 8.1 ci-dessous.

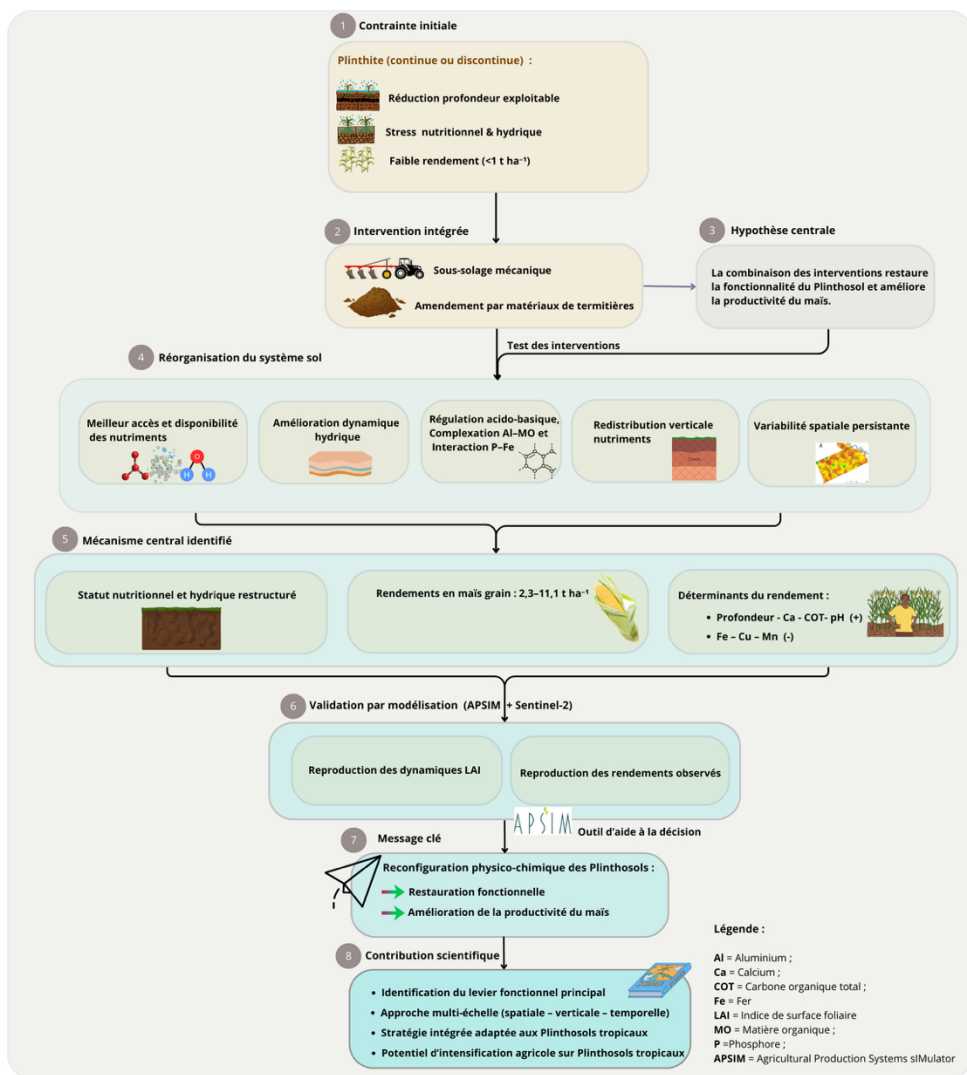


Figure 8-1: Schéma conceptuel intégratif synthétisant l'architecture logique de la thèse, depuis la contrainte pédologique initiale liée à la plinthite, l'hypothèse centrale d'une restauration fonctionnelle par intervention intégrée (sous-solage et amendement par matériaux de termitières), jusqu'à la réorganisation physico-chimique du profil, l'identification des déterminants du rendement et leur validation par modélisation (APSIM couplé aux données Sentinel-2). Le schéma montre le rôle central de la reconfiguration physico-chimique des Plinthosols dans l'amélioration de la productivité du maïs.

8.2. Perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse ouvrent plusieurs perspectives importantes pour la recherche fondamentale, l'amélioration des outils de modélisation, la gestion opérationnelle des plinthosols et l'optimisation des pratiques agricoles en contexte tropical.

1. Approfondir la compréhension des processus physiques et biogéochimiques en profondeur

La persistance des contraintes liées à la plinthite souligne la nécessité d'explorer plus finement les mécanismes internes gouvernant la dynamique de ces horizons indurés. Les recherches futures devraient porter sur :

- la micro-porosité, l'architecture interne et la minéralogie fine de la plinthite ;
- les mécanismes de résilience ou de reconsolidation après sous-solage, encore mal compris ;
- la dynamique spatiale de la rupture mécanique en fonction de la géométrie latérale des lentilles plinthitiques ;
- les trajectoires d'évolution de la connectivité porale au cours du temps.

L'utilisation de méthodes avancées (tomographie RX, pénétrométrie 3D, mesures hydrodynamiques in situ, analyses micromorphologiques) permettrait d'améliorer l'interprétation des processus profonds qui conditionnent la durabilité des interventions.

2. Optimiser les pratiques d'amendement biogénique

Les matériaux de termitières se révèlent être un amendement puissant, mais plusieurs questions structurantes restent ouvertes :

- Quelle est la cinétique réelle de minéralisation des complexes organo-minéraux issus des termitières ?
- Quels volumes ou doses représentent un optimum agronomique et économique selon les types de sols ?
- Comment ces matériaux interagissent-ils avec d'autres amendements possibles (composts, dolomie, biochar) ?
- Quelle est la durée de persistance de leurs effets dans les horizons superficiels et sub-superficiels ?

Des essais multifactoriels et des suivis pluriannuels permettraient de définir des stratégies d'amendement plus efficaces et adaptées à différents contextes tropicaux.

3. Renforcer les approches de modélisation des systèmes sol-plante

APSIM a démontré sa pertinence pour simuler les dynamiques phénologiques et le rendement du maïs sur plinthosols. Toutefois, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés :

- intégrer des paramètres plus fins liés à la structure du sol (macroporosité, agrégation, conductivité anisotrope) ;
- représenter plus explicitement les interactions métal–plante dans les sols acides, notamment pour Al, Mn, Fe et Cu ;
- calibrer le modèle à partir de profils racinaires mesurés ;
- développer des modules dédiés aux horizons plinthitiques, encore absents des modèles actuels.

L’articulation APSIM – télédétection (Sentinel-2, drones, SAR) offre un potentiel majeur pour construire des outils de suivi opérationnels et spatialisés à l’échelle du paysage.

4. Développer une gestion différenciée et spatialisée à l’échelle du paysage

La forte variabilité spatiale révélée dans cette étude souligne la nécessité d’abandonner les approches uniformes de gestion des Plinthosols. Les résultats montrent que le sous-solage ne devrait pas être appliqué de manière homogène à l’échelle du paysage. Les zones caractérisées par la présence d’horizons plinthitiques superficiels, qu’ils soient non indurés ou évolués en cuirasse ferrugineuse (pétoplinthite), requièrent des stratégies alternatives, telles que des interventions localisées ou des ajustements spécifiques des pratiques culturales.

Ces constats plaident en faveur d’une gestion différenciée, fondée sur une cartographie décisionnelle intégrant les contraintes physiques et chimiques du sol.

Les recherches futures pourraient ainsi intégrer :

- l’utilisation avancée des systèmes d’information géographique (SIG) ;
- l’imagerie drone à haute résolution pour la détection fine des hétérogénéités ;
- l’exploitation de cartes de rendement issues de moissonneuses équipées de capteurs ;
- le développement de modèles de décision multicritères couplant variables pédologiques, hydriques et agronomiques.

Ces approches ouvrent la voie à une agriculture de précision adaptée aux réalités structurelles et fonctionnelles des Plinthosols tropicaux.

5. Intégrer les dimensions socio-économiques et l’adoption par les producteurs

La durabilité des pratiques proposées dépendra également de leur acceptabilité et de leur viabilité socio-économique. Plusieurs pistes doivent être approfondies :

- évaluer les coûts réels du sous-solage et du transport des matériaux de termitières ;
- analyser leur rentabilité à moyen et long terme ;
- comprendre les mécanismes d’adoption par les producteurs (perceptions, contraintes, organisation du travail) ;

- intégrer ces pratiques dans les calendriers agricoles et les systèmes de culture locaux ;
- mesurer les bénéfices socio-économiques potentiels sur les revenus, la sécurité alimentaire et la résilience des exploitations.

L'approche participative, associant chercheurs, producteurs et coopératives, sera essentielle pour favoriser une adoption durable.

6. Mettre en place des dispositifs expérimentaux contrôlés avec témoins

Les résultats de cette thèse reposent sur un dispositif opérationnel à grande échelle, dans lequel les interventions de sous-solage et d'amendement ont été appliquées de manière généralisée. Si cette approche permet d'évaluer la performance du système restauré dans des conditions réelles, elle limite la possibilité d'attribuer de manière causale les effets observés à chacune des interventions prises isolément.

Les recherches futures devraient ainsi intégrer des dispositifs expérimentaux contrôlés comprenant des parcelles témoins strictement non traitées, ainsi que des plans factoriels croisant les modalités « sous-solage seul », « amendement seul » et « combinaison des deux ». De tels dispositifs permettraient de mieux quantifier les effets spécifiques de chaque pratique, conformément aux recommandations classiques en agronomie expérimentale (Kwanchai & Arturo, 1984; Sanchez et al., 2003).

7. Approfondir la compréhension du rôle du manganèse dans la variabilité du rendement

Les analyses statistiques ont mis en évidence une association négative significative entre les concentrations de Mn et le rendement du maïs. Toutefois, la nature exacte de cette relation reste à clarifier. Plusieurs mécanismes peuvent être envisagés :

- une toxicité directe liée à une accumulation excessive de Mn^{2+} dans les tissus végétaux ;
- un déséquilibre nutritionnel induit par des interactions compétitives avec d'autres cations (Mg, Ca, Fe) ;
- des fluctuations transitoires de disponibilité du Mn liées aux conditions redox, notamment sous alternance humidité-séchage fréquente en milieu tropical.

Les recherches futures devraient ainsi :

- quantifier la spéciation du Mn (Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+}) dans différentes conditions d'humidité ;
- mesurer les concentrations de Mn dans les tissus foliaires et les grains ;
- analyser les interactions Mn-pH-matière organique-redox ;
- étudier la dynamique temporelle du Mn au cours du cycle cultural.

Une meilleure compréhension de ces mécanismes permettrait de distinguer les effets de toxicité réelle des simples co-variations pédogénétiques, et d'intégrer plus finement les interactions métal-plante dans les modèles de simulation.

8. Évaluer les risques d'érosion hydrique et la stabilité à moyen terme des sols restaurés

L'amélioration fonctionnelle observée après sous-solage et amendement par matériaux de termitières concerne principalement les propriétés physiques, chimiques et hydriques dans la zone racinaire exploitable. Toutefois, les interventions mécaniques profondes et la redistribution locale des matériaux peuvent modifier temporairement la stabilité structurale de la surface du sol, notamment dans un contexte tropical soumis à des pluies convectives intenses.

Dans les plinthosols, caractérisés par des contrastes texturaux marqués et une hétérogénéité spatiale importante, certaines zones peuvent demeurer vulnérables au ruissellement et à l'érosion hydrique, en particulier lorsque la couverture végétale est insuffisante ou que les horizons superficiels sont remaniés. Les premières saisons suivant l'intervention peuvent ainsi représenter une phase critique durant laquelle la sensibilité à la battance et à la perte de particules fines doit être évaluée.

Les recherches futures devraient notamment :

- quantifier les taux de ruissellement et de pertes en sol après intervention ;
- analyser la stabilité des agrégats dans les horizons amendés ;
- étudier l'évolution de la couverture du sol et de la rugosité de surface ;
- intégrer des indicateurs de vulnérabilité à l'érosion dans les approches SIG ;
- tester l'efficacité de pratiques complémentaires de conservation (résidus, cultures de couverture, bandes enherbées).

L'intégration de ces dimensions permettrait d'évaluer la résilience des systèmes restaurés face aux épisodes pluvieux intenses et d'orienter les pratiques vers une intensification maîtrisée et écologiquement soutenable des plinthosols tropicaux.

9. Explorer les dimensions microbiologiques et biologiques des plinthosols restaurés

Si les transformations physiques et chimiques des plinthosols ont été analysées en détail dans cette thèse, la dimension biologique du sol demeure encore peu documentée. Or, la restauration fonctionnelle d'un sol ne dépend pas uniquement de sa structure et de sa chimie, mais également de l'activité et de la diversité des communautés microbiennes qui régulent les cycles biogéochimiques.

L'élévation locale du pH, l'augmentation de la profondeur racinaire exploitable et l'apport de matériaux issus de termitières, riches en composés organo-minéraux, sont susceptibles de modifier profondément :

- la biomasse microbienne totale ;
- la diversité bactérienne et fongique ;
- l'activité enzymatique liée aux cycles du carbone, de l'azote et du phosphore ;
- les interactions mycorhiziennes dans la zone racinaire restaurée ;

- les dynamiques redox influençant la disponibilité du Mn, Fe et Al.

Les recherches futures devraient ainsi intégrer des approches de biologie moléculaire (séquençage ADN, métabarcoding), des mesures d'activité enzymatique et des indicateurs de respiration microbienne afin d'évaluer la réponse biologique aux interventions mécaniques et biogéniques.

Une meilleure compréhension des interactions entre structure du sol, chimie et microbiologie permettrait d'appréhender plus finement les mécanismes sous-jacents à l'amélioration observée des rendements et d'évaluer la stabilité fonctionnelle des systèmes restaurés à moyen et long terme.

Dans les paysages plinthitiques caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale, ces approches sont essentielles pour distinguer les effets des interventions des variations naturelles du sol. Elles offriraient également un cadre plus robuste pour analyser les trajectoires de restauration à long terme, les compromis agronomiques et les impacts environnementaux associés aux stratégies de gestion des plinthosols.

Annexes A

**Description des profils pédologiques du
site d'étude**

A.1. Caractérisation morphologique des profils pédologiques dans les blocs du périmètre d'étude

1) Bloc 1

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B1
- Date de la description : 12/08/2022
- Auteur : Banza M et Kasongo L.
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,786718° Latitude : -11,420525°
- Altitude : 11767 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc droit du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief : termitières géantes
- Pente : < 5 % : pente modérée (classe 3)
- Végétation : au moment de la description, graminées autour d'une culture industrielle de maïs
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales sur le sol

- Roche-mère : le Katangien
- Drainage : drainage modéré (classe 3)
- État hydrique durant la description : sec sur toute l'épaisseur du profil
- Cailloux et affleurements de surface : assez pierreux, blocs latéritique, nodule plinthitique
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : aménagement agricole, tranchée antiérosive et drainage

3. Classification

- WRB : Ferralsol endopetroplinthique
- Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique

4. Description du profil

- Ap 0-26 : Argilo-limoneux, rouge pâle (7,5Y7/3) à l'état sec avec des taches très peu nombreuses et fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant et de consistance meuble ; peu cimenté ; nombreux pores moyens et très peu des pores grossiers ; cailloux et fragments peu nombreux (concrétions latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; pas d'éléments artificiels ; nombreuses racines moyennes, fines, très fines à travers l'ensemble de l'horizon ; transition abrupte.
- Bcs 26-61 : Consistance très dure à l'état sec ; induré ; pores très peu nombreux, fins ; cailloux et fragment minéraux dominé par la dalle latérite ; présence d'horizon compact (ou pan), pétroplinthite ; absence d'éléments artificiels ; racines très peu nombreuses, très fines, très faiblement développées à travers tout l'horizon.

2) Bloc 2

1. Description concernant la station du profil

- Nom du profil : B2
- Date de la description : 12/08/2023
- Auteur : Banza et Kasongo
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,7877691° Latitude : -11,419701°
- Altitude : 1163 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du droit de la vallée de la rivière Kifumashi.
 - Microrelief : quelques termitières géantes à côté du bloc
- Pente : assez forte (classe 4)
- Végétation : graminées à côté d'un grand champ de maïs.
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales sur le sol

- Roche-mère : le Katangien
- Drainage : bon
- État hydrique durant la description : sec sur toute l'épaisseur du profil
- Cailloux et affleurements de surface : moins des cailloux et blocs latéritiques.
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : Agriculture (travaux d'aménagements) et tranchée antiérosive et drainage.

3. Classification

- WRB : Ferralsol endopetroplinthique
- Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique

4. Description du profil

Ap	0-27 :	Argilo-limoneux, gris (10YR6/1) à l'état sec avec très peu des taches fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant et consistance dure ; fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments très peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; présence des nombreuses racines, moyennes et fines, fortement développées, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
Bw	27-79 :	Argileux, jaune olive (5Y6/6) à l'état sec avec moins de taches ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; collant et de consistance dure ; fortement cimenté ; pores fins assez nombreux et moyens ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; présence des insectes, assez nombreuses racines très fines à travers tout l'horizon.

3) Bloc 3

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B3
- Date de la description : 16/03/2022
- Auteur : Banza M et Kasongo L.
- Localisation :

- Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
 - Longitude : 27,777827° Latitude : -11,429060°
 - Altitude : 1174 m
 - Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief :
 - Pente : < 5%
 - Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
 - Climat (Köppen) : Cw6
2. Informations générales sur le sol
- Roche-mère : le Katangien
 - Drainage : drainage modéré
 - État hydrique durant la description : humide sur toute l'épaisseur
 - Profondeur de la nappe phréatique : > 1,5 m
 - Cailloux et affleurements de surface : graviers latéritiques
 - Érosion : en nappe
 - Sels ou alcalis : néant
 - Influence humaine : Agriculture et aménagement
3. Classification
- WRB : Ferralsol endopetroplinthique
 - Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique
4. Description du profil
- | | | |
|----|---------|---|
| Ap | 0-30 : | Argilo-limoneux, brun (10YR4/3) à l'état frais avec très nombreuses taches, fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant, peu cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments peu nombreux (cailloux latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, vers de terre, insectes, nids de termites ; racines très nombreuses, moyennes, fines, à travers tout l'horizon ; transition diffuse. |
| AB | 30-43 : | Argileux, brun (7,5YR4/3) à l'état frais avec taches assez nombreuses, moyennes ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; très collant ; |

fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments plusieurs graviers latéritiques ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, nids des termites ; racines assez nombreuses, fines, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.

Bs 43-80 : Argileux, brun (7,5YR5/4) à l'état frais avec nombreuses grandes taches ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; très collant, très fortement cimenté ; nombreux pores fins ; cailloux et fragments très nombreux (graviers et cailloux latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; pas des caractères d'origines biologique ; racines peu nombreuses, très fines, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.

4) Bloc 4

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B4
- Date de la description : 12/08/2023
- Auteur : Banza M et Kasongo L.
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,776534° Latitude : -11,424987°
- Altitude : 1181 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
- Pente : modérée
- Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales sur le sol

- Roche-mère : le Katangien
- Drainage : drainage modéré
- État hydrique durant la description : humide sur toute l'épaisseur

- Profondeur de la nappe phréatique : > 10 m
- Cailloux et affleurements de surface : peu à très pierreux
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : agriculture et aménagement

3. Classification

- WRB : Ferralsol épipetroplithique
- Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique

4. Description du profil

Ap	0-20 :	Argilo-limoneux, gris (10YR6/1) à l'état sec avec moins des taches fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; collant, peu cimenté ; nombreux pores, grossiers, moyens ; cailloux et fragments très peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; comme caractères d'origines biologique, présence d'insectes, très nombreuses racines fines, développées à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
AB	20-35 :	Argilo limoneux, gris jaunâtre (2,5Y6/1) à l'état sec avec peu des taches ; structure polyédrique subangulaire développée ; peu collant, peu cimenté ; nombreux pores, moyens à fins ; présence des cailloux et fragments peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, la présence d'insectes et d'assez nombreuses racines fines à moyenne, faiblement développées à travers tout l'horizon ; transition distincte.
Bs	35-93 :	Consistance très dure à l'état sec ; induré ; pores très peu à pas, fins ; cailloux et fragment minéraux dominé par la dalle latérite ; présence d'horizon compact (ou pan), pétroplinthite ; absence d'éléments artificiels et des caractères d'origines biologiques particuliers.

5) Bloc 5

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B5
- Date de la description : 13/08/2023
- Auteur : Banza M et Kasongo L.

- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
 - Longitude : 27,776817° Latitude : -11,418437°
 - Altitude : 1166 m
 - Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
 - Pente : > 2 %
 - Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
 - Climat (Köppen) : Cw6
2. Informations générales sur le sol
- Roche-mère : le Katangien
 - Drainage : drainage pauvre
 - État hydrique durant la description : sec sur toute l'épaisseur du profil
 - Cailloux et affleurements de surface : quelques nodules de la plinthe en surface.
 - Érosion : en nappe et en rigole
 - Sels ou alcalis : néant
 - Influence humaine : Agriculture et aménagements
3. Classification
- WRB : Fluvisol vertique
 - Soil taxonomy : Tropoustent vertique isohyperthermique
4. Description du profil
- Ap 0-46 : Argileux, gris rougeâtre (2,5YR5/1) à l'état sec, avec moins des taches, fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; collant, cimenté ; pores nombreux, fins à grossiers ; pas des cailloux et fragments ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, insectes (fourmis), rats ; racines très nombreuses, moyennes et fines, développées à travers tout l'horizon ; transition diffuse.

- AB 46-92 : Argileux, gris rougeâtre (2,5R6/1) à l'état sec avec peu des taches, fines ; structure polyédrique subangulaire fortement développée ; très collant ; fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; moins des cailloux et fragments (nodules latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, insectes ; racines assez nombreuses, fines à très fines, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
- Bs 92-150 : Argileux, rouge pâle (2,5YR7/2) à l'état sec avec des tache, moyennes ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; collant, très fortement cimenté ; peu des pores, fins ; cailloux et fragments très nombreux (graviers latéritiques) ; présence d'horizon compact (ou pan) en développement ; absence d'éléments artificiels ; pas des caractères d'origines biologique.

6) Bloc 6

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B6
- Date de la description : 13/08/2023
- Auteur : Banza M et Kasongo L.
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,776652° Latitude : -11,412799°
- Altitude : 1163 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage :
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
- Pente : < 5%
- Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales concernant le sol

- Roche-mère : le Katangien

- Drainage : drainage modéré
- État hydrique durant la description : sec sur toute l'épaisseur du profil
- Cailloux et affleurements de surface : graviers et blocs latéritiques
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : agriculture et aménagement

3. Classification

- WRB : Ferralsol haplique
- Soil taxonomy : Haplustox isohyperthermique

4. Description du profil

Ap	0-25 :	Argilo-limoneux, Marron très pâle (10YR7/3) à l'état sec, pas des taches, fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant, peu cimenté ; pores nombreux, fins à grossiers, moyens ; cailloux et fragments très peu nombreux (nodules latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, insectes (fourmis) ; racines très nombreuses, moyennes et fines à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
AB	25-132 :	Argileux, brun claire (7,5YR6/4) à l'état sec avec taches moins nombreuses, fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; très collant ; fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments plusieurs graviers latéritiques ; développement d'un horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, fourmis ; racines moins nombreuses, fines à grossières, à travers tout l'horizon ; transition diffuse.
Bs	132-201 :	Argileux, brun jaunâtre (10YR5/4) à l'état sec avec des tache peu nombreuses, fines; structure polyédrique subangulaire développée ; peu collant, très fortement cimenté ; assez nombreux pores fins à très fins; cailloux et fragments très nombreux (graviers et cailloux latéritiques) ; présence d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; pas des caractères d'origines biologique ; racines très peu nombreuses, très fines, faiblement développées à travers tout l'horizon ; transition abrupte.

7) Bloc 7

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B7
- Date de la description : 16/03/2022
- Auteur : Banza M et Kasongo L.
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,776299° Latitude : -11,426300°
- Altitude : 1184 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
- Pente : très faible
- Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales concernant le sol

- Roche-mère : le Katangien
- Drainage : drainage modéré
- État hydrique durant la description : humide sur toute l'épaisseur du profil
- Cailloux et affleurements de surface : peu pierreux, blocs latéritiques en dehors du champ
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : Agriculture et aménagement

3. Classification

- WRB : Ferralsol endopetroplinthique
- Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique

4. Description du profil

Ap 0-20 : Argilo-limoneux, brun grisâtre très foncé (2,5Y3/2) à l'état frais avec taches assez nombreuses ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant, peu cimenté ; avec d'assez nombreux pores;

		cailloux et fragments très peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; comme caractères d'origines biologique, présence d'insectes, nids de termites et des très nombreuses racines fines à travers tout l'horizon ; transition abrupte
AB	20-30 :	Argileux, brun olive (2,5Y4/4) à l'état frais avec d'assez nombreuses taches ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; collant, peu cimenté ; avec d'assez nombreux pores ; une présence des cailloux et fragments peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; et comme caractères d'origines biologique, la présence d'insectes et d'assez nombreuses racines fines à travers tout l'horizon ; transition distincte.
Bs	30-75 :	Argileux, brun jaunâtre foncé (10YR4/6) à l'état frais avec des nombreuses taches ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; collant, cimenté ; à pores fins très nombreux ; avec des très nombreux cailloux et fragments ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; pas des caractères d'origines biologique particuliers ; racines très peu nombreuses, très fines, à travers tout l'horizon ; transition distincte
Bsx	> 75 :	Argileux, brun jaunâtre foncé (10YR4/6) à l'état frais avec taches des nombreuses ; induré ; pas assez des pores ; cailloux et fragments très nombreux ; présence d'horizon compact (ou pan), pétroplinthite ; absence d'éléments artificiels ; pas des caractères d'origines biologique ; racines très peu nombreuses, très fines, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.

8) Bloc 8

1. Description de la station du profil

- No du profil : B8
- Date de la description : 22/08/2022
- Auteur : Banza M, Kamanda K et Kasongo L.
- Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,769851° Latitude : -11,428027°

- Altitude : 1164 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage :
 - Position topographique du profil : flanc du droit de la vallée de la rivière Kifumashi
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
- Pente : assez forte (classe 4)
- Végétation : graminées à côté d'un grand champ de maïs
- Climat (Köppen) : Cw6

2. Informations générales sur le sol

- Roche-mère : le Katangien
- Drainage : drainage modéré (classe 3)
- État hydrique durant la description : sec dans les deux premiers horizons et faiblement humide dans le reste des horizons
- Cailloux et affleurements de surface : assez pierreux, nombreux nodules plinthitiques
- Érosion : en nappe
- Sels ou alcalis : néant
- Influence humaine : Agriculture intensive, tranchée antiérosive et drainage

3. Classification

- WRB : Ferralsol plinthitique épisquelettique
- Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique

4. Description du profil

Ap	0-35	Argilo-limoneux, brun (10YR5/3) à l'état sec avec des taches nombreuses et fines ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; peu collant et consistance peu dure ; fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments peu nombreux (concrétions latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; présence des nombreuses racines, moyennes et fines, fortement développées, à travers tout l'horizon ; transition diffuse.
Bcs	35-110	Argileux, jaune rougeâtre (7,5Y6/6) à l'état sec avec taches très nombreuses, moyennes (concrétion latéritique) ; structure polyédrique subangulaire moyennement développée ; collant et de consistance dure ; fortement cimenté ; nombreux pores fins et

moyens ; plusieurs et fragments graviers latéritiques ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; présence des insectes, assez nombreuses racines très fines à travers tout l'horizon.

9) Bloc 9

1. Description concernant la station du profil
 - Nom du profil : B9
 - Date de la description : 21/05/2022
 - Auteur : Banza M et Kasongo L.
 - Localisation :
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
 - Longitude : 27,758703° Latitude : -11,43330°
 - Altitude : 1169 m
 - Géomorphologie
 - Physionomie du paysage : plateau
 - Position topographique du profil : flanc du bassin versant de la Kifumashi et légèrement incliné vers l'Est
 - Microrelief : quelques termitières géantes et une petite forêt dégradée à côté du bloc.
 - Pente : < 5%
 - Végétation : Adventices à côté d'un grand champ de maïs
 - Climat (Köppen) : Cw6
2. Informations générales sur le sol
 - Roche-mère : le Katangien
 - Drainage : drainage modéré (classe 3)
 - État hydrique durant la description : sec sur l'ensemble du profil
 - Cailloux et affleurements de surface : assez pierreux, nodules et blocs plinthitiques
 - Érosion : en nappe
 - Sels ou alcalis : néant
 - Influence humaine : Agriculture, tranchée antiérosive et drainage
3. Classification
 - WRB : Ferralsol plinthitique épisquellettique
 - Soil taxonomy : Plinthustox isohyperthermique
4. Description du profil

Ap	0-30 :	Argileux, gris pâle (2,5Y7/2) à l'état sec avec des taches peu nombreuses et fines ; structure polyédrique subangulaire développée ; peu collant et consistance dure ; fortement cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments peu nombreux (cailloux latéritiques) ; pas d'horizon compact (ou pan) ; présence des fragments de charbon des bois ; présence des insectes ; racines nombreuses, moyennes, fortement développées, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
Bcs1	30-70 :	Argileux, brun pâle (2,5Y8/2) à l'état sec avec des nombreuses taches moyennes (concrétion latéritique) ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; peu collant et de consistance dure ; fortement cimenté ; nombreux pores fins ; plusieurs fragments et graviers latéritiques de taille moyenne ; pas d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; racines peu nombreuses, fines, moyennement développées à travers tout l'horizon ; transition diffuse.
Bcs2	>70 :	Argileux, brun pâle (2,5Y7/4) à l'état sec avec nombreuses taches latéritique ; peu collant et de consistance très dure ; très fortement cimenté ; pores nombreux, fins à extrêmes fins ; fragments très nombreux (graviers) ; présence d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; racines peu nombreuses, très fines, faiblement développées à travers tout l'horizon ; transition diffuse.

10) Bloc 10

1. Description de la station du profil

- Nom du profil : B10
- Date de la description : 13/08/2023
- Auteur : Banza et Kasongo
- Localisation :
 - Feuille : Lubumbashi, Haut-Katanga
 - Zone : Village Amato
 - Localisation : 60 km à l'Est de la ville de Lubumbashi, à 2,60 km de la route Lubumbashi-Kasenga.
- Longitude : 27,65720° Latitude : -11,429580°
- Altitude : 1192 m
- Géomorphologie
 - Physionomie du paysage :

- Position topographique du profil : flanc du droit de la vallée de la rivière Kifumashi
 - Microrelief : Agriculture, tranchée antiérosive et drainage
 - Pente : < 5 % : pente modérée (classe 3)
 - Végétation : graminées à côté d'un grand champ de maïs
 - Climat (Köppen) : Cw6
2. Informations générales sur le sol
- Roche-mère : le Katangien
 - Drainage : bon
 - État hydrique durant la description : sec sur toute l'épaisseur du profil
 - Profondeur de la nappe phréatique : > 10 m
 - Cailloux et affleurements de surface : très peu, par-ci par-là
 - Érosion : en nappe
 - Sels ou alcalis : néant
 - Influence humaine : Agriculture, tranchée antiérosive et drainage
3. Classification
- WRB : Ferralsol haplique
 - Soil taxonomy : Haplustox isohyperthermique
4. Description du profil

Ap	0-27 :	Argilo-limoneux, gris (7,5YR6/1) à l'état sec, avec des taches très peu nombreuses, fines ; structure polyédrique subangulaire très développée ; peu collant et de consistance meuble ; moins cimenté ; pores nombreux, fins, moyens ; cailloux et fragments très peu nombreux ; pas d'horizon compact (ou pan) ; pas d'éléments artificiels ; caractères d'origines biologique, insectes ; nombreuses racines, grossières, moyennes, fines, fortement développées, à travers tout l'horizon ; transition abrupte.
Bs	27-130 :	Argileux, jaune rougeâtre (5YR7/6) à l'état sec avec nombreuses taches ; structure polyédrique subangulaire faiblement développée ; collant et de consistance très dure ; fortement cimenté ; pores fins moins nombreux ; présence d'horizon compact (ou pan) ; absence d'éléments artificiels ; très peu des racines, très fines, faiblement développée à travers tout l'horizon.

Afin de caractériser l'hétérogénéité pédologique du site et les contrastes induits par les interventions réalisées, la Figure A-1 présente les profils représentatifs des dix blocs étudiés. Ces coupes verticales révèlent la variabilité texturale, la distribution du matériau plinthitique et les modifications du profil liées au sous-solage et à

l'amendement aux matériaux de termitières. Les tableaux A-1 et A-2 présentent les principales propriétés physico-chimiques et hydrauliques mesurées pour ces profils.

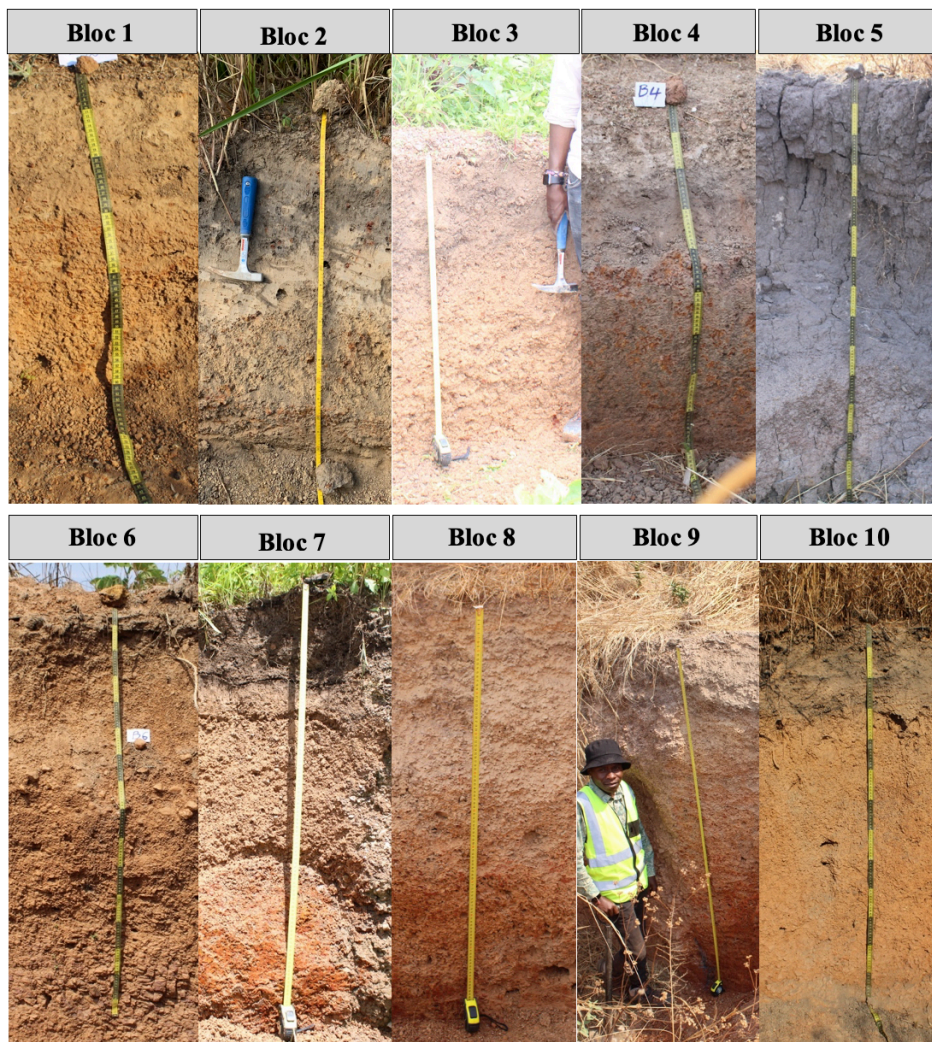


Figure A-1 : Profils pédologiques représentatifs des dix blocs du site d'étude, illustrant l'hétérogénéité texturale et la variabilité du matériau plinthitiques après sous-solage et amendement aux matériaux de termitières.

A.2. Caractéristiques physico-chimiques des profils pédologiques dans les blocs du site d'étude

Tableau A-1 : Propriétés physico-chimiques des profils pédologiques après sous-solage et amendement avec des matériaux de termitières.

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	pH eau	pH KCl	COT (%)	P		Ca	K	Mg	Mn	Cu	Fe	Al	Argile	Limon	Sable
						(mg kg ⁻¹)	(%)										
B1	Ap	0-26	8,2	7,5	0,9	1,3	2,546	205,3	201,5	189,9	2,6	51,4	48,3	19,4	33,2	47,4	
	Bw	26-61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
B2	Ap	0-27	6,9	5,6	0,8	0,4	875,3	62,7	77,8	117,5	1,8	44,8	49,9	21,1	40,4	38,5	
	AB	27-79	5,6	4,2	0,2	0,3	266,2	71,5	50,4	30,5	0,5	14,6	147,4	28,4	37,7	33,9	
B3	Ap	0-30	7,9	7,6	1,1	8,9	2,566	96,1	358,1	194,8	3,4	55,7	66,9	22,2	47,6	30,2	
	AB	30-43	6,0	4,9	0,6	2,4	245,2	63,6	126,0	27,4	1,0	20,5	97,6	20,0	45,2	34,8	
	Bs	43-80	5,5	4,3	0,4	1,9	82,7	134,9	148,3	26,5	0,7	18,3	133,4	30,6	44,5	24,9	
B4	Ap	0-20	8,4	7,3	1,2	13,9	12,499	218,9	795,2	166,9	3,9	72,7	52,0	24,1	57,9	18,0	
	AB	20-35	8,0	7,6	1,8	19,0	2,651	70,6	260,4	39,8	2,6	43,6	67,4	16,1	52,3	31,6	
B5	Ap	0-46	6,1	5,2	2,0	1,1	1,735	244,8	375,9	16,4	2,1	67,8	94,3	18,6	56,0	25,4	
	AB	46-92	7,2	5,4	0,4	1,0	1,101	113,5	109,9	31,0	0,6	8,1	65,7	37,6	30,2	32,2	
	Bs	92-150	7,8	6,4	0,2	4,3	1,331	148,4	386,0	190,0	0,3	22,5	87,7	44,0	27,2	28,8	
B6	Ap	0-25	5,9	4,8	1,2	2,0	514,2	144,9	86,9	104,5	1,0	30,4	113,9	19,7	32,9	47,4	
	AB	25-132	6,1	4,8	0,2	0,6	442,8	238,1	143,9	102,5	0,4	22,3	115,0	40,2	28,1	31,7	
	Bs	132-201	5,7	4,2	0,2	2,7	190,5	147,2	209,3	20,1	0,3	7,8	134,5	34,6	38,0	27,4	
B7	Ap	0-20	8,0	7,6	2,9	44,7	4,856	324,2	459,1	197,9	3,3	123,4	132,6	20,6	50,5	28,9	
	AB	20-30	6,5	5,9	0,9	3,8	298,0	188,2	169,4	91,9	1,5	26,9	78,8	18,0	51,7	30,3	
	Bs	30-75	5,6	4,4	0,4	1,5	97,8	160,3	101,4	75,1	0,6	23,6	112,0	24,3	51,3	24,4	
	Bsx	>75	5,6	5,2	0,3	1,7	152,3	115,3	157,7	49,6	0,5	17,1	105,5	-	-	-	
B8	Ap	0-35	6,0	4,8	0,7	3,4	165,6	101,5	122,2	34,5	1,9	24,7	94,1	18,8	41,2	40,0	
	Bcs	35-110	6,1	4,2	0,2	1,5	27,0	119,5	69,5	10,4	0,9	10,2	233,6	34,1	45,0	20,9	
B9	Ap	0-30	7,1	6,4	1,4	8,7	746,3	121,8	240,4	128,1	3,4	76,4	82,7	22,2	53,2	24,6	
	Bcs1	30-70	5,3	4,2	0,7	2,9	90,3	125,2	110,8	58,2	1,9	34,4	194,6	27,8	49,6	22,6	
	Bcs2	>70	5,5	4,5	0,3	1,1	71,3	310,2	177,4	27,4	1,1	23,6	135,9	-	-	-	
B10	Ap	0-27	7,5	6,7	2,3	154,8	1,818	486,6	446,4	47,8	2,1	97,2	168,2	12,0	43,5	44,5	
	Bs	27-130	7,0	5,4	0,3	3,7	75,8	524,5	80,9	3,1	0,3	17,2	80,9	21,8	46,4	31,8	

A.3. Caractéristiques hydrauliques des profils pédologiques dans les blocs du site d'étude

Tableau A-2 : Densité apparente (da), conductivité hydraulique à saturation (Ksat), Teneur en eau à la capacité au champ (33kPa) et teneur en eau au point de flétrissement (1500kPa) dans les profils pédologiques du site.

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	da (g cm ⁻³)	Ksat (mm jour ⁻¹)	Teneur en eau (m m ⁻³)	
					33kPa	1500kPa
Bloc 1	Ap	0-26	1,35	7780	0,257	0,157
	Bw	-	-	-	-	-
Bloc 2	Ap	0-27	1,53	51,7	0,215	0,159
	AB	27-79	1,5	664	0,238	0,195
Bloc 3	Ap	0-30	1,56	86,4	0,191	0,108
	AB	30-43	1,85	6130	0,148	0,075
	Bs	43-80	1,92	7780	0,144	0,084
Bloc 4	AP	0-20	1,46	125	0,232	0,18
	AB	20-35	1,19	126	0,264	0,191
Bloc 5	Ap	0-46	1,19	625	0,302	0,241
	AB	46-92	1,7	276	0,242	0,203
	BS	92-150	1,77	63,9	0,265	0,226
Bloc 6	Ap	0-25	1,37	333	0,214	0,137
	AB	25-132	1,65	32,9	0,194	0,148
	Bs	132-201	-	-	-	-
Bloc 7	Ap	0-20	1,42	1210	0,262	0,159
	AB	20-30	1,66	4320	0,184	0,085
	Bs	30-75	1,92	864	0,154	0,094
	Bsx	>75	-	-	-	-
Bloc 8	Ap	0-35	1,46	44,7	0,163	0,098
	Bcs	35-110	1,74	400,5	0,115	0,062
Bloc 9	Ap	0-30	1,17	1810	0,261	0,094
	Bcs1	30-70	1,46	892,4	0,189	0,085
	Bcs2	>70	-	-	-	-
Bloc 10	Ap	0-27	1,45	1410	0,184	0,125
	BS	27-130	1,62	767	0,206	0,155

Annexes B

Matériels supplémentaires du chapitre 4

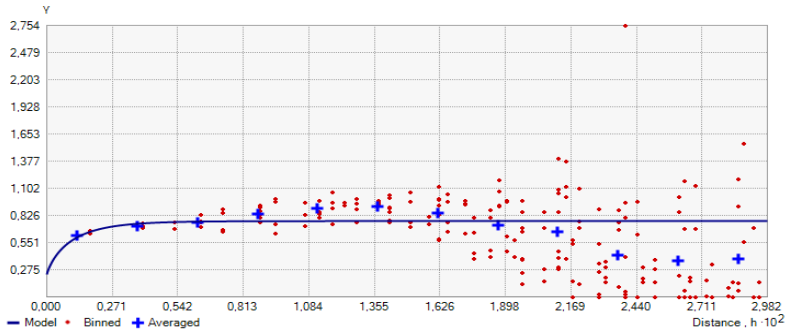


Figure B-1 : Semivariogram of observed versus predicted soil depth derived from the kriging method.

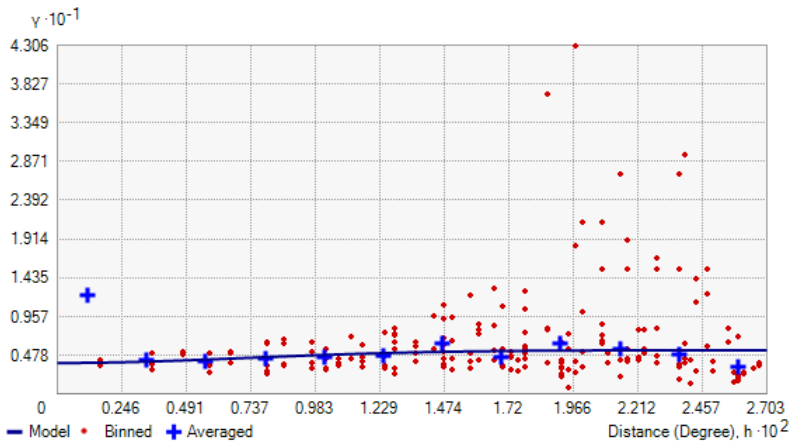


Figure B-2 : Semivariogram of observed maize grain yield and kriging-predicted yield for the first growing season.

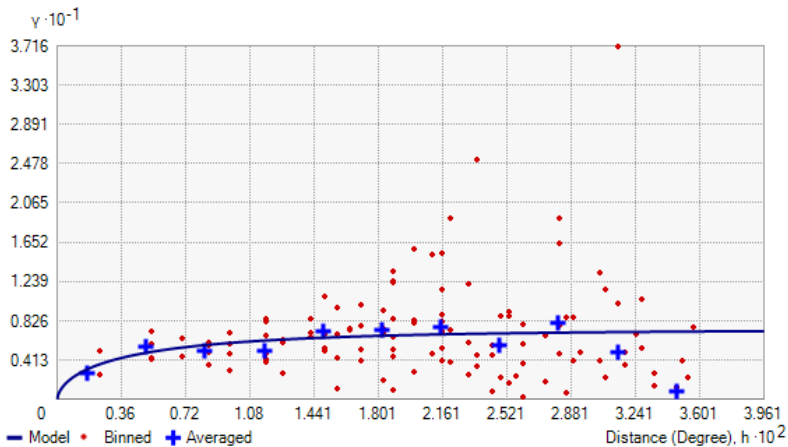
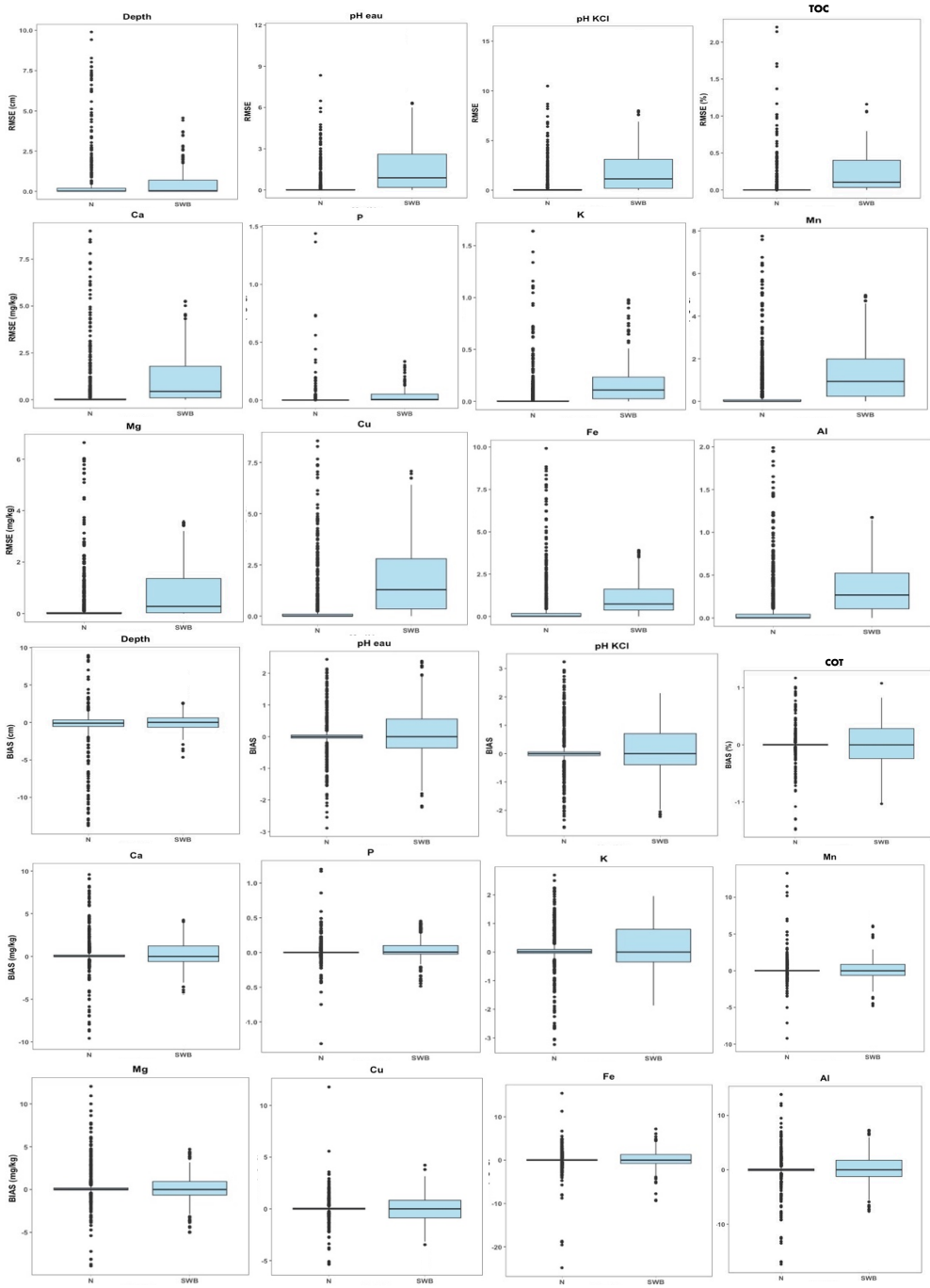


Figure B-3 : Semivariogram of observed maize grain yield and kriging-predicted yield for the first growing season.

Restauration fonctionnelle des Plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières



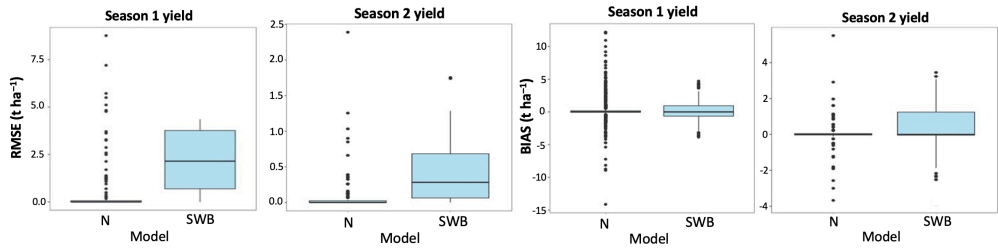


Figure B-4 : Performance evaluation of the interpolation methods based on root mean square error (RMSE) and bias for soil variables and maize grain yield in the study area. N : Natural Neighbor; SWB: Spline With Barriers.

Annexes C

Matériels supplémentaires du chapitre 5

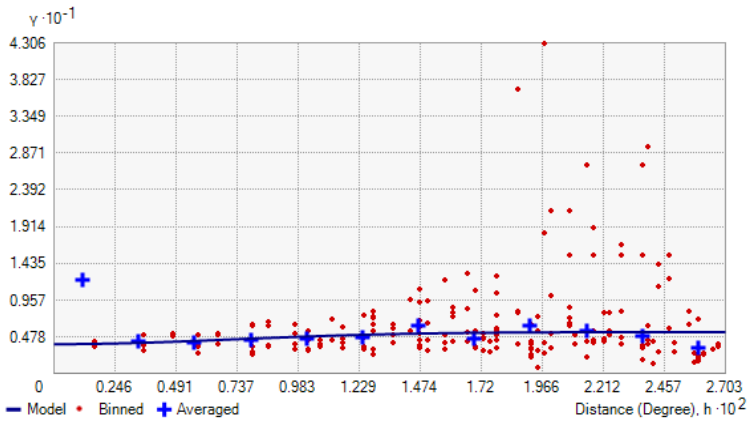


Figure C-1 : Semivariogram of observed grain maize yield and yield predicted by kriging for the first growing season.

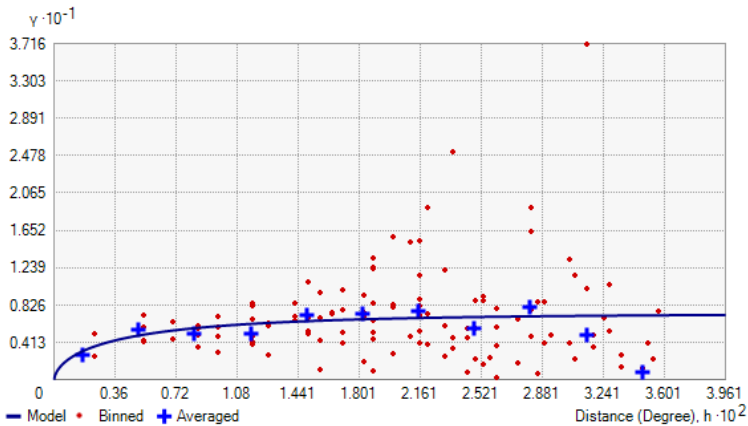


Figure C-2 : Figure S2. Semivariogram of observed maize grain yield and yield predicted by kriging for the second growing season.

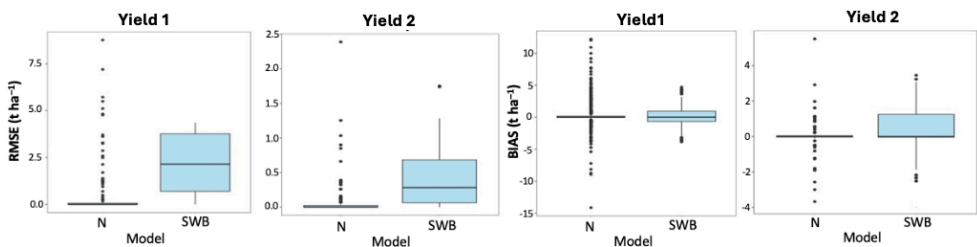


Figure C-3 : Performance evaluation of the interpolation methods based on root mean square error (RMSE) and bias for maize grain yield in the study area. N : Natural Neighbor and SWB: Spline With Barriers.

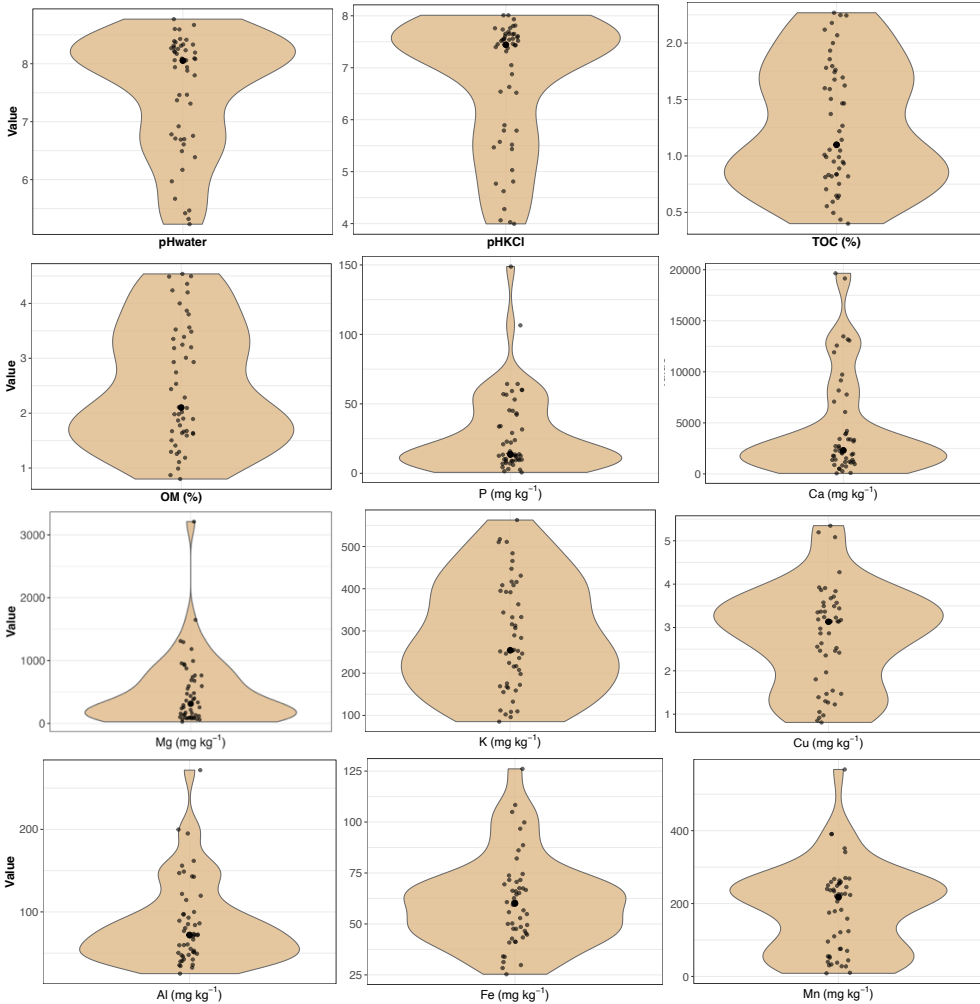


Figure C-4 : Distribution of soil physicochemical properties at 0–10 cm after subsoiling and amendment with termite mound materials at the study site. Each point corresponds to an individual observation (n = 50), while the width of the violin represents the probability density of the values for each variable analyzed. TOC : Total Organic Carbon, OM : organic Matter.

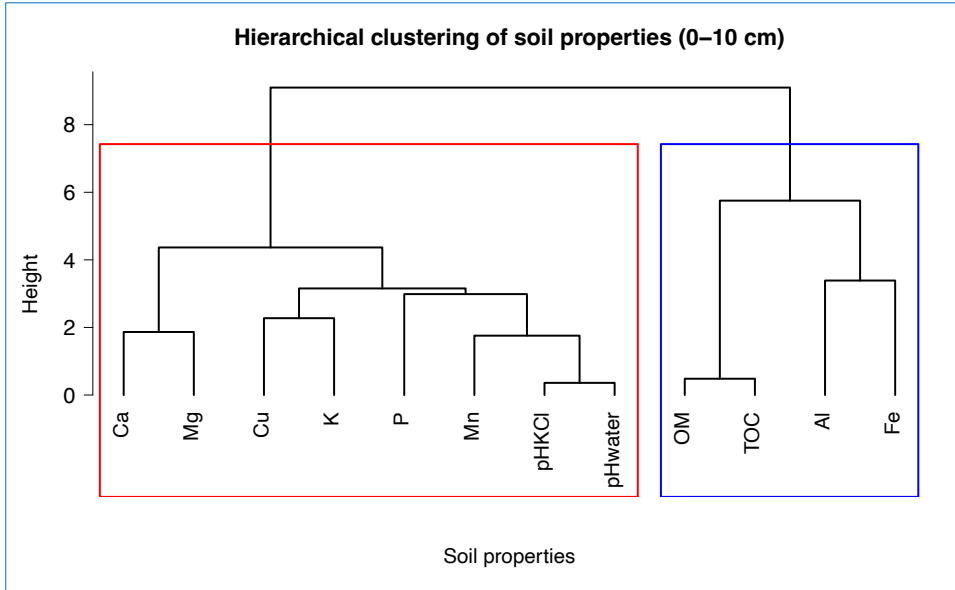


Figure C-5 : Hierarchical classification of physicochemical properties at 0–10 cm. The dendrogram represents the hierarchical classification of soil properties measured at this depth. The distance matrix was calculated using the metric $1-|r|$, based on Pearson's correlation coefficient, and the groupings were performed using the average linkage method. TOC : Total Organic Carbon, OM : organic Matter.

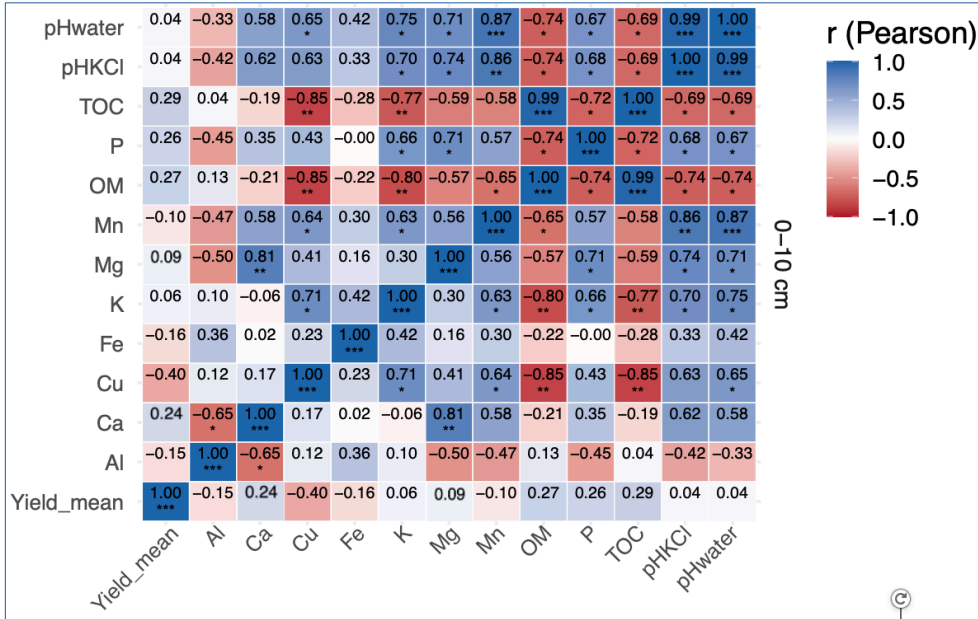


Figure C-6 : Correlation matrix between average maize yield (Yield_mean) and physicochemical properties at 0–10 cm. Each cell represents Pearson's correlation coefficient (r), illustrated by a color gradient (blue = positive correlation, red = negative correlation, white = no relationship). Correlations are calculated separately within each depth. TOC : Total Organic Carbon, OM : organic Matter.

Tableau C-1 : Comparison of soil physicochemical properties between the two depths (0–10 cm and 0–40 cm) after subsoiling and amendment with termite mound material. For each variable, the following are presented: the minimum (min), maximum (max), mean, standard deviation (sd), coefficient of variation (CV), the result of one-way ANOVA (p_{anova}), effect size (η^2), the p-value of the Wilcoxon–Mann–Whitney test when data do not follow a normal distribution (p_{wilcox}), and the p-value of the Shapiro–Wilk test (Shapiro_p). The Sign. column indicates the statistical significance of the differences between depths: $p < 0.05$; ns = not significant,

Property	Depth (cm)	<i>n</i>	Min	Max	Mean	sd	CV (%)	p_{anova}	η^2	p_{wilcox}	Shapiro_p	ns
pH _{Water}	0-10	50	5.2	8.8	7.5	1.0	13.3	0.16	0.02	0.24	0.00	ns
	0-40	50	4.8	9.3	7.2	1.2	16.7					
pH _{KCl}	0-10	50	4.0	8.0	6.7	1.2	17.9	0.18	0.02	0.46	0.00	ns
	0-40	50	3.9	8.2	6.4	1.4	21.9					
Ca (mg/kg)	0-10	50	53.1	19,651	4,426	4,892	110.5	0.90	0.00	0.63	0.00	ns
	0-40	50	155.6	22,679	4,553	5,405	118.7					
TOC (%)	0-10	50	0.40	2.3	1.4	0.6	42.9	0.03	0.05	0.02	0.00	*
	0-40	50	0.13	3.6	1.0	0.7	70.0					
P (mg/kg)	0-10	50	0.68	148.8	27.7	28.6	103.2	0.03	0.05	0.08	0.00	*
	0-40	50	0.35	96.7	17.1	16.1	94.2					
K (mg/kg)	0-10	50	85.3	562.7	287	130	45.3	0.30	0.01	0.70	0.00	ns
	0-40	50	101.1	904.7	321	186	57.9					
Mg (mg/kg)	0-10	50	27.2	3,211	498	558	112.0	0.54	0.00	0.72	0.00	ns
	0-40	50	65.6	3,098	580	750	129.3					
Al (mg/kg)	0-10	50	25.2	271.8	85.4	50.6	59.3	0.37	0.01	0.16	0.00	ns
	0-40	50	22.5	354.3	94.9	55.3	58.3					
Fe (mg/kg)	0-10	50	25.3	126.1	60.7	21.8	35.9	0.16	0.02	0.67	0.00	ns
	0-40	50	27.8	254.6	70.2	41.8	59.5					
Cu (mg/kg)	0-10	50	0.81	5.4	2.8	1.2	42.9	0.75	0.00	0.76	0.00	ns
	0-40	50	0.83	6.1	2.7	1.4	51.9					
Mn (mg/kg)	0-10	50	8.6	567.9	183	119	65.0	0.82	0.00	0.44	0.00	ns
	0-40	50	15.9	702.0	177	15	8.5					

Annexes D

Matériels supplémentaires du chapitre 6

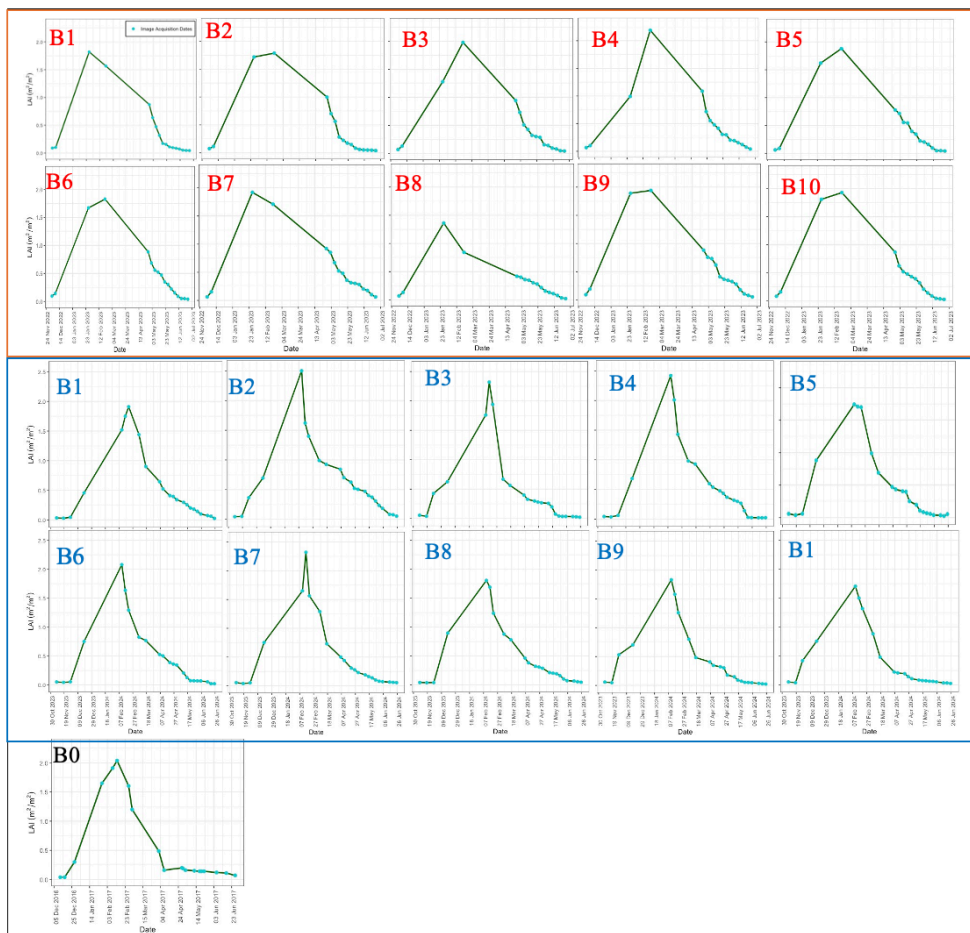


Figure D-1 : Temporal evolution of the maize leaf area index (LAI) in the blocks after SR calculation. B1-B10: Maize blocks that benefited from subsoiling and spreading of termite mound materials. B0: control without subsoiling and amendment with termite mound material. Red frame for the 2022-2023 growing season and blue frame for the 2023-2024 season.

Restauration fonctionnelle des Plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières

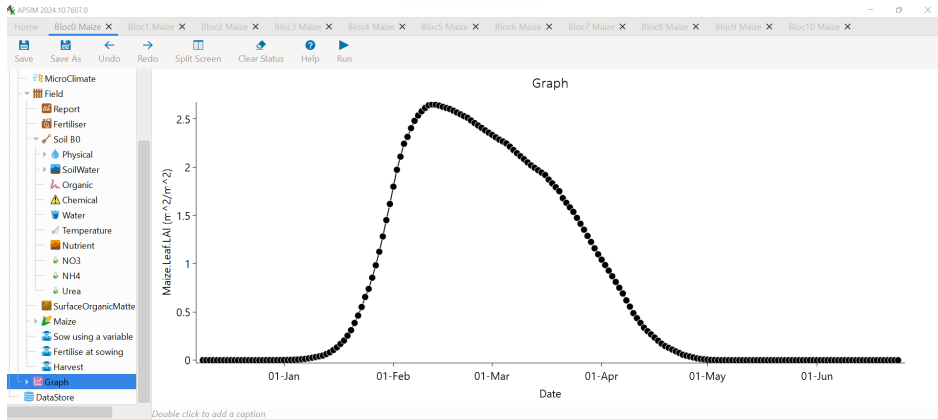


Figure D-2 : Screenshot of leaf area index (LAI) simulation results in APSIM for block B0 during the 2016-2017 growing season.

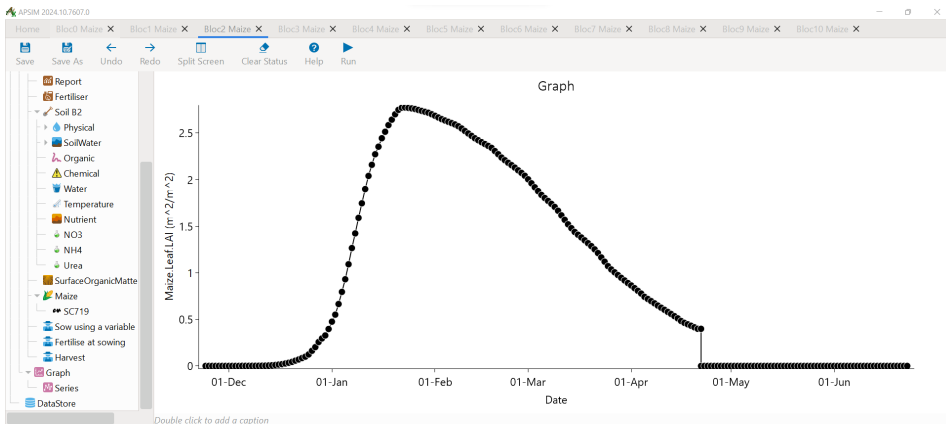


Figure D-3 : Screenshot of leaf area index (LAI) simulation results in APSIM for block B2 during the 2022-2023 growing season.

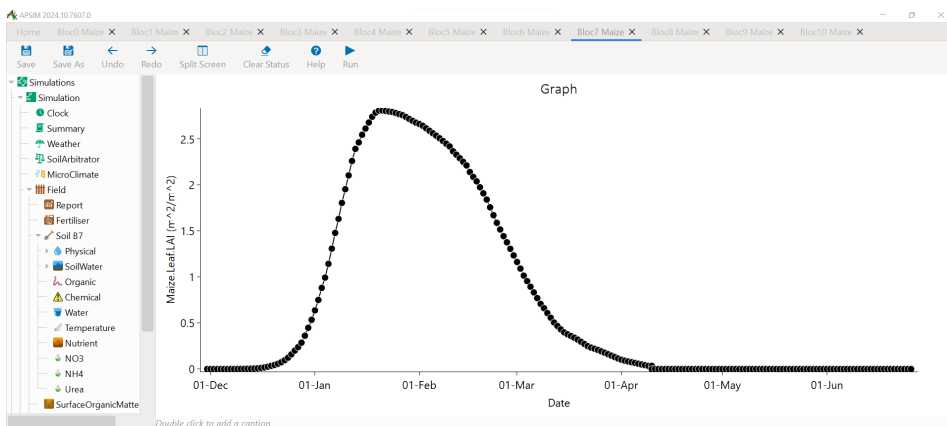


Figure D-4 : Screenshot of leaf area index (LAI) simulation results in APSIM for block B7 during the 2023-2024 growing season.

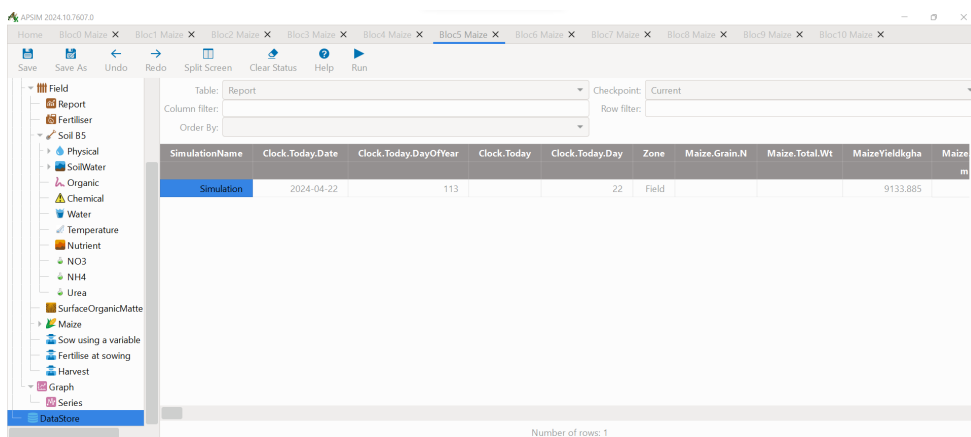


Figure D-5 : Screenshot of yield simulation results in APSIM for block B5 during the 2023-2024 growing season.

Restauration fonctionnelle des Plinthosols par sous-solage profond et amendement à base de matériaux de termitières

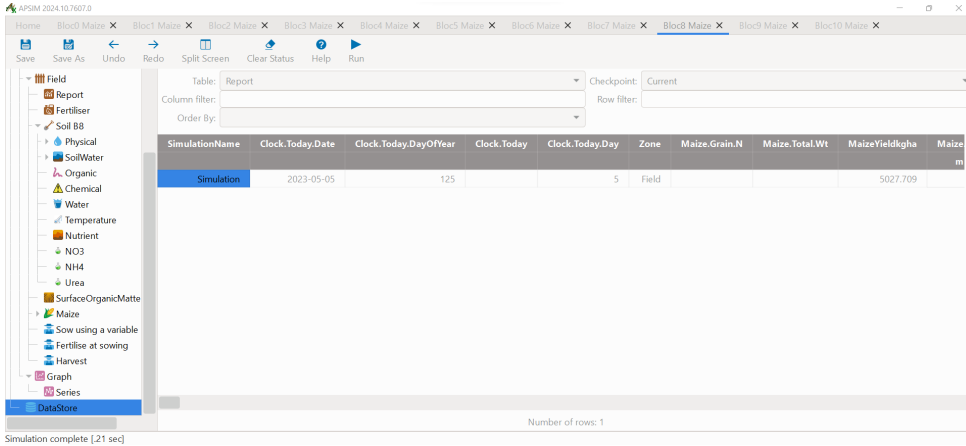


Figure D-6 : Screenshot of yield simulation results in APSIM for block B8 during the 2022-2023 growing season.

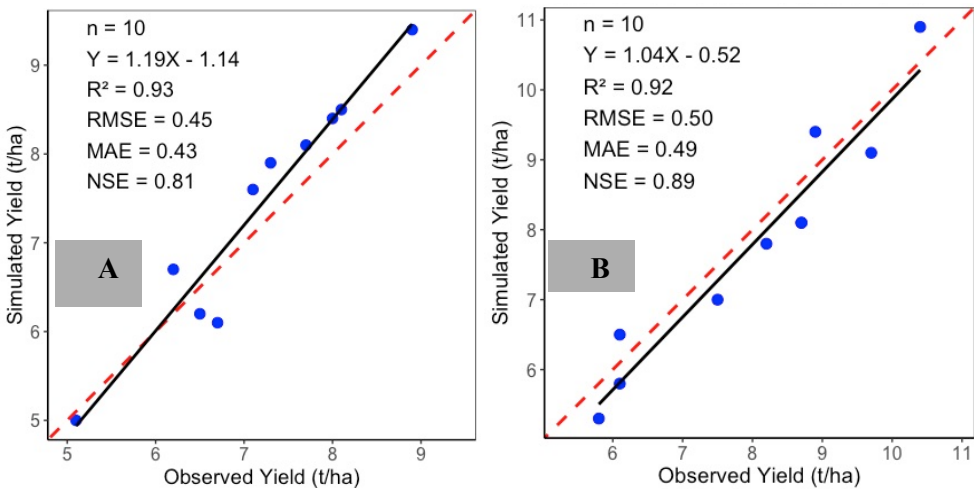


Figure D-7 : Simulated and observed grain maize yield in the blocks. A: 2022-2023 growing season; B: 2023-2024 growing season. The solid line represents the linear regression fit, and the dashed line represents the 1:1 line, indicating the ideal fit

Références bibliographiques

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* (Vol. 2, Number 4, pp. 433–459). <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abe, S. S., Watanabe, Y., Onishi, T., Kotegawa, T., & Wakatsuki, T. (2011). Nutrient storage in termite (*Macrotermes bellicosus*) mounds and the implications for nutrient dynamics in a tropical savanna Ultisol. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(6), 786–795. <https://doi.org/10.1080/00380768.2011.640922>
- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Ackerman, I. L., Teixeira, W. G., Riha, S. J., Lehmann, J., & Fernandes, E. C. M. (2007). *The impact of mound-building termites on surface soil properties in a secondary forest of Central Amazonia*. 37, 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.08.005>
- Adam, M., MacCarthy, D. S., Traoré, P. C. S., Nenkam, A., Freduah, B. S., Ly, M., & Adiku, S. G. K. (2020). Which is more important to sorghum production systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa: Climate change or improved management practices? *Agricultural Systems*, 185(August), 102920. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102920>
- Adeyanju, D., Mburu, J., Gituro, W., Chumo, C., Mignouna, D., Ogunniyi, A., Akomolafe, J. K., & Ejima, J. (2023). Assessing food security among young farmers in Africa: evidence from Kenya, Nigeria, and Uganda. *Agricultural and Food Economics*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00246-x>
- Adhikary, N., Erens, H., Weemaels, L., Deweer, E., Mees, F., Mujinya, B. B., Baert, G., Boeckx, P., & Van Ranst, E. (2016). Effects of Spreading Out Termite Mound Material on Ferralsol Fertility, Katanga, D.R. Congo. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(9), 1089–1100. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1166237>
- Agbenin, J. O. (2003). Extractable Iron and Aluminum Effects on Phosphate Sorption in a Savanna Alfisol. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2), 589–595. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.5890>
- Aide, M., Pavich, Z., Lilly, M. E., Thornton, R., & Kingery, W. (2004). Plinthite formation in the coastal plain region of Mississippi. *Soil Science*, 169(9), 613–623. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000142636.77482.e0>
- Ajvazi, B., & Czimmer, K. (2019). A comparative analysis of different dem interpolation methods in gis: Case study of rahovec, kosovo. *Geodesy and Cartography (Vilnius)*, 45(1), 43–48. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7921>
- Akhatov, A., Nurmatova, V., & Usmonova, B. (2024). The Influence of Slope Exposure, Profile Depth and Erosion Processes on Changes in the Content of Potassium, Phosphorus and Humus in Brown Soils of Mountain Pastures of

- Uzbekistan. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 34(2), 224–234. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1393784>
- Akilimali, P. Z., Kazenza, B. M., Kabasubabo, F. K., Egbende, L. M., Kayembe, D. M., Tran, N. T., & Mashinda, D. K. (2024). Household Food Insecurity During the COVID-19 Pandemic Between Slum and Non-Slum Areas in Kinshasa, DR Congo: A Cross-Sectional Study. *Foods*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/foods13223657>
- Akinwande, M. O., Dikko, H. G., & Samson, A. (2015). Variance Inflation Factor: As a Condition for the Inclusion of Suppressor Variable(s) in Regression Analysis. *Open Journal of Statistics*, 05(07), 754–767. <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.57075>
- Al Majjou, H., Kaba, R., Almesber, W., & Bruand, A. (2016). Validité de l'estimation des propriétés de rétention en eau de sols syriens à partir de fonctions et classes de pédotransfert développées pour des sols français. *Etude et Gestions Des Sols, Association Française Pour l'étude Des Sols*, 23, 112–123.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World Agriculture Towards 2030/2015: The 2012 Revision. *ESA Working Paper*, (12), No. 12-03. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00047-4)
- Alexandre, J. (2002). Les Cuirasses lateritiques et autres formations ferrugineuses tropicales exemple du Haut Katanga Méridional. *Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren, Ann. Sc. Géol*, 129.
- Al-Irhayim, M. N., Dahham, G. A., Al-Mistawi, K. E., & Sedeeq, A. M. (2025). Determination of the Force Analysis of Subsoiler Plow Tines Using Finite Element Method. *Current Applied Science and Technology*, 25(6). <https://doi.org/10.55003/cast.2025.260201>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Dirks, R., & Martin, S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* - (F.-F. and A. O. of the U. Nations, Ed.).
- Alonso, M., López, G., & Grajales, M. (2023). Mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el cultivo de soya mediante el subsuelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 78–89.
- Alton, P. B. (2016). The sensitivity of models of gross primary productivity to meteorological and leaf area forcing: A comparison between a Penman-Monteith ecophysiological approach and the MODIS Light-Use Efficiency algorithm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.010>
- Amin, N. U., Islam, F., Umar, M., Muhammad, W., Rahman, S. U., Gaafar, A. R. Z., Shah, T. A., Dauelbait, M., & Bourhia, M. (2025). Evaluation of crop phenology using remote sensing and decision support system for agrotechnology transfer. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95109-4>

- Angélique, N. C., Stany, V., Lebailly, P., & Azadi, H. (2022). Agricultural Development in the Fight against Poverty: The Case of South Kivu, DR Congo. *Land, 11*(4). <https://doi.org/10.3390/land11040472>
- Anguessin, B., Mapongmetsem, P. M., Ibrahima, A., & Fawa, G. (2021). Effet de la fertilisation organique à base de litière foliaire de *Jatropha curcas* L. et *Jatropha gossypifolia* L. sur la culture de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) à Guider (Nord/Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences, 15*(2), 524–535. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i2.12>
- Anikwe, M. A. N., Eze, J. C., & Ibudialo, A. N. (2016). Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research, 158*, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Apori, S. O., Murongo, M., Hanyabui, E., Atiah, K., & Byalebeka, J. (2020). Potential of termite mounds and its surrounding soils as soil amendments in smallholder farms in central Uganda. *BMC Research Notes, 13*(1). <https://doi.org/10.1186/s13104-020-05236-6>
- Arlot, S., & Celisse, A. (2010). A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys, 4*, 40–79. <https://doi.org/10.1214/09-SS054>
- Asenso, E., Hu, L., Li, J., & Kai, T. (2022). Subsoiling improves soil physical properties and increases productivity in a maize farmland in Southern China. *AgricEngInt, 2*(3), 23–34. <http://www.cigrjournal.org>
- Asiamah, R. D. (1999). *Plinthization - A treat to agricultural production* [Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Ghana.]. https://library.wur.nl/WebQuery/file/isric/fulltext/isricu_i22995_001.pdf
- Asiamah, R. D., & Dedzoe, C. D. (1999). Plinthization- A treat to agricultural production. *Ghana Journal of Agricultural Science, 32*, 223–227.
- Asiamah, R. D., & Dwomo, O. (2010). Ethno-management of plinthic and ironpan soils in the savanna regions of West Africa. *Ghana Journal of Agricultural Science, 42*(1–2), 25–29. <https://doi.org/10.4314/gjas.v42i1-2.60641>
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & Hicke, J. A. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography, 12*(3), 191–205. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x>
- Assani, A. A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphériques (oscillation austral) et océaniques (El Niño/La Niña). *Sécheresse, 10*(4), 245–252. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Badibanga, T., & Ulimwengu, J. (2020). Optimal investment for agricultural growth and poverty reduction in the democratic republic of congo a two-sector

- economic growth model. *Applied Economics*, 52(2), 135–155. <https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1630709>
- Bakker, M. (2018). *Effet des amendements calciques sur les racines fines de chêne (Quercus petraea et robur) : conséquences des changements dans la rhizosphère* [Université Henri Poincaré - Nancy 1,]. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747468>
- Balboa, G. R., Archontoulis, S. V., Salvagiotti, F., Garcia, F. O., Stewart, W. M., Francisco, E., Prasad, P. V. V., & Ciampitti, I. A. (2019a). A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agricultural Systems*, 174(March), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.008>
- Banza, M. J., Mwamba, K. F., Esoma, E. B., Meta, T. M., Mayamba, M. G., & Kasongo, L. M. E. (2019). Evaluation de la réponse du maïs (*Zea mays* L.) installé entre les haies de *Tithonia diversifolia* à Lubumbashi, R.D. Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 134(1), 13643. <https://doi.org/10.4314/jab.v134i1.3>
- Baquy, M. A. Al, Li, J. Y., Jiang, J., Mehmood, K., Shi, R. Y., & Xu, R. K. (2018). Critical pH and exchangeable Al of four acidic soils derived from different parent materials for maize crops. *Journal of Soils and Sediments*, 18(4), 1490–1499. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1887-x>
- Barrow, N. J., Debnath, A., & Sen, A. (2018). Mechanisms by which citric acid increases phosphate availability. *Plant and Soil*, 423(1–2), 193–204. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3490-8>
- Batjes, N. H. (2016). Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>
- Baumgartner, S., Bauters, M., Barthel, M., Drake, T. W., Ntaboba, L. C., Bazirake, B. M., Six, J., Boeckx, P., & Van Oost, K. (2021). Stable isotope signatures of soil nitrogen on an environmental-geomorphic gradient within the Congo Basin. *Soil*, 7(1), 83–94. <https://doi.org/10.5194/soil-7-83-2021>
- Beauvais, A. (2009). Ferricrete biochemical degradation on the rainforest-savannas boundary of Central African Republic. *Geoderma*, 150(3–4), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.023>
- Bedrick, E. J., & Tsai, C.-L. (1994). Model Selection for Multivariate Regression in Small Samples. *Biometrics*, 50(1), 226–231. <https://www.jstor.org/stable/2533213>
- Bell, L. E., Moir, J. L., & Black, A. D. (2024). The Effects of Soil Acidity and Aluminium on the Root Systems and Shoot Growth of *Lotus pedunculatus* and *Lupinus polyphyllus*. *Plants*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/plants13162268>
- Berggren, D., & Mulder, J. (1995). The role of organic matter in controlling aluminum solubility in acidic mineral soil horizons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20), 4167–4180.

- Beyene, S. D. (2023). The impact of food insecurity on health outcomes: empirical evidence from sub-Saharan African countries. *BMC Public Health*, 23(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15244-3>
- Bilong, P. (1992). *Caractères des sols ferrallitiques à plinthite et à pétroplinthite développés sur roches acides dans la zone forestière du sud du Cameroun Comparaison avec les sols développés sur roches basiques*. XXVII(2), 203–224.
- Blinn, C. E., House, M. N., Wynne, R. H., Thomas, V. A., Fox, T. R., & Sumnall, M. (2019). Landsat 8 based leaf area index estimation in loblolly pine plantations. *Forests*, 10(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10030222>
- Blume, L. J., Perkins, H. F., & Hubbard, R. K. (1987). Subsurface Water Movement in an Upland Coastal Plain Soil as Influenced by Plinthite. *Soil Science Society of America Journal*, 51(3), 774–779. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030036x>
- Boansi, D., Owusu, V., & Donkor, E. (2024). Impact of integrated soil fertility management on maize yield, yield gap and income in northern Ghana. *Sustainable Futures*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100185>
- Bogaert, J., Colinet, G., & Grégory, M. (2019). *Anthropisation des paysages katangais* (Number May). Presss Universitaire de Liège. <http://hdl.handle.net/2268/223011>
- Bogunovic, I., Pereira, P. A. D. S., Galic, M., Percin, A., Maticic, M., Kistic, I., Filipovic, V., Filipovic, L., Tang, X., & Trevisani, S. (2025). Soil management strategies for mitigating degradation and enhancing sustainability in sloped Stagnosols under maize cultivation – first results. *International Agrophysics*, 39(4), 365–383. <https://doi.org/10.31545/intagr/205467>
- Boote, K. J., Jones, J. W., & Pickering, N. B. (1996). Potential Uses and Limitations of Crop Models [Article]. *Agronomy Journal*, 88(5), 704–716. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800050005x>
- Bosilovich, M. G., Lucchesi, R., & Suarez, M. (2016). *Global Modeling and Assimilation Office MERRA-2: File Specification: 1.1* (N. G. GMAO, Ed.; GMAO Office Note). <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Bosilovich785.pdf>
- Boubacar, A., Malam Abdou, M., INGATAN WARZAGAN, A., Mamadou, I., Maiga, O. F., & Moussa, I. B. (2017). Efficacité du sous-solage dans la restauration des sols sahéliens dégradés : étude expérimentale sur le site de Tondi Kiboro, Niger. *Afrique Science*, 13(6), 189–201.
- Bouchot, V., Kaboré, E. B., Itard, Y., Courtois, N., Somé, S., Sy, A. T., & Récoché, G. (2011). Burkina Faso, géoressource et société : un projet scientifique Sud-Nord au service d'une gestion raisonnée des géoressources en Afrique intertropicale. *Vertigo*, 0–19. <https://doi.org/10.4000/vertigo.10435>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (USA. 14th Ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey, Ed.; Fourteenth).

- Brauman, A. (2000). *Effect of gut transit and mound deposit on soil organic matter transformations in the soil feeding termite : A review*. 36, 117–125.
- Bro, R., Kjeldahl, K., Smilde, A. K., & Kiers, H. A. L. (2008). Cross-validation of component models: A critical look at current methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 390(5), 1241–1251. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1790-1>
- Brogowski, Z., & Kwasowski, W. (2012). Distribution of organic matter in the particle size fractions of lateritic soil (plinthosol). *Soil Science Annual*, 63(4), 9–15. <https://doi.org/10.2478/v10230-012-0036-x>
- Brookd, R. R., Malaisse, F., & Empain, E. (1985). *The heavy metal-tolerant flora of Southcentral Africa*. Belkama. <https://wichitasu.searchmobi.org/instances/0c04e251-e5ea-5205-9219-33bc9d2b519d?option=subject&pageNumber=1&query=Environment%20Design&recordsPerPage=25>
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods and Research*, 33(2), 261–304. <https://doi.org/10.1177/0049124104268644>
- Caban, J., Nieoczym, A., & Krzywonos, L. (2024). Strength Analysis of Subsoiler Tooth. *Engineering for Rural Development*, 23, 286–293. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF057>
- Cai, H., Ma, W., Zhang, X., Ping, J., Yan, X., Liu, J., Yuan, J., Wang, L., & Ren, J. (2014). Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *Crop Journal*, 2(5), 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.04.006>
- Camacho, M. E., Mata, R., Barrantes-Viquez, M., & Alvarado, A. (2021). Morphology and characteristics of eight Oxisols in contrasting landscapes of Costa Rica. *Catena*, 197(November 2019), 104992. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104992>
- Carvalho, I. G., Mestrinho, S. S. P., Fontes, V. M. S., Goel, O. P., & de A. Souza, F. (1991). Geochemical evolution of laterites from two areas of the semi-arid region in Bahia State, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 40(1–3). [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(91\)90049-Z](https://doi.org/10.1016/0375-6742(91)90049-Z)
- Chang, C. M., Ni, C. F., Lin, C. P., Lee, I. H., & Lo, W. C. (2025). Quantification of the variability of the soil moisture field in response to variations in the rainfall field. *Journal of Hydrology*, 662. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133881>
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: A review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), 401–434. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0418-7>
- Chardon, D., Grimaud, J. L., Beauvais, A., & Bamba, O. (2018). West African lateritic pediments: Landform-regolith evolution processes and mineral

- exploration pitfalls. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 179, pp. 124–146). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.009>
- Chatterjee, S., Baath, G. S., Sapkota, B. R., Flynn, K. C., & Smith, D. R. (2025). Enhancing LAI estimation using multispectral imagery and machine learning: A comparison between reflectance-based and vegetation indices-based approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230(May 2024), 109790. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109790>
- Chauhan, Y. S., Solomon, K. F., & Rodriguez, D. (2013). Characterization of north-eastern Australian environments using APSIM for increasing rainfed maize production. *Field Crops Research*, 144, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.018>
- Chauhdary, J. N., Li, H., Akbar, N., Javaid, M., Rizwan, M., & Akhlaq, M. (2024). Evaluating corn production under different plant spacings through integrated modeling approach and simulating its future response under climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 293(December 2023), 108691. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108691>
- Chausse, J.-P., Kembola, T., & Ngonde, R. (2012). *L'Agriculture : Pierre Angulaire de l'Economie de la RDC: II* (J. Herderschee, D. M. Samba, & M. T. Tshibangu, Eds.; pp. 1–97). Etudes sectorielles, Médiaspaul.
- Chen, C., Lawes, R., Fletcher, A., Oliver, Y., Robertson, M., Bell, M., & Wang, E. (2016). How well can APSIM simulate nitrogen uptake and nitrogen fixation of legume crops? *Field Crops Research*, 187, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.007>
- Chen, C., Singh, A. K., Yang, B., Wang, H., & Liu, W. (2023). Effect of termite mounds on soil microbial communities and microbial processes: Implications for soil carbon and nitrogen cycling. *Geoderma*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116368>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 117, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.001>
- Childs, C. (2004). Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser*, 32–35. www.esri.com
- Chimonyo, V. G. P., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2016). Simulating yield and water use of a sorghum–cowpea intercrop using APSIM. *Agricultural Water Management*, 177, 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.021>
- Chisanga, K., Mbega, E. R., & Ndakidemi, P. A. (2020). Prospects of using termite mound soil organic amendment for enhancing soil nutrition in Southern Africa. *Plants*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/plants9050649>
- Chizen, C. J., Helgason, B. L., Weiseth, B., Dhillon, G. S., Baulch, H. M., Schoenau, J. J., & Bedard-Haughn, A. K. (2024). Soil carbon dynamics in drained prairie

- pothole wetlands. *Frontiers in Environmental Science*, 12(March), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1353802>
- Ciza, A. N., Mubasi, C. C., Barhumana, R. A., Balyahamwabo, D. K., Mastaki, J. L. N., & Lebailly, P. (2021). Impact of non-agricultural activities on food security in mountainous South Kivu. *Tropicicultura*, 39(2), 1–20. <https://doi.org/10.25518/2295-8010.1761>
- Coelho, M. R., & Vidal-Torrado, P. (2000). Cério (Ce) em ferricretes nodulares desenvolvidos em solos da formação adamantina. *Scientia Agricola*, 57(2), 329–336. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000200021>
- Cohrs, C. W., Cook, R. L., Gray, J. M., & Albaugh, T. J. (2020). Sentinel-2 leaf area index estimation for pine plantations in the southeastern United States. *Remote Sensing*, 12(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/RS12091406>
- Cooper, M. W., Brown, M. E., Niles, M. T., & ElQadi, M. M. (2020). Text mining the food security literature reveals substantial spatial bias and thematic broadening over time. *Global Food Security*, 26(April), 100392. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100392>
- Correndo, A. A., Hefley, T. J., Holzworth, D. P., & Ciampitti, I. A. (2021). Revisiting linear regression to test agreement in continuous predicted-observed datasets. *Agricultural Systems*, 192(June), 103194. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103194>
- Costantini, E. A. C., & Priori, S. (2007). Pedogenesis of plinthite during early Pliocene in the Mediterranean environment. Case study of a buried paleosol at Podere Renieri, central Italy. *Catena*, 71(3), 425–443. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.03.015>
- Cote, D., & Dupuis, G. (1980). Effets du sous-solage et du labour profond sur les propriétés physiques du sol et le rendement de la luzerne et du maïs sur loam sableux Chaloupe. *Can. J. Soil Sci*, 353, 345–353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/etc.5620160108>
- Cressie, N. (1990). The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22(3).
- da Silva, A. P. V., Silva, A. O., de Lima, F. R. D., Benedet, L., Carriço, C. O., Franco, A. de J., Guilherme, L. R. G., & Carneiro, M. A. C. (2024). Reduction of pH on the Bioavailability of Potentially Toxic Elements for Plants Grown in Iron Mining Tailing. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(6), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07205-2>
- Dalmago, G. A., Bergamaschi, H., Bergonci, J. I., Krüger, C. A. M. B., Comiran, F., & Heckler, B. M. M. (2009). Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(suppl), 855–864. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662009000700007>
- D’Amore, D. V., Stewart, S. R., & Huddleston, J. H. (2004). Saturation, Reduction, and the Formation of Iron-Manganese Concretions in the Jackson-Frazier

- Wetland, Oregon. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 1012–1022. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1012>
- Daniels, R. B., Perkins, H. F., Hajek, B. F., & Gamble, E. E. (1978). Morphology of Discontinuous Phase Plinthite and Criteria for its Field Identification in the Southeastern United States. *Soil Science Society of America Journal*, 42(15), 944–949.
- Davies, B. E. (1997). Deficiencies and toxicities of trace elements and micronutrients in tropical soils: Limitations of knowledge and future research needs. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16(1), 75–83. [https://doi.org/10.1897/1551-5028\(1997\)016<0075:DATOTE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1897/1551-5028(1997)016<0075:DATOTE>2.3.CO;2)
- De Azevedo, J. R., & Bueno, C. R. P. (2017). Potencialidades E Limitações Agrícolas De Solos Em Assentamento De Reforma Agrária No Município De Chapadinha-Ma. *Scientia Agraria*, 17(3), 1. <https://doi.org/10.5380/rsa.v17i3.46841>
- de Campos, M., Antonangelo, J. A., van der Zee, S. E. A. T. M., & Alleoni, L. R. F. (2018). Degree of phosphate saturation in highly weathered tropical soils. *Agricultural Water Management*, 206(April), 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.001>
- De Dapper, M., & Malaisse, F. (1979). Relations entre les différents stades d'érosion d'une cuirasse lateritique et la végétation sur le plateau de la Manika (Shaba, Zaïre). *Geo-Eco-Trop*, 3, 99–117. http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_032_03.pdf
- de Lima, S. S., Pereira, M. G., Pereira, R. N., DE Pontes, R. M., & Rossi, C. Q. (2018). Termite mounds effects on soil properties in the atlantic forest biome. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 42, 1–14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160564>
- de Melo, W. J., de Melo, G. M. P., de Melo, V. P., Araujo, A. S. F., Ferraudo, A. S., & Bertipaglia, L. M. A. (2020). Soil microbial biomass and enzyme activity in six Brazilian oxisols under cropland and native vegetation. *Bragantia*, 79(4), 498–504. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200242>
- de Moraes, J. M., Schuler, A. E., Dunne, T., Figueiredo, R. de O., & Victoria, R. L. (2006). Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in Eastern Amazonia. In *Hydrological Processes* (Vol. 20, Number 12, pp. 2509–2526). <https://doi.org/10.1002/hyp.6213>
- de Oliveira, J. S., Inda, A. V., Barrón, V., Torrent, J., Tiecher, T., & de Oliveira Camargo, F. A. (2020). Soil properties governing phosphorus adsorption in soils of Southern Brazil. *Geoderma Regional*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00318>
- Delfim, J., Moreira, A., Moraes, L. A. C., Silva, J. F., Moreira, P. A. M., & Lima Filho, O. F. (2024). Soil Phosphorus Availability Impacts Chickpea Production and Nutritional Status in Tropical Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 3115–3130. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01738-5>

- Deng, F., Chen, J. M., Plummer, S., Chen, M., & Pisek, J. (2006). Algorithm for Global Leaf Area Index Retrieval Using Satellite Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2219–2229.
- Dilla, A., Smethurst, P. J., Barry, K., Parsons, D., & Denboba, M. (2018). Potential of the APSIM model to simulate impacts of shading on maize productivity. *Agroforestry Systems*, 92(6), 1699–1709. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0119-0>
- Doncheva, S., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M., & Barceló, J. (2009). Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2–3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.11.006>
- Doocy, S., Cohen, S., Emerson, J., Menakuntuala, J., Rocha, J. S., Klemm, R., Stron, J., Brye, L., Funna, S., Nzanzu, J. P., Musa, E., Caulfield, L., & Colantouni, E. (2017). Food security and nutrition outcomes of farmer field schools in eastern democratic republic of the Congo. *Global Health Science and Practice*, 5(4), 630–643. <https://doi.org/10.9745/GHSP-D-17-00203>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. In *Applied Soil Ecology* (Vol. 15).
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Dos Anjos, J. C. R., De Andrade, A. S., Bastos, E. A., & Da Silva, E. M. (2019). Changes in temperature of a Plinthosol cultivated with sugarcane under straw levels. *Comunicata Scientiae*, 10(1), 213–217. <https://doi.org/10.14295/cs.v10i1.2514>
- Dos Anjos, L. H. C., Franzmeier, D. P., & Schulze, D. G. (1995). Formation of soils with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. *Geoderma*, 64(3–4), 257–279. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00022-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00022-3)
- Dos Anjos, L. H. C., Pereira, M. G., Pérez, D. V., & Ramos, D. P. (2007). Characterization and classification of Plintosols from Pinheiro, Maranhão State, Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 31(5), 1035–1044. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000500020>
- Dos Santos, C. C., Souza de Lima Ferraz Junior, A., Oliveira Sá, S., Andrés Muñoz Gutiérrez, J., Braun, H., Sarrazin, M., Brossard, M., & Desjardins, T. (2018). Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil. *Carbon Management*, 9(6), 655–664. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1530026>

- Du Preez, C. C., Steyn, J. T., & Kotze, E. (2001). Long-term effects of wheat residue management on some fertility indicators of a semi-arid plinthosol. *Soil and Tillage Research*, 63(1–2), 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00227-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00227-6)
- Duponnois, R., Assikbetse, K., Ramanankierana, H., Kisa, M., Thioulouse, J., & Lepage, M. (2006). Litter-forager termite mounds enhance the ectomycorrhizal symbiosis between *Acacia holosericea* A. Cunn. Ex G. Don and *Scleroderma dictyosporum* isolates. *FEMS Microbiology Ecology*, 56(2), 292–303. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00089.x>
- Duponnois, R., Paugy, M., Thioulouse, J., Masse, D., & Lepage, M. (2005). Functional diversity of soil microbial community, rock phosphate dissolution and growth of *Acacia seyal* as influenced by grass-, litter- and soil-feeding termite nest structure amendments. *Geoderma*, 124(3–4), 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.012>
- Dutta, S., Pal, R., Chakraborty, A., & Chakrabarti, K. (2003). Influence of integrated plant nutrient supply system on soil quality restoration in a red and laterite soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 49(6), 631–637. <https://doi.org/10.1080/03650340310001599722>
- Ebrahimi-Mollabashi, E., Huth, N. I., Holzwoth, D. P., Ordóñez, R. A., Hatfield, J. L., Huber, I., Castellano, M. J., & Archontoulis, S. V. (2019). Enhancing APSIM to simulate excessive moisture effects on root growth. *Field Crops Research*, 236(December 2018), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.014>
- Eghbal, M. K., Givi, J., Torabi, H., & Miransari, M. (2012). Formation of soils with fragipan and plinthite in old beach deposits in the South of the Caspian Sea, Gilan province, Iran. *Applied Clay Science*, 64, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.10.013>
- Ekundayo, E. O., & Aghatise, V. O. (1997). *Soil properties of termite mounds under different land use types in a typic paleudult of midwestern nigeria*. 1–7.
- Elsheikh, R., Mohamed Shariff, A. R. B., Amiri, F., Ahmad, N. B., Balasundram, S. K., & Soom, M. A. M. (2013). Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.003>
- Enagbonma, B. J., & Babalola, O. O. (2019). Potentials of termite mound soil bacteria in ecosystem engineering for sustainable agriculture. *Annals of Microbiology*, 69(3), 211–219. <https://doi.org/10.1007/s13213-019-1439-2>
- Erens, H., Boudin, M., Mees, F., Mujinya, B. B., Baert, G., Strydonck, M. Van, Boeckx, P., & Ranst, E. Van. (2015). The age of large termite mounds – radiocarbon dating of *Macrotermes falciger* mounds of the miombo woodland of Katanga, DR Congo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.017>

- Erens, H., Mujinya, B. B., Mees, F., Baert, G., Boeckx, P., Malaisse, F., & Van Ranst, E. (2015). The origin and implications of variations in soil-related properties within *Macrotermes falciger* mounds. *Geoderma*, 249–250, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.003>
- Estévez, J., Gavilan, P., & Berengena, J. (2009). Sensitivity analysis of a Penman–Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 23, 3342–3353. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Eswaran, H., De Coninck, F., & Varghese, T. (1990). *Role of Plinthite and Related Forms in Soil Degradation*. 109–127. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3322-0_3
- Eze, P. N., Kokwe, A., & Eze, J. U. (2019). Advances in Nanoscale Study of Organomineral Complexes of Termite Mounds and Associated Soils: A Systematic Review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/8087273>
- Eze, P. N., Udeigwe, T. K., & Meadows, M. E. (2014). Plinthite and Its Associated Evolutionary Forms in Soils and Landscapes: A Review. *Pedosphere*, 24(2), 153–166. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60002-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60002-3)
- Eze, P. N., Udeigwe, T. K., & Stietiya, M. H. (2010). Distribution and potential source evaluation of heavy metals in prominent soils of Accra Plains, Ghana. *Geoderma*, 156(3–4), 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.032>
- Ezeaku, P. I., & Anikwe, M. A. N. (2006). A model for description of water and solute movement in soil-water restrictive horizons across two landscapes in south eastern Nigeria. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, 171(6), 492–500. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000227556.74225.d4>
- Fageria, N. K. (2001). Adequate and toxic levels of copper and manganese in upland rice, common bean, corn, soybean, and wheat grown on an oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(9–10), 1659–1676. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104220>
- Fang, C., Wu, J., & Liang, W. (2024). Systematic Investigation of Aluminum Stress-Related Genes and Their Critical Roles in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijms25169045>
- FAO. (2001). *Lecture notes on the major soil of the world* (Vol. 2006, Number 28/02/06). http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/003/Y1899E/y1899e06.htm
- FAO. (2021). *L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb5409fr>

- FAO, Union européenne, & Cirad. (2022). *Profil des systèmes alimentaires - République Démocratique du Congo. Activer la transformation durable et inclusive de nos systèmes alimentaires*. https://agritrop.cirad.fr/612187/1/CP_Congo-V16-pages.pdf
- Fatondji, D., & Ibrahim, A. (2018). Improving nutrient use efficiency from decomposing manure and millet yield under Plinthosols in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(3), 485–499. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9910-1>
- Fauzi, A. I., & Stoops, G. (2004). Reconstruction of a toposequence on volcanic material in the Honje Mountains, Ujung Kulon Peninsula, West Java. *Catena*, 56(1–3), 45–66. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.004>
- Feiza, V., Feizienė, D., Sinkevičienė, A., Bogužas, V., Putramentaitė, A., Lazauskas, S., Deveikytė, I., Seibutis, V., Steponavičienė, V., & Pranaitienė, S. (2015). Soil water capacity, pore-size distribution and CO₂ e-flux in different soils after long-term no-till management. *Zemdirbyste-Agriculture*, 102(1), 3–14. <https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.001>
- Feng, X., Hao, Y., Latifmanesh, H., Lal, R., Cao, T., Guo, J., Deng, A., Song, Z., & Zhang, W. (2018). Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of northeastern China. *Agronomy Journal*, 110(4), 1607–1615. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0027>
- Ferreras, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I., & Rotondo, R. (2006). Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology*, 97(4), 635–640. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.018>
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>
- Foy, C. D., Chaney, R. L., & White M C. (1978). The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol*, 29, 511–566. www.annualreviews.org
- Fritsch, E., Herbillon, A. J., Do Nascimento, N. R., Grimaldi, M., & Melfi, A. J. (2007). From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: Iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. *European Journal of Soil Science*, 58(5), 989–1006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00877.x>
- Fu, Y., Horton, R., & Heitman, J. (2024). Estimating soil water retention curves over the entire saturation range: A thermal conductivity-based approach. *Journal of Hydrology*, 645. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132138>
- Garba, M., Cornelis, W. M., & Steppe, K. (2011). Effect of termite mound material on the physical properties of sandy soil and on the growth characteristics of

- tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in semi-arid Niger. *Plant and Soil*, 338(1), 451–466. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0558-0>
- Garcia, C. H. P., Lima, H. N., Silva, F. W. R., Neves Junior, A. F., Teixeira, W. G., Macedo, R. S., & Tavares, S. G. (2013). Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 37(4), 936–946. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400011>
- Garcia, J., Mondragon-Becerra, M., Martinez, I., Nocco, M., & Lazcano, C. (2024). Organic amendments alter urban soil microbiomes and improve crop quality. *Applied Soil Ecology*, 204(October), 105731. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105731>
- Gebre, G. G., & Rahut, D. B. (2021). Prevalence of household food insecurity in East Africa: Linking food access with climate vulnerability. *Climate Risk Management*, 33(May), 100333. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100333>
- Geraerts, M., Vangestel, C., Artois, T., Fernandes, J. M. de O., Jorissen, M. W. P., Chocha Manda, A., Danadu Mizani, C., Smeets, K., Snoeks, J., Sonet, G., Tingbao, Y., Van Steenberge, M., Vreven, E., Lunkayilakio Wamuini, S., Vanhove, M. P. M., & Huyse, T. (2022). Population genomics of introduced Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) in the Democratic Republic of the Congo: Repeated introductions since colonial times with multiple sources. *Molecular Ecology*, 31(12), 3304–3322. <https://doi.org/10.1111/mec.16479>
- Ghanbarian-Alavijeh, B., & Millán, H. (2009). The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma*, 151(3–4), 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.014>
- Gilkes, B., Lee, S., & Singh, B. (2003). The imprinting of aridity upon a lateritic landscape: An illustration from southwestern Australia. *Comptes Rendus - Geoscience*, 335(16), 1207–1218. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.003>
- Giller, K. E., Delaune, T., Vasco Silva, J., Descheemaeker, K., van de Ven, G., Schut, A. G., van Wijk, M., Hammond, J., Hochman, Z., Taulya, G., Chikowo, R., Narayanan, S., Kishore, A., Bresciani, F., Mancini Teixeira, H., Andersson, J. A., & van Ittersum, M. K. (2021). The future of farming: Who will produce our food? *Food Security*, 13, 1073–1099. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6/Published>
- Giorgis, I., Bonetto, S., Giustetto, R., Lawane, A., Pantet, A., Rossetti, P., Thomassin, J. H., & Vinai, R. (2014). The lateritic profile of Balkouin, Burkina Faso: Geochemistry, mineralogy and genesis. *Journal of African Earth Sciences*, 90, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.11.006>
- Gitelson, A. A., Vina, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30(5), 4–7. <https://doi.org/10.1029/2002gl016450>

- Glotter, M. J., Moyer, E. J., Ruane, A. C., & Elliott, J. W. (2016). Evaluating the Sensitivity of Agricultural Model Performance to Different Climate Inputs*. *American Meteorological Society*, 55, 579–594. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0120.1>
- Gong, L., Xu, C. yu, Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
- Goovaerts, P. (2008). Kriging and semivariogram deconvolution in the presence of irregular geographical units. *Mathematical Geosciences*, 40(1), 101–128. <https://doi.org/10.1007/s11004-007-9129-1>
- Gorroño, J., Fomferra, N., Peters, M., Gascon, F., Underwood, C. I., Fox, N. P., Kirches, G., & Brockmann, C. (2017). A radiometric uncertainty tool for the sentinel 2 mission. *Remote Sensing*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/rs9020178>
- Gotz, L. F., de Almeida, A. N. F., de Souza Nunes, R., Condron, L. M., & Pavinato, P. S. (2024). Assessment of phosphorus use and availability by contrasting crop plants in a tropical soil. *Biology and Fertility of Soils*, 60(5), 603–612. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01833-w>
- Grevers, M. C. J., & De Jong, E. (1993). Soil structure and crop yield over a S-year period following subsoiling Solonetzic and Chernozemic soils in Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci*, 91, 81–91.
- Gunarathna, M. H. J. P., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., Kumari, M. K. N., & Amarasekara, M. G. T. S. (2019). Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of tropical Sri Lankan soils. *Soil and Tillage Research*, 190(January), 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.009>
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 82, Number 2, pp. 121–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Han, X., Wu, H., Li, Q., Cai, W., & Hu, S. (2024). Assessment of heavy metal accumulation and potential risks in surface sediment of estuary area: A case study of Dagu river. *Marine Environmental Research*, 196(February), 106416. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106416>
- Harit, A., Moger, H., Louis, J., Selvaraj, D., Abbas, S., Sankaran, A., & Pascal, S. (2017). Termites can have greater influence on soil properties through the construction of soil sheetings than the production of above-ground mounds. *Insectes Sociaux*, 64(2), 247–253. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0541-3>
- Harmse, C. J., Gerber, H., & Van Niekerk, A. (2022). Article Evaluating Several Vegetation Indices Derived from Sentinel-2 Imagery for Quantifying Localized Overgrazing in a Semi-Arid Region of South Africa. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071720>

- Harrison, M. T., Roggero, P. P., & Zavattaro, L. (2019). Simple, efficient and robust techniques for automatic multi-objective function parameterisation: Case studies of local and global optimisation using APSIM. *Environmental Modelling and Software*, 117(January), 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.010>
- Harwell, M. (2018). A strategy for using bias and RMSE as outcomes in Monte Carlo Studies in statistics. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 17(2). <https://doi.org/10.22237/jmasm/1551907966>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers : an introduction to nutrient management* (8th). Pearson India.
- Hayward, M. W., Boitani, L., Burrows, N. D., Funston, P. J., Karanth, K. U., Mackenzie, D. I., Pollock, K. H., & Yarnell, R. W. (2015). Ecologists need robust survey designs, sampling and analytical methods. *Journal of Applied Ecology*, 52(2), 286–290. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12408>
- He, D., Li, G., Luo, Z., & Wang, E. (2025). Effects of long-term fertiliser application on cropland soil carbon dynamics mediated by potential shifts in microbial carbon use efficiency. *Soil and Tillage Research*, 248(December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106418>
- Hernandez-Soriano, M. C., & Jimenez-Lopez, J. C. (2012). Effects of soil water content and organic matter addition on the speciation and bioavailability of heavy metals. *Science of the Total Environment*, 423, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.033>
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics* (1st ed.). Elsevier Academic Press.
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review Philippe. *Plant and Soil* 237, 237(2), 173–195.
- Hintze, J. L., & Nelson, R. D. (1998). Violin plots: A box plot-density trace synergism. *American Statistician*, 52(2), 181–184. <https://doi.org/10.1080/00031305.1998.10480559>
- Holzworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., Verrall, S., Herrmann, N. I., Zheng, B., & Snow, V. (2018). APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling and Software*, 103, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental*

- Modelling and Software*, 62, 327–350.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Host, T. K., Russell, M. B., Windmuller-Campione, M. A., Slesak, R. A., & Knight, J. F. (2020). Ash presence and abundance derived from composite landsat and sentinel-2 time series and lidar surface models in Minnesota, USA. *Remote Sensing*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/RS12081341>
- Hou, S., Zheng, N., Tang, L., Ji, X., & Li, Y. (2019). Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7793-5>
- Houba, J., van Der Lee, J., Novozamsky, I., & Walinga, I. (1988). *Soil and Plant Analysis: A Series of Syllabi: Part 5. Soil Analysis Procedures* (6th ed.). Department of Soil Science and Plant Nutrition, Agricultural University Wageningen.
- Hounkpatin, K. O. L., Welp, G., Akponikpè, P. B. I., Rosendahl, I., & Amelung, W. (2018). Carbon losses from prolonged arable cropping of Plinthosols in Southwest Burkina Faso. *Soil and Tillage Research*, 175(August 2017), 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.014>
- Hung, C., Gao, Y., Qin, A., Liu, Z., Zhao, B., Ning, D., Ma, S., Duan, A., & Liu, Z. (2022). Effects of waterlogging at different stages and durations on maize growth and grain yields. *Agricultural Water Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107334>
- Huang, C., Liu, X., Gao, Y., Chen, H., Ma, S., Qin, A., Zhang, Y., Gao, Z., Song, Y., Sun, J., & Liu, Z. (2024a). Response of Triticum Vulgare Growth and Nitrogen Allocation to Irrigation Methods and Regimes under Subsoiling Tillage. *Agronomy*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy14040858>
- Huang, C., Huang, H., Huang, S., Li, W., Zhang, K., Chen, Y., Yang, L., Luo, L., & Deng, L. (2024b). Effects of Straw Returning on Soil Aggregates and Its Organic Carbon and Nitrogen Retention under Different Mechanized Tillage Modes in Typical Hilly Regions of Southwest China. *Agronomy*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy14050928>
- Huang, S., Islam, M. U., & Jiang, F. (2023). The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis. *Plant, Soil and Environment*, 69(3), 105–117. <https://doi.org/10.17221/373/2022-PSE>
- Ibrahim, A., & Fatondji, D. (2020). Optimizing manure management for enhancing millet yields and resources use efficiency under rehabilitated plinthosols in the Sahel. *Journal of Arid Environments*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104225>
- Ikazaki, K., Nagumo, F., Simporé, S., & Barro, A. (2018). Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-

- penetrating radar in the Sudan Savanna. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(5), 623–631. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604>
- Ilunga Ngoy, S., Thieblemont, D., Callec, Y., Kampata, D., Mupande, J. F., Auclerc, A., & Watteau, F. (2023). Macrotermes falciger termite mounds as indicators of lithochemical anomalies of metals of interest. *Journal of Geochemical Exploration*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107197>
- Ilunga, T. H., Banza, M. J., Lukusa, M. L., Mukunto, K. I., Malonga, H. L., Kanyenga, L. A., & Nyembo, K. L. (2019). Influence du moment d'application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs (*Zea mays* L.) installé sur un Ferralsol. *Journal of Applied Biosciences*, 127(1), 12794. <https://doi.org/10.4314/jab.v127i1.4>
- Ilunga, T. H., Muganguz, N. T., Kidinda, K. L., Banza, M. J., Nsenga, N. S., Mpoyo, M. G., Tshipama, T. D., Lukusa, M. L., & Nyembo, K. L. (2015). Evaluation of Maize Response (*Zea mays* L.) to Various Modes and Moments of Chicken Manure Spreading in Lubumbashi, DR Congo. *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology*, 5(3), 96–105. <https://doi.org/10.3923/ajpnft.2015.96.105>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Isabelle, V., Marielle, A., Basile, M. B., François, M. K., Geert, B., Eric, V. R., Marjolein, V., & Jan, B. (2014). Termite mound identification through aerial photographic interpretation in Lubumbashi, Democratic Republic of the Congo: Methodology evaluation. *Tropical Conservation Science*, 7(4), 733–746. <https://doi.org/10.1177/194008291400700411>
- Ishaq, M., Ibrahim, M., Hassan, A., Saeed, M., & Lal, R. (2001). Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil & Tillage Research*, 60, 153–161.
- Ishtiaq, M., Waqas Mazhar, M., Maqbool, M., Alataway, A., Dewidar, A. Z., Elansary, H. O., & Yessoufou, K. (2022). Application of Smart Agricultural Practices in Wheat Crop to Increase Yield and Mitigate Emission of Greenhouse Gases for Sustainable Ecofriendly Environment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su141610453>
- ISS Africa. (2024). *RD Congo : Special Report* (Number May). futures.issafrica.org. <https://futures.issafrica.org/special-reports/country/drc-french/>
- Jacobs, P. M., West, L. T., & Shaw, J. N. (2002). Redoximorphic Features as Indicators of Seasonal Saturation, Lowndes County, Georgia. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 315–323. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.3150>

- Jansen, B., Nierop, K. G. J., & Verstraten, J. M. (2005). Mechanisms controlling the mobility of dissolved organic matter, aluminium and iron in podzol B horizons. *European Journal of Soil Science*, 56(4), 537–550. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00686.x>
- Jarlan, L., Balsamo, G., Lafont, S., Beljaars, A., Calvet, J. C., & Mougin, E. (2008). Analysis of leaf area index in the ECMWF land surface model and impact on latent heat and carbon fluxes: Application to West Africa. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(24). <https://doi.org/10.1029/2007JD009370>
- Jee, H. K., & Park, J. H. (2025). Mitigating manganese phytoavailability in Cr(III)-contaminated soils using biochar and lime. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 37(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2543318>
- Jerszurki, D., de Souza, J. L. M., & Silva, L. de C. R. (2019). Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Climate Dynamics*, 53(1–2), 943–956. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>
- Ji, B., Zhao, Y., Mu, X., Liu, K., & Li, C. (2013). Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China. *Plant Soil Environ*, 59(7), 295–302.
- Jiang, J. (2005). Leaf area index retrieval based on canopy reflectance and vegetation index in eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 15(2), 247. <https://doi.org/10.1360/050213>
- Jiao, F., Hong, S., Zhang, Q., Li, M., Shi, R., Ma, Y., & Li, Q. (2023). Subsoiling before winter wheat cultivation increases photosynthetic characteristics and leaf water-use efficiency of summer maize in a double-cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(6), 847–860. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2037126>
- Jien, S.-H., Hseu, Z.-Y., & Chen, Z.-S. (2010). Hydropedological Implications of Ferromanganiferous Nodules in Rice-Growing Plinthitic Ultisols under Different Moisture Regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 880–891. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0020>
- Jin, H., Hongwen, L., Xiaoyan, W., McHugh, A. D., Wenying, L., Huanwen, G., & Kuhn, N. J. (2007). The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.10.005>
- Jin, Z., Prasad, R., Shriver, J., & Zhuang, Q. (2017). Crop model- and satellite imagery-based recommendation tool for variable rate N fertilizer application for the US Corn system. *Precision Agriculture*, 18(5), 779–800. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9488-z>
- Jobbágy, E. G., Tóth, T., Nosetto, M. D., & Earman, S. (2017). On the Fundamental Causes of High Environmental Alkalinity (pH ≥ 9): An Assessment of Its

- Drivers and Global Distribution. *Land Degradation and Development*, 28(7), 1973–1981. <https://doi.org/10.1002/ldr.2718>
- Johnston, K., Hoef, J. M. Ver, Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGis Geostatistical Analyst* (1st ed.). ESRI Press. https://content.esri.com/support/documentation/ao_/using_arcgis_geostatistical_analyst.pdf
- Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., T., Hiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., & R., Z. (2013). *Soil Atlas of Africa*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-01/010059901.pdf
- Jouquet, P., Guilleux, N., Caner, L., Chintakunta, S., Ameline, M., & Shanbhag, R. R. (2016). Influence of soil pedological properties on termite mound stability. *Geoderma*, 262, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.020>
- Jouquet, P., Guilleux, N., & Ramesh, R. (2015). Influence of soil type on the properties of termite mound nests in Southern India. *Applied Soil Ecology*, 96, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.010>
- Jouquet, P., Jamoteau, F., Majumdar, S., Podwojewski, P., Nagabovanalli, P., Caner, L., Barboni, D., & Meunier, J. (2020). The distribution of Silicon in soil is influenced by termite bioturbation in South Indian forest soils. *Geoderma*, 372(April), 114362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114362>
- Jouquet, P., Mamou, L., Lepage, M., & Velde, B. (2002). Effect of termites on clay minerals in tropical soils: Fungus-growing termites as weathering agents. *European Journal of Soil Science*, 53(4), 521–528. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00492.x>
- Jouquet, P., Tessier, D., & Lepage, M. (2004). The soil structural stability of termite nests: Role of clays in *Macrotermes bellicosus* (Isoptera, Macrotermitinae) mound soils. *European Journal of Soil Biology*, 40(1), 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2004.01.006>
- Karami, A., Homae, M., Afzalnia, S., Ruhipour, H., & Basirat, S. (2012). Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.021>
- Karlsson, T., Persson, P., & Skyllberg, U. (2006). Complexation of copper(II) in organic soils and in dissolved organic matter - EXAFS evidence for chelate ring structures. *Environmental Science and Technology*, 40(8), 2623–2628. <https://doi.org/10.1021/es052211f>

- Kaschuk, G., Santos, J. C. P., Almeida, J. A., Sinhorati, D. C., & Berton, J. F. (2006). Termite activity in relation to natural grassland soil attributes. *Scientia Agricola*, 63(6), 583–588. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000600013>
- Kasongo, L. M. E. (2008). *Evaluation des terres à multiples échelles pour la détermination de l'impact de la gestion agricole sur la sécurité alimentaire au Katanga, R.D. Congo* [Ph.D. Thesis, Université de Gent]. <https://doi.org/https://biblio.ugent.be/publication/607168/file/18831>
- Kasongo, L. M. E., Banza, M. J., Meta, T. M., Mukoke, T. H., Kanyenga, F., Mayamba, M. G., Mwamba, K. F., & Mazinga, K. M. (2019). Sensibilité de la culture pluviale du maïs (*Zea mays* L.) aux effets des épisodes secs sur un Ferralsol sous amendement humifère à Lubumbashi. *Journal of Applied Biosciences*, 140, 14316–14326.
- Kasongo, L. M. E., Mwamba Mulembo, T., Tshipoya Masumbuko, P., Mukalay Muamba, J., Useni Sikuzani, Y., Mazinga Kwey, M., & Nyembo Kimuni, L. (2013). Réponse de la culture de soja (*Glycine max* L. (Merrill)) à l'apport des biomasses vertes de *Tithonia diversifolia* (Hemsley) A. Gray comme fumure organique sur un. *Journal of Applied Biosciences*, 63, 4727–4735.
- Kasu-Bandi, B. T., Kidinda, L. K., Kasendue, G. N., Mukalay, J. B., Tshibingu, M. I., Lukangila, M. A. Bin, Longanza, L. B., Emery, K. L., & Lubobo, A. K. (2019). Effects of *Bradyrhizobium japonicum* on Some Chemical Properties of Ferralsols under Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Cultivation. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 14(1), 95–102. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2019.95.102>
- Katemo Manda, B., Colinet, G., André, L., Chocha Manda, A., Marquet, J.-P., & Micha, J.-C. (2010). Evaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/RD Congo). In *TROPICULTURA* (Vol. 28).
- Kazadi, H. N., Kusadokoro, M., & Chitose, A. (2024). Participation in artisanal diamond mining and food security: A case study of Kasai Oriental in DR Congo. *Open Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0360>
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Khatibi, A., & Krauter, S. (2021). Validation and performance of satellite meteorological dataset merra-2 for solar and wind applications. *Energies*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/en14040882>
- Khoshru, B., Mitra, D., Nosratabad, A. F., Reyhanitabar, A., Mandal, L., Farda, B., Djebaili, R., Pellegrini, M., Guerra-Sierra, B. E., Senapati, A., Panneerselvam,

- P., & Mohapatra, P. K. Das. (2023). Enhancing Manganese Availability for Plants through Microbial Potential: A Sustainable Approach for Improving Soil Health and Food Security. *Bacteria*, 2(3), 129–141. <https://doi.org/10.3390/bacteria2030010>
- Kimuni Luciens, N., Sikuzani Yannick, U., Mubemba Michel, M., Mugisho David, B., Lenge Emery, K., & Longanza Louis, B. (2012). Effets des apports des doses variées de fertilisants inorganiques (NPKS et Urée) sur le rendement et la rentabilité économique de nouvelles variétés de *Zea mays* L. à Lubumbashi, Sud-Est de la RD Congo. *J. Appl. Biosci.*, (59), 4286–4296. www.m.elewa.org
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 687–734). American Society of Agronomy. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
- Koppe, E., Rupollo, C. Z., de Queiroz, R., Uteau Puschmann, D., Peth, S., & Reinert, D. (2021). Physical recovery of an oxisol subjected to four intensities of dairy cattle grazing. *Soil and Tillage Research*, 206(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104813>
- Kotlar, A. M., de Jong van Lier, Q., & de Souza Brito, E. (2020). Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. *Geoderma*, 361(November 2019), 114098. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114098>
- Koulibaly, B., Traore, O., Dakuo, D., Lalsaga, R., Lompo, F., & Zombre, P. (2015). Acidification des sols ferrugineux et ferrallitiques dans les systèmes de production cotonnière au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(6), 2879. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.44>
- Kpangba, T. P. M. K., Mpika, J., Makoundou, A., Bitu, M. A., & Attibayéba. (2020). Effect of the termite mounds on the vegetative production of three cultivars of black nightshade (*Solanum nigrum* L.: Solanaceae) grown in Brazzaville, Congo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(1), 192–203. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i1.16>
- Kumar, B., Sarkar, N. C., Maity, S., & Maiti, R. (2019). Effect of different levels of sulphur and boron on the growth and yield of sesame under red-laterite soils. *Research on Crops*, 20(3), 515–524. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.074>
- Kumar, K. A., Swain, D. K., & Bhadoria, P. B. S. (2018). Split application of organic nutrient improved productivity, nutritional quality and economics of rice-chickpea cropping system in lateritic soil. *Field Crops Research*, 223(December 2017), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.04.007>
- Kwanchai, A. G., & Arturo, A. G. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2th ed.). Wilet & Sons.

- Lahori, A. H., Tunio, M., Ahmed, S. R., Mierzwa-Hersztek, M., Vambol, V., Afzal, A., Kausar, A., Vambol, S., Umar, A., & Muhammad, A. (2024). Role of pressmud compost for reducing toxic metals availability and improving plant growth in polluted soil: Challenges and recommendations. *Science of the Total Environment*, 951(May), 175493. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175493>
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304, 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. In *Food and Energy Security* (Vol. 5, Number 4, pp. 212–222). Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://about.jstor.org/terms>
- Laurent, F., Pocard-Chapuis, R., Plassin, S., & Martinez, G. P. (2017). Soil texture derived from topography in North-eastern Amazonia. *Journal of Maps*, 13(2), 109–115. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1266524>
- Laurent, J. Y., & Brossard, M. (1991). Etude comparee de la determination du phosphore total de sols tropicaux. *Cahiers - ORSTOM, Serie Pedologie*, 26(3), 281–285.
- Lawal, S., Sitch, S., Lombardozi, D., Nabel, J. E. M. S., Wey, H. W., Friedlingstein, P., Tian, H., & Hewitson, B. (2022). Investigating the response of leaf area index to droughts in southern African vegetation using observations and model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(8), 2045–2071. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2045-2022>
- le Roux, P. A. L., & du Preez, C. C. (2008). Micromorphological evidence of redox activity in the soft plinthic b horizon of a soil of the bainsvlei form in an arid bioclimate. *South African Journal of Plant and Soil*, 25(2), 84–91. <https://doi.org/10.1080/02571862.2008.10639900>
- le Roux, P. A. L., du Preez, C. C., & Bühmann, C. (2005). Indications of ferrollysis and structure degradation in an estcourt soil and possible relationships with plinthite formation. *South African Journal of Plant and Soil*, 22(4), 199–206. <https://doi.org/10.1080/02571862.2005.10634708>
- Leão, T. P., Neves, H. V., Campos, A. F. C., Pinheiro, T. D., & de Figueiredo, C. C. (2020). A conceptual model for stability and surface chemistry of oxidic soil dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603(June), 125214. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125214>
- Leblanc, M., & Malaisse, F. (1978). *Lubumbashi , un écosystème urbain tropical*. 95–96.

- Lee, D. M., Reynolds, W. D., Elrick, D. E., & Clothier, B. E. (1985). A comparison of tree field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Can. J. Soil Sci.*, *65*, 563–573.
- Legros, J.-P. (2013). Latérites et autres sols des régions intertropicales. *Bulletin*, *12*(44), 369–382. <http://www.ac-sciences-lettres-montpellier.fr/>
- Lehto, T. (1994). Effects of soil pH and calcium on mycorrhizas of *Picea abies*. *Plant and Soil*, *163*(1), 69–75. <https://doi.org/10.1007/BF00033942>
- Lei, J. (2020). Cross-Validation With Confidence. *Journal of the American Statistical Association*, *115*(532), 1978–1997. <https://doi.org/10.1080/01621459.2019.1672556>
- Leite, O. D. C., da Luz, J. H. S., Lima, S. D. O., da Silva, R. R., Fidelis, R. R., Manhães, C. M. C., Peluzio, J. M., Júnior, O. J. F., dos Santos, M. G., Pinto, I. D. O., Filho, R. N. D. A., da Silva, A. D. P., Cachoeira, J. N., & Scheidt, G. N. (2024). Effect of liming in plinthic and petroplinthic soils for soybean cultivation in the Brazilian Savanna. *Australian Journal of Crop Science*, *18*(2), 64–71. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.02.PNE3872>
- Li, X., Wang, R., Lou, F., Ji, P., Wang, J., Dong, W., Tao, P., & Zhang, Y. (2024a). Subsoiling Combine with Layered Nitrogen Application Optimizes Root Distribution and Improve Grain Yield and N Efficiency of Summer Maize. *Agronomy*, *14*(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy14061228>
- Li, J., Xu, Y., Zhang, Y., Liu, Z., Gong, H., Fang, W., OUYang, Z., Li, W., & Xu, L. (2024b). Quantifying the mitigating effect of organic matter on heavy metal availability in soils with different manure applications: A geochemical modelling study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *276*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116321>
- Li, K. wei, Lu, H. long, Nkoh, J. N., Hong, Z. neng, & Xu, R. kou. (2022). Aluminum mobilization as influenced by soil organic matter during soil and mineral acidification: A constant pH study. *Geoderma*, *418*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115853>
- Li, Y., Dong, Z. Y., Pan, D. Z., Pan, C. H., & Chen, L. H. (2017). Effect of termite on soil pH and its application for termite control in Zhejiang Province, China. *Sociobiology*, *64*(3), 317–326. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i3.1674>
- Lidon, F. C., & Barreiro, M. G. (1998). Threshold aluminum toxicity in maize. *Journal of Plant Nutrition*, *21*(3), 413–419. <https://doi.org/10.1080/01904169809365413>
- Lin, Z., Zhen, Z., Chen, C., Li, Y., Luo, C., Zhong, L., Hu, H., Li, J., Zhang, Y., Liang, Y., Yang, J., & Zhang, D. (2018). Rhizospheric effects on atrazine speciation and degradation in laterite soils of *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(13), 12407–12418. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1468-6>

- Liu, H., Su, B., Liu, R., Wang, J., Wang, T., Lian, Y., Lu, Z., Yuan, X., Song, Z., & Li, R. (2025a). Conservation Tillage Mitigates Soil Organic Carbon Losses While Maintaining Maize Yield Stability Under Future Climate Change Scenarios in Northeast China: A Simulation of the Agricultural Production Systems Simulator Model. *Agronomy*, *15*(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010001>
- Liu, S., Jia, Z., Hou, X., Yang, X., Qiu, F., Zargar, M., Chen, M., Lu, C., & Liu, Y. (2025b). Integrated Transcriptome and Metabolome Analysis Identifies Key Genes Regulating Maize Tolerance to Alkaline Stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(21). <https://doi.org/10.3390/ijms262110632>
- Liu, X., Liu, J., Huang, C., Liu, H., Meng, Y., Chen, H., Ma, S., & Liu, Z. (2024a). The impacts of irrigation methods and regimes on the water and nitrogen utilization efficiency in subsoiling wheat fields. *Agricultural Water Management*, *295*(October 2023), 108765. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108765>
- Liu, T., Duan, S. B., Liu, N., Wei, B., Yang, J., Chen, J., & Zhang, L. (2024b). Estimation of crop leaf area index based on Sentinel-2 images and PROSAIL-Transformer coupling model. *Computers and Electronics in Agriculture*, *227*(P2), 109663. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109663>
- Liu, X. N., Hseu, Z. Y., & Chen, Z. S. (2020). Correcting the classification of plinthic Ultisols on aged alluvial terraces in Taiwan. *Soil Science and Plant Nutrition*, *66*(3), 458–468. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1755206>
- Loke, P. F., Kotzé, E., & du Preez, C. C. (2012). Changes in soil organic matter indices following 32 years of different wheat production management practices in semi-arid South Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *94*(1), 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9529-6>
- Loke, P. F., Kotzé, E., & Du Preez, C. C. (2013). Impact of long-term wheat production management practices on soil acidity, phosphorus and some micronutrients in a semi-arid Plinthosol. *Soil Research*, *51*(5), 415–426. <https://doi.org/10.1071/SR12359>
- Loke, P. F., Kotzé, E., & Du Preez, C. C. (2014). Long-Term Effects of Wheat Production Management Practices on Exchangeable Base Cations and Cation Exchange Capacity of a Plinthosol in Semi-arid South Africa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *45*(8), 1083–1105. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.867060>
- López-Hernández, D., Brossard, M., Fardeau, J. C., & Lepage, M. (2006). Effect of different termite feeding groups on P sorption and P availability in African and South American savannas. *Biology and Fertility of Soils*, *42*(3), 207–214. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0017-x>
- Lukeba, J.-C. L., Vumilia, R. K., Nkongolo, K. C. K., Mwabila, M. L., & Tsumbu, M. (2013). Growth and Leaf Area Index Simulation in Maize (*Zea mays* L.)

- under Small-Scale Farm Conditions in a Sub-Saharan African Region. *American Journal of Plant Sciences*, 04(03), 575–583. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.43075>
- Luo, M., Vandeputte, D. J., Lievens, S., Li, G., Su, Y., Huysmans, M., Elskens, M., Baeyens, W., & Gao, Y. (2025). Understanding the availability of metals in agricultural soils and the impact of manure application. *Journal of Hazardous Materials*, 493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138386>
- Ma, S., Wang, C., Bi, J., Ye, F., & Liu, X. (2024). Calcium carbonate enhanced As uptake in *Pteris vittata* by increasing pH and As bioavailability and mediating rhizosphere As-transformation bacterial community. *Environmental and Experimental Botany*, 226(June), 105949. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105949>
- Malafaia, G., de Araújo, F. G., da Costa Estrela, D., Guimarães, A. T. B., Leandro, W. M., & de Lima Rodrigues, A. S. (2016). Corn production in soil containing in natura tannery sludge and irrigated with domestic wastewater. *Agricultural Water Management*, 163, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.018>
- Malaisse, F. (1997). *Se nourir en forêt claire africain* (Presses Ag).
- Malaisse, F. (2011). How to live and survive in Zambezian open forest (Miombo Ecoregion). *Les Presses Agronomiques de Gembloux (Belgique)*, 23, 91–97. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2011.679>
- Malik, S., Laura, J. S., & Khyalia, P. (2024). Assessing the potential sustainability benefit of Agricultural residues: Biomass conversion to Biochar and its use for soil and crop improvement. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(4), 1479–1493. <https://doi.org/10.21608/ejss.2024.294662.1783>
- Malone, R. W., Huth, N., Carberry, P. S., Ma, L., Kaspar, T. C., Karlen, D. L., Meade, T., Kanwar, R. S., & Heilman, P. (2007). Evaluating and predicting agricultural management effects under tile drainage using modified APSIM. *Geoderma*, 140(3), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.014>
- Mamo, M., & Wortmann, C. (2009). Phosphorus Sorption as Affected by Soil Properties and Termite Activity in Eastern and Southern Africa. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 2170–2176. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0373>
- Maroneze, M. M., Zepka, L. Q., Vieira, J. G., Queiroz, M. I., & Jacob-Lopes, E. (2014). A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Martins, A. P. B., Glenio, G. S., de Oliveira, V. Á., Maranhão, D. D. C., & Collier, L. S. (2018a). Hardening and stability of plinthic materials of the Araguaia river floodplain under different drying treatments. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 42, 1–17. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcbs20170190>

- Martins, A. P. B., Glenio, G. S., de Oliveira, V. Á., Maranhão, D. D. C., & Collier, L. S. (2018b). Reversibility of the hardening process of plinthite and petroplinthite in soils of the araguaia river floodplain under different treatments. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 42, 1–13. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170191>
- Mbunga, B. K., Mapatano, M. A., Egbende, L., Strand, T. A., Hatloy, A., & Engebretsen, I. M. S. (2023). An example of a convergent mixed-methods analysis to examine food security: the case of Popokabaka in the Democratic Republic of Congo. *Agriculture and Food Security*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00443-3>
- McCallum, M. H., Kirkegaard, J. A., Green, T. W., Cresswell, H. P., Davies, S. L., Angus, J. F., & Peoples, M. B. (2004). Improved subsoil macroporosity following perennial pastures. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(3), 299–307. <https://doi.org/10.1071/EA03076>
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50(3), 255–271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 12(15). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Meriño-Gergichevich, C., Alberdi, M., Ivanov, A. G., & Reyes-Díaz, M. (2010). Al³⁺-Ca²⁺ interaction in plants growing in acid soils: Al-phytotoxicity response to calcareous amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 217–243. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100003>
- Metahni, S., Coudert, L., Gloaguen, E., Guemiza, K., Mercier, G., & Blais, J. F. (2019). Comparison of different interpolation methods and sequential Gaussian simulation to estimate volumes of soil contaminated by As, Cr, Cu, PCP and dioxins/furans. *Environmental Pollution*, 252, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.122>
- Michener, W. K. (1997). Quantitatively evaluating restoration experiments: Research design, statistical analysis, and data management considerations. *Restoration Ecology*, 5(4), 324–337. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00546.x>
- Miguel, P., Dalmolin, R. S. D., Pedron, F. de A., Fink, J. R., & Moura-Bueno, J. M. (2013). Caracterização de plintitas e petroplintitas em solos da Depressão Central do Rio Grande do Sul. *Ciencia Rural*, 43(6), 999–1005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000065>
- Mills, A. J., Milewski, A., Fey, M. V., Groengroeft, A., & Petersen, A. (2009). Fungus culturing, nutrient mining and geophagy: A geochemical investigation of Macrotermes and Trinervitermes mounds in southern Africa. *Journal of Zoology*, 278(1), 24–35. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2008.00544.x>

- Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. In P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications* (2nd ed., Vol. 1, pp. 481–492). Wiley, Hoboken. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Spatial%20interpolation&publication_year=1999&author=L.%20Mitas&author=H.%20Mitasova
- Mohanty, M., Probert, M. E., Reddy, K. S., Dalal, R. C., Mishra, A. K., Subba Rao, A., Singh, M., & Menzies, N. W. (2012). Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 152, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.013>
- Mohanty, M., Sinha, N. K., Somasundaram, J., McDermid, S. S., Patra, A. K., Singh, M., Dwivedi, A. K., Reddy, K. S., Rao, C. S., Prabhakar, M., Hati, K. M., Jha, P., Singh, R. K., Chaudhary, R. S., Kumar, S. N., Tripathi, P., Dalal, R. C., Gaydon, D. S., & Chaudhari, S. K. (2020). Soil carbon sequestration potential in a Vertisol in central India- results from a 43-year long-term experiment and APSIM modeling. *Agricultural Systems*, 184(July), 102906. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102906>
- Montiel-Rozas, M. M., Madejón, E., & Madejón, P. (2016). Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species: An assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination. *Environmental Pollution*, 216, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.080>
- Moriassi, D. N. Arnold, J. G. Van Liew, M. W. Bingner, R. L. Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Mourtzinis, S., Rattalino Edreira, J. I., Conley, S. P., & Grassini, P. (2017). From grid to field: Assessing quality of gridded weather data for agricultural applications. *European Journal of Agronomy*, 82, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.013>
- Mpundu, M. M., Useni, S., Mwamba, M., Kateta, M. G., Mwansa, M., Ilunga, K., Kamenga, K. C., Kyungu, K., & Nyembo, K. L. (2013). Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de différents jardins potagers de la ville minière de Lubumbashi et risques de contamination des cultures potagères. *Journal of Applied Biosciences*, 66, 5106–5113.
- Mubemba, M. M. M., Mununga, K. F., Kaumbu, K. J.-M., Mwilambwe, K. X., Maloba, K. J.-P., Banza, I. M., & Mukunto, K. I. (2017). Influence des sols

- contaminés en cuivre sur le développement de deux variétés (locale et améliorée) de légumes dans la région de Lubumbashi (RD. Congo). *Journal of Applied Biosciences*, 115(1), 11410. <https://doi.org/10.4314/jab.v115i1.1>
- Mubemba, M. M., Sikuzani, Y. U., Kimuni, L. N., & Colinet, G. (2014). Effects of carbonate and organic amendments on two vegetable crops in contaminated soil in Lubumbashi (DR Congo). *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 18(3), 367–375.
- Muhirwa, F., Shen, L., Elshkaki, A., Chiaka, J. C., Zhong, S., Bönecke, E., Hirwa, H., Seka, A. M., Habiyakare, T., Tuyishimire, A., & Harerimana, B. (2023). Alert in the dynamics of water-energy-food production in African countries from a nexus perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 194(March). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106990>
- Mujinya, B. B., Adam, M., Mees, F., Bogaert, J., Vranken, I., Erens, H., Baert, G., Ngongo, M., & Ranst, E. Van. (2014). Spatial patterns and morphology of termite (*Macrotermes falciger*) mounds in the Upper Katanga, D.R. Congo. *Catena*, 114, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.015>
- Mujinya, B. B., Mees, F., Erens, H., Dumon, M., Baert, G., Boeckx, P., Ngongo, M., & Van Ranst, E. (2013). Clay composition and properties in termite mounds of the Lubumbashi area, D.R. Congo. *Geoderma*, 192(1), 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.010>
- Mujinya, B. B., Ranst, E. Van, Verdoodt, A., Baert, G., & Ngongo, L. M. (2010). Termite bioturbation effects on electro-chemical properties of Ferralsols in the Upper Katanga (D.R. Congo). *Geoderma*, 158(3–4), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.033>
- Mulaji, K. C. (2011). *Utilisation des composts de biodéchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la province de Kinshasa (République Démocratique du Congo)* [Thèse de Doctorat]. Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège.
- Mulimbi, W., Brye, K. R., Nalley, L. L., & Birindwa, D. R. (2023a). Conservation agriculture assists smallholder farmers and their agroecosystem in the Democratic Republic of the Congo. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108597>
- Mulimbi, W., Nalley, L., Dixon, B., Snell, H., & Huang, Q. (2019). Factors Influencing Adoption of Conservation Agriculture in the Democratic Republic of the Congo. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 51(4), 622–645. <https://doi.org/10.1017/aae.2019.25>
- Mulimbi, W., Nalley, L., Nayga, R. M., & Gaduh, A. (2023b). Are consumers willing to pay for conservation agriculture? The case of white maize in the Democratic Republic of the Congo. *Natural Resources Forum*, 47(1), 22–41. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12268>

- Mulume, B. S., Dontsop, N. P. M., Nyamugira, B. A., Jean-Jacques, M. S., Manyong, V., & Bamba, Z. (2022). Farmers' credit access in the Democratic Republic of Congo: Empirical evidence from youth tomato farmers in Ruzizi plain in South Kivu. *Cogent Economics and Finance*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23322039.2022.2071386>
- Mulumeoderhwa, M. F., Maniriho, A., Ciza, A. N., Iyoto, E. B., Lukeba, F. N., Ngerizabona, S. V., Mirindi, G. F., Namegabe, J. L. M., & Lebailly, P. (2022). Characterization of Small-Scale Farming As an Engine of Agricultural Development in Mountainous South Kivu, Democratic Republic of Congo. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(2), 123–129. <https://doi.org/10.55493/5005.v12i2.4475>
- Mundus, S., Lombi, E., Holm, P. E., Zhang, H., & Husted, S. (2012). Assessing the plant availability of manganese in soils using Diffusive Gradients in Thin films (DGT). *Geoderma*, 183–184, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.014>
- Mushagalusa Balasha, A., & Nkulu Mwine, F. J. (2021). Potential threats to agricultural food production and farmers' coping strategies in the marshlands of Kabare in the Democratic Republic of Congo. *Cogent Food and Agriculture*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2021.1933747>
- Mushagalusa Balasha, A., & Nkulu Mwine Fyama, J. (2020). Déterminants d'adoption des techniques de production et protection intégrées pour un maraîchage durable à Lubumbashi, République démocratique du Congo. *Cahiers Agricultures*, 29, 13. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020012>
- Muyumba, D. K., Liénard, A., Mahy, G., Luhembwe, M. N., & Colinet, G. (2015). Characterization of soil-plant systems in the hills of the copper belt in Katanga. A review. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 19(2), 204–214.
- Naeem, M. B., Jahan, S., Rashid, A., Shah, A. A., Raja, V., & El-Sheikh, M. A. (2024). Improving maize yield and drought tolerance in field conditions through activated biochar application. *Scientific Reports*, 14(1), 1–25. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76082-w>
- Nafi, E., Webber, H., Danso, I., Naab, J. B., Frei, M., & Gaiser, T. (2020). Interactive effects of conservation tillage, residue management, and nitrogen fertilizer application on soil properties under maize-cotton rotation system on highly weathered soils of West Africa. *Soil and Tillage Research*, 196(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104473>
- Nahon, D. (2003). Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *Comptes Rendus - Geoscience*, 335(16), 1109–1119. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.008>
- Nascimento, D. B. do, Lopes, M. L. S., Izidro, J. L. P. S., Bezerra, R. C. A., Gois, G. C., de Amaral, T. N. E., da Silva Dias, W., de Barros, M. M. L., da Silva

- Oliveira, A. R., de Farias Sobrinho, J. L., & Coêlho, J. J. (2024). Nitrogen, phosphorus, and potassium cycling in pasture ecosystems. *Ciencia Animal Brasileira*, 25. <https://doi.org/10.1590/1809-6891v25e-76743E>
- Negm, A., Minacapilli, M., & Provenzano, G. (2018). Downscaling of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) daily air temperature in Sicily, Italy, and effects on crop reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 209(February), 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.016>
- Ngon Ngon, G. F., Yongue-Fouateu, R., Bitom, D. L., & Bilong, P. (2009). A geological study of clayey laterite and clayey hydromorphic material of the region of Yaoundé (Cameroon): a prerequisite for local material promotion. *Journal of African Earth Sciences*, 55(1–2), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.12.008>
- Ngongo, M., Ranst, E. Van, Baert, G., Kasongo, L., Verdoodt, A., Mujinya, B. B., & Mukalay, J. (2009). *Guide des sols en République Démocratique du Congo, tome I: étude et gestion* (H. U. UGent, Ed.). <https://www.researchgate.net/publication/281376703>
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104(5), 1336–1347. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0065>
- Nieminen, P. (2022). Application of Standardized Regression Coefficient in Meta-Analysis. *BioMedInformatics*, 2(3), 434–458. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics2030028>
- Nikkel, M., & Lima, S. O. (2019). Maize (*Zea mays*) Cultivated in Concretionary Petric Plinthosol. *Journal of Agricultural Science*, 11(14), 131. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n14p131>
- Ning, T., Liu, Z., Hu, H., Li, G., & Kuzyakov, Y. (2022). Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 223). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>
- Nordquist, P. T., Hergert, G. W., Skates, B. A., & Petersen, J. L. (1996). Genetic improvement of corn for tolerance to high pH soils [Article]. *Journal of Plant Nutrition.*, 19(8–9), 1309–1317. <https://doi.org/10.1080/01904169609365200>
- Nsele, M. K., Fyama, J. N. M., Maréchal, K., & Dogot, T. (2022). Factors Influencing the Sustained Adoption of Innovative Techniques by Urban Farmers in Lubumbashi, Democratic Republic of Congo. *Agriculture (Switzerland)*, 12(8), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081157>
- N'tambwe Nghonda, D. donné, Muteya, H. K., Kashiki, B. K. W. N., Sambiéni, K. R., Malaisse, F., Sikuzani, Y. U., Kalenga, W. M., & Bogaert, J. (2023). Towards an Inclusive Approach to Forest Management: Highlight of the Perception and Participation of Local Communities in the Management of

- miombo Woodlands around Lubumbashi (Haut-Katanga, D.R. Congo). *Forests*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/f14040687>
- Nyachiro J.M., & Briggs K.G. (1987). The Effects of Lime (Ca[OH]₂) on the Performance of Wheat Cultivars in Plinthic Ferralsols (Eldoret Soils) of Kenya. *J. Agronomy & Crop Science*, 292, 287–292.
- Nyembo, K. L., Ilunga, T. H., Mwamba, M. D., Kanyenga, L. A., Baboy, L. L., & Kalonji, M. A. (2018). *La culture du maïs dans le Haut-Katanga* (Etudes africaines). Harmattan. https://www.editions-harmattan.fr/catalogue/livre/la-culture-du-mais-dans-le-haut-katanga/17063?srsltid=AfmBOopodnqmpPIp5E_fl_I0mq4zQsLPMGc9fyFFs2Kwz2MJ40jTx6z
- Obalum, S. E., Chibuike, G. U., Peth, S., & Ouyang, Y. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>
- O'Brien, F. J. M., Almaraz, M., Foster, M. A., Hill, A. F., Huber, D. P., King, E. K., Langford, H., Lowe, M. A., Mickan, B. S., Miller, V. S., Moore, O. W., Mathes, F., Gleeson, D., & Leopold, M. (2019). Soil salinity and pH drive soil bacterial community composition and diversity along a lateritic slope in the Avon River Critical Zone Observatory, Western Australia. *Frontiers in Microbiology*, 10(JUL). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01486>
- O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality and Quantity*, 41(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Ochieng, J., Ouma, E., & Birachi, E. (2014). Gender Participation and Decision Making in Crop Management in Great Lakes Region of Central Africa. *Gender, Technology and Development*, 18(3), 341–362. <https://doi.org/10.1177/0971852414544007>
- Ogg, C. M., Kelley, J. A., Wilson, M. A., Tuttle, J. W., Gulley, C. D., Reed, J. M., & Sullivan, G. E. (2022). Polygenesis and cementation pathways for plinthic and non-plinthic soils on the Upper Coastal Plain, South Carolina. *Geoderma*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116130>
- Ogunwole, J. O., Esu, I. E., Kparmwang, T., & Chude, V. O. (2001). Effects of prolonged shaking periods and contents of iron oxides on dispersion of plinthitic soil in Nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(13–14), 2293–2306. <https://doi.org/10.1081/CSS-120000284>
- Olaluwoye, O. T., Lukman, A. F., Alrasheedi, M. A., Nzomo, W. N., & Farghali, R. A. (2025). Robust estimation methods for addressing multicollinearity and outliers in beta regression models. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85553-7>
- Olego, M. Á., Quiroga, M. J., Mendaña-Cuervo, C., Cara-Jiménez, J., López, R., & Garzón-Jimeno, E. (2021). Long-term effects of calcium-based liming materials

- on soil fertility sustainability and rye production as soil quality indicators on a typic paleixerult. *Processes*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/pr9071181>
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=d-oaM88x5agC&oi=fnd&pg=PA2&dq=Olsen+bicarbonate&ots=z_-lTzeRYy&sig=7uroI1m50UN8zM-fhvMLPY5aLRY
- Oluwatosin, G. A., Are, K. S., Adeyolanu, O. D., & Idowu, O. J. (2020). Characteristics and agricultural potential of soils with plinthic materials in the savanna ecology of south western Nigeria. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1794–1811. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1696017>
- Osher, L. J., & Buol, S. W. (1998). Relationship of soil properties to parent material and landscape position in eastern Madre de Dios, Peru. *Geoderma*, 83(1–2), 143–166. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00133-X)
- Otchia, C. S. (2014). Agricultural Modernization, Structural Change and Pro-poor Growth: Policy Options for the Democratic Republic of Congo. *Journal of Economic Structures*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40008-014-0008-x>
- Ou, X., Sebagenzi, G. D., Mujinya, B. B., Boeckx, P., Döetler, S., Six, J., Shi, P., & Van Oost, K. (2025). From smallholder to commercial farming: the impact of termite mound levelling and spatial heterogeneity in mound morphology on soil organic carbon in Miombo woodlands, Central Africa. *Landscape Ecology*, 40(4). <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02097-x>
- Ouédraogo, R. A., Chartin, C., Kambiré, F. C., van Wesemael, B., Delvaux, B., Milogo, H., & Biielders, C. L. (2020). Short and long-term impact of urban gardening on soil organic carbon fractions in Lixisols (Burkina Faso). *Geoderma*, 362(November 2019), 114110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114110>
- Padonou, E. A., Djangoun, C. A. M. S., Akakpo, A. B., Ahlinvi, S., Lykke, A. M., Schmidt, M., Assogbadjo, A., & Sinsin, B. (2020). Role of termites in the restoration of soils and plant richness on bowé in West Africa. *African Journal of Ecology*, 58(4), 828–835. <https://doi.org/10.1111/aje.12778>
- Pale, S., Barro, A., Koumbem, M., Sere, A., & Traore, H. (2021). Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les rendements du mil en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(2), 497–510. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i2.10>
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., & Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of Environmental and Public Health*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/158764>
- Patel, D. P., Das, A., Kumar, M., Munda, G. C., Ngachan, S. V., Ramkrushna, G. I., Layek, J., Pongla, N., Buragohain, J., & Somireddy, U. (2015). Continuous

- application of organic amendments enhances soil health, produce quality and system productivity of vegetable-based cropping systems in subtropical eastern himalayas. *Experimental Agriculture*, 51(1), 85–106. <https://doi.org/10.1017/S0014479714000167>
- Paul, E. A. (2016). The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 98, 109–126. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>
- Payton, R. W., Christiansson, C., Shishira, E. K., Yanda, P., & Eriksson, M. G. (1992). Landform, Soils and Erosion in the North-Eastern Irangi Hills, Kondoa, Tanzania. *Geografiska Annaler*, 74(2), 65–79.
- Peake, A. S., Huth, N. I., Kelly, A. M., & Bell, K. L. (2013). Variation in water extraction with maize plant density and its impact on model application. *Field Crops Research*, 146, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.012>
- Pereira-De-Oliveira, L., Macedo, L., Neto, J., Santos, D., & Silva, H. (2019). Viability of lateritic soil as alkaline activated precursor. *MATEC Web of Conferences*, 274, 01004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927401004>
- Pessoa, T. N., Santos, R. S., Libardi, P. L., de Assis, I. R., & Oliveira, T. S. (2024). Influence of intensive cropping of vegetables on physical and hydraulic properties and functions of an Oxisol in the Brazilian Cerrado. *Catena*, 235(March 2022). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107651>
- Plassard, C., Robin, A., Le Cadre, E., Marsden, C., Trap, J., Herrmann, L., Waaithaisong, K., Lesueur, D., Blanchart, E., Chapuis-Lardy, L., & Hinsinger, P. (2015). Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques*, 43, 177–186.
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3–4), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Prudnikova, E., Savin, I., Vindeker, G., Grubina, P., Shishkonakova, E., & Sharychev, D. (2019). Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy. *Remote Sensing*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/rs11161932>
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., & Czimczik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8(6), 1415–1440. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>
- R Core Team. (2025). A Language and Environment for Statistical Computing. In *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>
- Rajeev, V., & Sanjeev, A. (2011). Impact of termite activity and its effect on soil composition. *Tanzania Journal of Natural and Applied Sciences*, 2(2), 399–404.

- Ramadhan, M. N., & Alfari, M. A. A. (2023). Soil Properties and Maize Growth as Affected by Subsoiling and Traffic-Induced Compaction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1225(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1225/1/012077>
- Ramaroson, V. H., Becquer, T., Sá, S. O., Razafimahatratra, H., Delarivière, J. L., Blavet, D., Vendrame, P. R. S., Rabeharisoa, L., & Rakotondrazafy, A. F. M. (2018). Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. *Catena*, 168(August 2017), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.016>
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Dutter, R. (2008). Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R. In *Statistical Data Analysis Explained*. Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470987605.fmatter>
- Rellini, I., Trombino, L., Carbone, C., & Firpo, M. (2015). Petroplinthite formation in a pedosedimentary sequence along a northern Mediterranean coast: from micromorphology to landscape evolution. *Journal of Soils and Sediments*, 15(6), 1311–1328. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0896-2>
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., & Handyside, P. (2023). Development of an extended Schnute model for more physically realistic representations of soil water retention and moisture capacity curves. *Canadian Journal of Soil Science*, 103(3), 493–509. <https://doi.org/10.1139/cjss-2023-0014>
- Richards, L. A. (1941). A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science*, 51(5), 377–386. https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20361500/pdf_pubs/P0005.pdf
- Rivas, C. A., Guerrero-casado, J., & Navarro-cerillo, R. M. (2021). Deforestation and fragmentation trends of seasonal dry tropical forest in Ecuador: impact on conservation. *Forest Ecosystems*, 6(46). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40663-021-00329-5>
- Robertson, M. J., Sakala, W., Benson, T., & Shamudzarira, Z. (2005). Simulating response of maize to previous velvet bean (*Mucuna pruriens*) crop and nitrogen fertiliser in Malawi. *Field Crops Research*, 91(1), 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.06.009>
- Roquin, C., Freyssinet, P., Zeegers, H., & Tardy, Y. (1990). Element distribution patterns in laterites of southern Mali: consequence for geochemical prospecting and mineral exploration. *Applied Geochemistry*, 5(3), 303–315. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90006-Q](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90006-Q)
- Rosolem, C. A., Nascimento, C. A. C., Bertolino, K. M., & Picoli, L. B. (2024). Humic acid enhances phosphorus transport in soil and uptake by maize. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(3), 401–414. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300413>

- Rotta, L. R., Paulino, H. B., Anghinoni, I., Souza, E. D. de, Lopes, G., & Carneiro, M. A. C. (2015). Phosphorus fractions and availability in a haplic plinthosol under no-tillage system in the Brazilian Cerrado. *Ciência e Agrotecnologia*, 39(3), 216–224.
- Ryder, M., Gérard, F., Evans, D. E., & Hodson, M. J. (2003). The use of root growth and modelling data to investigate amelioration of aluminium toxicity by silicon in *Picea abies* seedlings. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 97(1), 52–58. [https://doi.org/10.1016/S0162-0134\(03\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S0162-0134(03)00181-8)
- Saïdou, A., Janssen, B. H., & Temminghoff, E. J. M. (2003). Effects of soil properties, mulch and NPK fertilizer on maize yields and nutrient budgets on ferralitic soils in southern Benin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100(2–3), 265–273. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00184-1)
- Sajid, A., Ahmad, K., Khan, Z. I., Khalofah, A., & Ahmad, I. (2025). Assessing the impact of industrial pollution stress on the physiological defense, proximate composition and morphological traits of riparian vegetation. *BMC Plant Biology*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07034-3>
- Sanchez, P. A. (2018). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (John Wiley & Sons). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sanchez, P. A., Palm, C. A., & Buol, S. W. (2003). Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114(3–4), 157–185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00040-5)
- Sanders, J. R. (2006). The effect of pH upon the copper and cupric ion concentrations in soil solutions. *European Journal of Soil Science*, 4(33), 679–689. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01799.x>
- Santhoshkumar, S., Gomathi, V., Meenakshisundaram, P., & Kavitha Mary, J. (2024). Comparative insights of soil properties of termite hill in relation to the microbial community using culture-independent approach. *Total Environment Advances*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200094>
- Santos, D. P., Santos, G. G., Oliveira, V. Á. de, Silva, G. C. da, Flores, R. A., Azevedo, A. C., Souza Júnior, V. S. de, & Pereira, M. G. (2022). Probable causes of hardening of redoximorphic features in Plinthosols of the Araguaia River floodplain, Central region of Brazil. *Geoderma Regional*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00583>
- Santos, M. V. C., de Carvalho, A. L., de Souza, J. L., da Silva, M. B. P., Medeiros, R. P., Junior, R. A. F., Lyra, G. B., Teodoro, I., Lyra, G. B., & Lemes, M. A. M. (2020). A modelling assessment of the maize crop growth, yield and soil water dynamics in the Northeast of Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, 14(6), 897–904. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.06.p1410>
- Santos, T. E. D., Gomes, F. H., Mancini, M., Nóbrega, G. N., Avanzi, J. C., Marques, J. J., Souza Júnior, V. S. de, Inda, A. V., Silva, M. L. N., & Curi, N. (2023a). Detailed characterization of plinthic soils in Southern Mali, Sub-Saharan Africa,

- as a secure basis for specific soil management and food security. *Catena*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107088>
- Sapkota, T. B., Jat, M. L., Jat, R. K., Kapoor, P., & Stirling, C. (2016). Yield estimation of food and non-food crops in smallholder production systems. In *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1_8
- Šarauskis, E., Sokas, S., & Rukaitė, J. (2024). Variable Depth Tillage: Importance, Applicability, and Impact—An Overview. *AgriEngineering*, 6(2), 1870–1885. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020109>
- Sarkar, A., & Bandyopadhyay, P. K. (2018). Effect of incubation duration of incorporated organics on saturated hydraulic conductivity, aggregate stability and sorptivity of alluvial and red-laterite soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 66(4), 370–380. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2018.00046.4>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schaffer, C. (1993). Selecting a Classification Method by Cross-Validation. *Machine Learning*, 13, 135–143.
- Sciarresi, C., Thies, A., Topp, C., Eudy, D., Trifunovic, S., Ruiz, A., Dixon, P. M., Miguez, F., Burras, L. C., & Archontoulis, S. V. (2024). Do newer maize hybrids grow roots faster and deeper? *Crop Science*, 64(3), 1559–1576. <https://doi.org/10.1002/csc2.21208>
- Sediqui, N., Amin, M. W., Dawlatzai, N., Gulab, G., Poyesh, D. S., Terada, N., Sanada, A., Kamata, A., & Koshio, K. (2024). Elucidation of Shoot and Root Growth, Physiological Responses, and Quality Traits of Tomato (*Solanum lycopersicon* L.) Exposed to Elevated Calcium Carbonate Concentrations. *Horticulturae*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060573>
- Seibert, J., Stendahl, J., & Sørensen, R. (2007). Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma*, 141(1–2), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.013>
- Seraj, A., Mohammadi-Khanaposhtani, M., Daneshfar, R., Naseri, M., Esmaili, M., Baghban, A., Habibzadeh, S., & Eslamian, S. (2022). Cross-validation. In *Handbook of HydroInformatics: Volume I: Classic Soft-Computing Techniques* (pp. 89–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821285-1.00021-X>
- Seymour, C. L., Milewski, A. V., Mills, A. J., Joseph, G. S., Cumming, G. S., Cumming, D. H. M., & Mahlangu, Z. (2014). Soil Biology & Biochemistry Do the large termite mounds of *Macrotermes* concentrate micronutrients in addition to macronutrients in nutrient-poor African savannas? *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.022>

- Shafique, F., Ali, Q., Yasin, G., Ahmad, S., Shafeeq, T., Zaheer, A., & Malik, A. (2020). Heavy metal toxicity and its physio-biochemical effects on maize. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 21(46), 94–102.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3), 591–611. <https://www.jstor.org/stable/2333709>
- Sharifi, A., & Dinpashoh, Y. (2014). Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith reference Crop Evapotranspiration to Climatic Variables in Iran. *Water Resources Management*, 28(15), 5465–5476. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0813-x>
- Shaw, J., West, L., Truman, C., & Radcliffe, D. (1997). Morphologic and Hydraulic Properties of Soils With Water Restrictive Horizons in the Georgia Coastal Plain. *Soil Science*, 162, 875–885. <https://doi.org/10.1097/00010694-199712000-00003>
- Sheng, M., Liu, J., Zhu, A. X., Rossiter, D. G., Liu, H., Liu, Z., & Zhu, L. (2019). Comparison of GLUE and DREAM for the estimation of cultivar parameters in the APSIM-maize model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278(November 2018), 107659. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107659>
- Shi, J., Li, J., Pan, Y., Zhao, M., Zhang, R., Xue, Y., & Liu, Y. (2024). The Physiological Response Mechanism of Peanut Leaves under Al Stress. *Plants*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/plants13121606>
- Showers, K. B. (2002). Mapping African. *Environmental History*, 10(2), 314–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/envhis/10.2.314>
- Shutch, M., Mukobo, R., Muyumba, D. K., Faucon, M., Lubalega, T., Andres, L., John, A., Vandenheede, N., & Pourret, O. (2019). *Fond pédogéochimique et cartographie des pollutions des sols à Lubumbashi*.
- Sikuzani, Y. U. (2019). Analyse spatio-temporelle des dynamiques d’anthropisation paysagère le long du gradient urbain-rural de la ville de Lubumbashi (Haut-Katanga, République démocratique du Congo). *Bois & Forêts Des Tropiques*, 342(November). <https://doi.org/10.19182/bft2019.342.a31725>
- Sikuzani, Y. U., Boisson, S., Kaleba, S. C., Khonde, C. N., Malaisse, F., Halleux, J.-M., Bogaert, J., & Kankumbi, F. M. (2020). Dynamique de l’occupation du sol autour des sites miniers le long du gradient urbain-rural de la ville de Lubumbashi, RD Congo. *Land Cover Dynamics around Mining Sites along Urban-Rural Gradient of Lubumbashi City (DR Congo)*, 24(1), 14–27. <https://proxy.library.carleton.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=egh&AN=141952931&site=ehost-live>
- Sikuzani, Y. U., Ilunga, G. M., Mulembo, T. M., Katombe, B. N., Wa Lwalaba, J. L., Lukangila, M. A., Lubobo, A. K., & Longanza, L. B. (2014). Amélioration de la qualité des sols acides de Lubumbashi (Katanga, RD Congo) par l’application

- de différents niveaux de compost de fumiers de poules. *Journal of Applied Biosciences*, 77(1), 6523. <https://doi.org/10.4314/jab.v77i1.3>
- Silva, L. (1969). Le Fer , Le Manganèse , L ' Aluminium Et La Silice Facilement. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol., VII(3)*.
- Silva Martins, A. L. da, de Oliveira, A. P., de Moura, E. G., & Hernan, J. (2012). Surface Infiltration on Tropical Plinthosols in Maranhão, Brazil. *Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops*, (March 2012). <https://doi.org/10.5772/33292>
- Sinclair, T. R., & Seligman, N. (2000). Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*, 68, 165–172.
- Singh, K., Choudhary, O. P., Singh, H. P., Singh, A., & Mishra, S. K. (2019). Subsoiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*, 189, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013>
- Smith, J., & Smith, P. (2007). *Environmental Modeling : An Introduction*. Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/environmental-modelling-9780199272068?cc=be&lang=en&>
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to soil taxonomy. In *Soil Conservation Service* (12th ed., Vol. 12). http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Song, G., Wang, J., Zhao, Y., Yang, D., Lee, C. K. F., Guo, Z., Detto, M., Alberton, B., Morellato, P., Nelson, B., & Wu, J. (2024). Scale matters: Spatial resolution impacts tropical leaf phenology characterized by multi-source satellite remote sensing with an ecological-constrained deep learning model. *Remote Sensing of Environment*, 304. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114027>
- Song, Y., Birch, C., Qu, S., Doherty, A., & Hanan, J. (2010). Analysis and modelling of the effects of water stress on maize growth and yield in dryland conditions. *Plant Production Science*, 13(2), 199–208. <https://doi.org/10.1626/pp.s.13.199>
- Srerrt, W. J. (1964). Moisture tension, diffusivity, and conductivity of a loam soil during wetting and drying. *Can. J. Soil Sci*, 45.
- Steppuhn, H., Waddington, J., & McConkey, B. G. (1995). Subsoiling to improve snowmelt infiltration and alfalfa yields within tall wheatgrass windbreaks. *Canadian Agricultural Engineering*, 37(4), 261–268.
- Stiles, C. A., Mora, C. I., & Driese, S. G. (2001). Pedogenic iron-manganese nodules in Vertisols: A new proxy for paleoprecipitation? *Geology*, 29(10), 943–946. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0943:PIMNIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0943:PIMNIV>2.0.CO;2)
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C.,

- Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. In *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 164, pp. 80–99). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>
- Stoyanova, Z., Poschenrieder, C., Tzvetkova, N., & Doncheva, S. (2009). Characterization of the tolerance to excess manganese in four maize varieties. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55(6), 747–753. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00416.x>
- Stupen, R., Ryzhok, Z., Stupen, N., Stupen, O., & Dudych, H. (2022). Methods of building a digital relief model using the application of geoinformation. *2022 International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2022*, (October). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590013>
- Suleymanov, A., Nizamutdinov, T., Morgun, E., & Abakumov, E. (2022). Evaluation and Spatial Variability of Cryogenic Soil Properties (Yamal-Nenets Autonomous District, Russia). *Soil Systems*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/soilsystems6030065>
- Sun, Q., Sun, W., Zhao, Z., Jiang, W., Zhang, P., Sun, X., & Xue, Q. (2023). Soil Compaction and Maize Root Distribution under Subsoiling Tillage in a Wheat–Maize Double Cropping System. *Agronomy*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy13020394>
- Tabaglio, V., Fiorini, A., Ndayisenga, V., Ndereyimana, A., Minuti, A., Nyembo Nyembo, R., Nyembo Ngoy, D., & Bertoni, G. (2023). Sustainable Intensification of Cassava Production towards Food Security in the Lomami Province (DR Congo): Role of Planting Method and Landrace. *Agronomy*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy13010228>
- Tabu, H. I., Kankolongo, A. M., Lubobo, A. K., & Kimuni, L. N. (2024). Maize yield and Fall armyworm damage responses to genotype and sowing date-associated variations in weather conditions. *European Journal of Agronomy*, 161(August), 127334. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127334>
- Tabu, H. I., Kasubandi, B. T., Mukalay, J. B., Mbwisha, P. S., Nkulu, S. N., Kwey, M. M., Nyembo, L., & Baboy, L. (2016). Les faibles doses de biomasses vertes de légumineuses, des bons substituts des engrais minéraux dans la maïsiculture à Lubumbashi ? *Afrique SCIENCE*, 12(2), 317–325.
- Tabu, H. I., Tshiabukole, J. P. K., Kankolongo, A. M., Lubobo, A. K., & Kimuni, L. N. (2023a). Yield stability and agronomic performances of provitamin A maize (*Zea mays* L.) genotypes in South-East of DR Congo. *Open Agriculture*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0177>
- Tabu, I., Lubobo, K., Mbuya, K., & Kimuni, N. (2023b). Heterosis and line-by-tester combining ability analysis for grain yield and provitamin A in maize. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*, 55(3), 695–707. <https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.3.8>

- Tahmoures, M., Honarbakhsh, A., Afzali, S. F., Akbari, M., & Ostovari, Y. (2025). Development of Pedotransfer Functions for Soil Moisture Prediction Using Soil and Remote Sensing Data at the Watershed Scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 104126. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104126>
- Tambwe, N., Rudolph, M., & Greenstein, R. (2011). “Instead of begging, i farm to feed my children”: Urban agriculture - An alternative to copper and Cobalt in Lubumbashi. *Africa*, 81(3), 391–412. <https://doi.org/10.1017/S000197201100043X>
- Tanaka, Y., Minggat, E., & Roseli, W. (2021). The impact of tropical land-use change on downstream riverine and estuarine water properties and biogeochemical cycles: a review. *Ecological Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00315-3>
- Tandzi, L. N., & Mutengwa, C. S. (2020). Estimation of Maize (*Zea mays* L.) Yield Per Harvest Area: Appropriate methods. *Agronomy*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010029>
- Tanner, L. H., & Khalifa, M. A. (2010). Origin of ferricretes in fluvial-marine deposits of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 56(4–5), 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.07.004>
- Tardy, Y., Boeglin, J. L., & Roquin, C. (1997). Petrological and geochemical classification of bauxites and their associated iron-rich laterites. In: *Brazilian Bauxites, Carvalho A., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y. (Eds.), Sao Paulo, USP FAPESP, and Paris, ORSTOM*, 23–49.
- Thanh Noi, P., & Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(1). <https://doi.org/10.3390/s18010018>
- Tian, L., Bi, W., Liu, X., Sun, L., & Li, J. (2019). Effects of waterlogging stress on the physiological response and grain-filling characteristics of spring maize (*Zea mays* L.) under field conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(5). <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2859-0>
- Tilahun, A., Cornelis, W., Sleutel, S., Nigussie, A., Dume, B., & Van Ranst, E. (2021). The potential of termite mound spreading for soil fertility management under low input subsistence agriculture. *Agriculture (Switzerland)*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture11101002>
- Tilahun, A., Kebede, F., Yamoah, C., Erens, H., Mujinya, B. B., Verdoodt, A., & Van Ranst, E. (2012). Quantifying the masses of *Macrotermes subhyalinus* mounds and evaluating their use as a soil amendment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 157, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.013>
- Tomczak, M., & Tomczak, E. (2014). The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trends*

- in Sport Sciences*, 1(21), 19–25.
<https://www.researchgate.net/publication/303919832>
- Trapnell, C. G., Friend, M. T., Chamberlain, G. T., & Birch, H. F. (1976). The effects of fire and termites on a Zambian Woodland soil. *Journal of Ecology*, 577–588.
<https://about.jstor.org/terms>
- Tsamou, P., Stefanou, S., & Noli, F. (2024). Assessment of distribution of heavy metals and radionuclides in soil and plants nearby an oil refinery in northern Greece. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(December 2023), 100593. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100593>
- Tshibangu, K. azadi A., Lwalaba, wa L. J., Kirika, A. B., Mavungu, M. J., Manda, K. G., Iband, K. M., Baert, G., Haesaert, G., & Mukobo, M. R. P. (2022). Effect of Phosphorus and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Inoculation on Growth and Productivity of Maize (*Zea mays* L.) in a Tropical Ferralsol. *Gesunde Pflanzen*, 74(1), 159–165. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00598-8>
- Tshomba, K. J., Nkulu, M. F. J., & Kalambaie, B. M. M. M. (2020). *Analyse de la dépendance alimentaire aux importations des ménages dans trois communes de la ville de Lubumbashi*, RDC. 8(June), 388–396.
- Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., & Briggs, J. M. (1999). Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 52–68. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00057-7)
- Useni, S. Y., Ilunga, G. M., Mulembo, T. M., Ntumba, B., & Longanza, L. B. (2014). Amélioration de la qualité des sols acides de Lubumbashi (Katanga , RD Congo) par l ’ application de différents niveaux de compost de fumiers de poules. *Journal of Applied Biosciences*, 77, 6523–6533.
- Useni, S. Y., Malaisse, F., Dibwe, D., Mwembu, D., & Bogaert, J. (2024). Lubumbashi (DR Congo): Navigating the socio-ecological complexities of a vital mining hub. *Cities*, 154(August), 105341. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105341>
- Useni Sikuzani, Y., André, M., Mahy, G., Cabala Kaleba, S., Munyemba Kankumbi, F., & Bogaert, J. (2018). Interprétation paysagère du processus d’urbanisation à Lubumbashi (RD Congo): dynamique de la structure spatiale et suivi des indicateurs écologiques entre 2002 et 2008. *Anthropisation Au Katanga*, 281–296.
- Van Engelen, V., Verdoodt, A., Dijkshoorn, K., & Ranst, E. Van. (2006). *Soil and Terrain Database of Central Africa (DR of Congo, Burundi and Rwanda)*. www.isric.org
- Van Reeuwijk, L. P. (2002). *Procedures for Soil Analysis* (6th edition). International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). https://files.isric.org/public/documents/ISRIC_TechPap09.pdf

- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., & Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S-Plus* (4th ed). Springer: New York, NY, USA.
- Vero, S. E., Antille, D. L., Lalor, S. T. J., & Holden, N. M. (2014). Field evaluation of soil moisture deficit thresholds for limits to trafficability with slurry spreading equipment on grassland. *Soil Use and Management*, 30(1), 69–77. <https://doi.org/10.1111/sum.12093>
- Vogeler, I., Carrick, S., Cichota, R., & Lilburne, L. (2019). Estimation of soil subsurface hydraulic conductivity based on inverse modelling and soil morphology. *Journal of Hydrology*, 574(April), 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.002>
- Vogeler, I., Carrick, S., Lilburne, L., Cichota, R., Pollacco, J., & Fernández-Gálvez, J. (2021). How important is the description of soil unsaturated hydraulic conductivity values for simulating soil saturation level, drainage and pasture yield? *Journal of Hydrology*, 598(March). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126257>
- Volkoff, B. (1998). Red and Lateritic Soils: World Scenario. In *Orstom* (Vol. 1).
- Voltr, V., Menšík, L., Hlisnikovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., & Pospíšilová, L. (2021). The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. *Agronomy*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>
- Wala, M., Kołodziejek, J., Sieczyńska, K., Mazur, J., & Skwarek-Fadecka, M. (2025). Manganese and iron toxicity in invasive tree tobacco (*Nicotiana glauca* Graham, Solanaceae). *South African Journal of Botany*, 186, 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.09.024>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/doi:10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, L., Guo, H., Wang, L., & Cheng, D. (2022). Suitable Tillage Depth Promotes Maize Yields by Changing Soil Physical and Chemical Properties in A 3-Year Experiment in the North China Plain. *Sustainability (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142215134>
- Wang, L., Yu, X., Gao, J., Ma, D., He, T., & Hu, S. (2024a). Effect of Subsoiling on the Nutritional Quality of Grains of Maize Hybrids of Different Eras. *Plants*, 13(14), 1900. <https://doi.org/10.3390/plants13141900>
- Wang, X., Geng, L., Zhou, H., Huang, Y., & Ji, J. (2023a). Effects of Subsoiling with Different Wing Mounting Heights on Soil Water Infiltration Using HYDRUS-

- 2D Simulations. *Agronomy*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/agronomy13112742>
- Wang, S., Liu, Z., Obalum, S. E., Liang, C., Han, K., & Han, H. (2023b). Effects of Subsoiling Depth on Soil Aggregate Stability and Carbon Storage in a Clay-Loam Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(3), 3302–3312. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01246-y>
- Wang, X., Du, R., Geng, L., Zhou, H., & Ji, J. (2024b). Performance Evaluation of a Cicada-Inspired Subsoiling Tool Using DEM Simulations. *Biomimetics*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/biomimetics9010025>
- Wang, Y., Chen, Y., Rahman, S., & Froese, J. (2009). Tillage effects on soil penetration resistance and early crop growth for Red River clay. *Canadian Biosystems Engineering*, 51, 11.
- Wang, Y., Wang, C., Zhang, C., Liao, Q., Feng, Z., & Zou, X. (2024c). Variations in provenance and transport of terrestrial organic matter in the Changjiang River during the flood season. *Catena*, 242(May), 108083. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108083>
- Wang, Y., Wu, T., Huang, J., Tian, P., Zhang, H., & Yang, T. (2020). Soil hydraulic properties of plinthosol in the Middle Yangtze River Basin, Southern China. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061783>
- Wei, X., Guo, X., Sparks, E. E., Gao, W., Ren, T., Li, B., & Zhou, H. (2025). Conservation tillage increases maize (*Zea mays* L.) root lodging resistance through improving brace root development. *Soil and Tillage Research*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106719>
- Wellens, J., Raes, D., Traore, F., Denis, A., Djaby, B., & Tychon, B. (2013). Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.012>
- WFP, & FAO. (2025). Hunger Hotspots. FAO–WFP early warnings on acute food insecurity. In *Hunger Hotspots*. WFP; FAO. <https://doi.org/10.4060/cd5684en>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Stackhouse, P. W., & Hoell, J. M. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), 1574–1584. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.017>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Stackhouse, P. W., & Hoel, J. M. (2011). Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agronomy Journal*, 103(4), 1242–1251. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0038>
- White, Joseph., Running, S. W., Nemani, R., Keane, R. E., & Ryan, K. C. (1997). Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain montane ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 27(11), 1714–1727. <https://doi.org/10.1139/cjfr-27-11-1714>

- Widdowson, M. (2009). Evolution of Laterite in Goa. In *Natural resources of Goa: a geological perspective* (Number January 2009). <http://oro.open.ac.uk/19793/>
- Wildemeersch, J. C. J., Garba, M., Sabiou, M., Sleutel, S., & Cornelis, W. (2015). The Effect of Water and Soil Conservation (WSC) on the Soil Chemical, Biological, and Physical Quality of a Plinthosol in Niger. *Land Degradation and Development*, 26(7), 773–783. <https://doi.org/10.1002/ldr.2416>
- Wilson, D. R., Muchow, R. C., & Murgatroyd, C. J. (1995). Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research*, 43(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00037-Q](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00037-Q)
- World Bank. (2018). *Democratic Republic of Congo Systematic Country Diagnostic: Policy Priorities for Poverty Reduction and Shared Prosperity in a Post-Conflict Country and Fragile State*. <https://hdl.handle.net/10986/30223>
- Woś, B., Likus-Cieślik, J., Pająk, M., & Pietrzykowski, M. (2024). How tree species have modified the potentially toxic elements distributed in the developed soil–plant system in a post-fire site in highly industrialized region. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12933-3>
- WRB, I. W. G. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS). https://eurasian-soil-portal.info/wp-content/uploads/2022/07/wrb_fourth_edition_2022-3.pdf
- WRB-IUSS. (2007). World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. In FAO (Ed.), *World Soil Resources Reports No. 103* (Vol. 103). http://books.google.com.br/books?id=1ORkZtTHYBsC&pg=PA134&lpg=PA134&dq=World+reference+base+for+soil+resources+2006:+A+framework+for+international+classification,+correlation+and+communication&source=bl&ots=5iLRf3CTsm&sig=EsUe9-jvtjai6loc_SKG5K9R3fU&hl=pt
- WRB-IUSS. (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In FAO (Ed.), *World Soil Resources Reports No. 106*. <http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- Wu, J., Wang, R., Zhao, W., Zhao, K., Wu, S., Zhang, J., Wang, H., Fu, G., Huang, M., & Li, Y. (2024). Combined subsoiling and ridge-furrow rainfall harvesting during the summer fallow season improves wheat yield, water and nutrient use efficiency, and quality and reduces soil nitrate-N residue in the dryland summer fallow-winter wheat rotation. *Frontiers in Plant Science*, 15(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401287>
- Wu, S. F., Wu, P. T., Feng, H., & Bu, C. F. (2010). Influence of amendments on soil structure and soil loss under simulated rainfall China's loess plateau. *African Journal of Biotechnology*, 9(37), 6116–6121. <https://doi.org/10.4314/ajb.v9i37>

- Wu, X., Tang, Y., Li, C., McHugh, A. D., Li, Z., & Wu, C. (2018). Individual and combined effects of soil waterlogging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China. *Field Crops Research*, *215*, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.016>
- Wu, Y., He, D., Wang, E., Liu, X., Huth, N. I., Zhao, Z., Gong, W., Yang, F., Wang, X., Yong, T., Liu, J., Liu, W., Du, J., Pu, T., Liu, C., Yu, L., van der Werf, W., & Yang, W. (2021). Modelling soybean and maize growth and grain yield in strip intercropping systems with different row configurations. *Field Crops Research*, *265*(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108122>
- Xie, G., Liang, M., Chen, P., Zhang, C., Fan, M., Wang, C., & Zhao, L. (2024). The Effects of Tillage and the Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Antioxidant Enzyme Activity and Yield of Maize Leaves. *Agronomy*, *14*(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy14050968>
- Xu, F. Q., Meng, L. L., Kuča, K., & Wu, Q. S. (2024). The mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi-alleviated manganese toxicity in plants: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, *213*(May). <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108808>
- Yang, P., Dong, W., Heinen, M., Qin, W., & Oenema, O. (2022). Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. *Land*, *11*(5). <https://doi.org/10.3390/land11050645>
- Yang, X., Li, Z., Cui, S., Cao, Q., Deng, J., Lai, X., & Shen, Y. (2020). Cropping system productivity and evapotranspiration in the semiarid Loess Plateau of China under future temperature and precipitation changes: An APSIM-based analysis of rotational vs. continuous systems. *Agricultural Water Management*, *229*(July 2019), 105959. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105959>
- Yang, Y., Liu, H., Wu, J., Gao, C., Zhang, S., & Tang, D. W. S. (2024). Long-term combined subsoiling and straw mulching conserves water and improves agricultural soil properties. *Land Degradation and Development*, *35*(3), 1050–1060. <https://doi.org/10.1002/ldr.4969>
- Yang, Z., Huang, X., Qing, Y., Li, H., Hong, L., & Lu, W. (2023). Estimation of Time-Series Forest Leaf Area Index (LAI) Based on Sentinel-2 and MODIS. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(15). <https://doi.org/10.3390/app13158777>
- Yaro, D. T., Kparmwang, T., Raji, B. A., & Chude, V. O. (2006). The Extent and Properties of Plinthite in a Landscape at Zaria, Nigeria. *International Journal of Soil Science*, *1*, 171–183. <https://docsdrive.com/pdfs/academicjournals/ijss/2006/171-183.pdf>
- Yaro, D. T., Kparmwang, T., Raji, B. A., & Chude, V. O. (2008). Extractable micronutrients status of soils in a plinthitic landscape at Zaria, Nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *39*(15–16), 2484–2499. <https://doi.org/10.1080/00103620802292913>

- Yin, Y., Impellitteri, C. A., You, S.-J., Allen U, H. E., & Allen, H. (2002). The importance of organic matter distribution and extract soil:solution ratio on the desorption of heavy metals from soils. In *The Science of the Total Environment* (Vol. 287).
- Yoboue, K. E., Kouakou, C. H., Akotto, O. F., & Yao-Kouame, A. (2019). Etude des variations des teneurs de quelques oxydes de deux types de sols à plinthis observés à Yébouékro (Djékanou) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *13*(2), 1180. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i2.46>
- Yruela, I. (2009). Copper in plants: Acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, *36*(5), 409–430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>
- Zhang, Y., Ju, S., Wang, W., Wu, F., & Pan, K. (2024). Effects of decomposed and undecomposed straw of three crops on clubroot disease of Chinese cabbage and soil nutrients. *Scientific Reports*, *14*(1), 22990. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72899-7>
- Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2019). Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. *Journal of Hydrology*, *575*, 1011–1030. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.058>
- Zhao, J., & Yang, X. (2019). Spatial patterns of yield-based cropping suitability and its driving factors in the three main maize-growing regions in China. *International Journal of Biometeorology*, *63*(12), 1659–1668. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01783-1>
- Zhao, L., Fang, Q., Algeo, T. J., Lu, A., Yin, K., Duan, Z., & Hong, H. (2021). Formation of plinthis mediated by redox fluctuations and chemical weathering intensity in a Quaternary red soil, southern China. *Geoderma*, *386*(August 2020), 114924. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114924>
- Zhao, Z., Li, Z., Li, Y., Yu, L., Gu, X., & Cai, H. (2025). Optimization of water and nitrogen measures for maize-soybean intercropping under climate change conditions based on the APSIM model in the Guanzhong plain, China. *Agricultural Systems*, *224*(December 2024), 104236. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104236>
- Zhou, P., Wang, S., Guo, L., Shen, Y., Han, H., Ning, T., & Paper, O. (2019). Effects of subsoiling stage on summer maize water use efficiency and yield in North China plains. *Plant, Soil and Environment*, *65*(11), 556–562. <https://doi.org/10.17221/353/2019-PSE>
- Zingore, S., Murwira, H. K., Delve, R. J., & Giller, K. E. (2007). Influence of nutrient management strategies on variability of soil fertility, crop yields and nutrient balances on smallholder farms in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *119*(1–2), 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.019>

Liste des publications entre 2021 et 2026

- Mukalay, J. B.**, Meersmans, J., Wellens, J., Sikuzani, Y. U., Mukonzo, E. K. L., & Colinet, G. (2026). Soil fertility and maize response to subsoil deep tillage and termite mound amendments in strongly weathered plinthic soils. *Geoderma Regional*, 44, e01066. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01066>
- Mukalay, J. B.**, Meersmans, J., Wellens, J., Useni Sikuzani, Y., Mukonzo, E. K. L., & Colinet, G. (2026). Restoring Functional Soil Depth in Plinthosols: Effects of Subsoiling and Termite Mound Amendments on Maize Yield. *Environments*, 13(1), 52. <https://doi.org/10.3390/environments13010052>
- Mukalay, J. B.**, Wellens, J., Meersmans, J., Sikuzani, Y. U., Lenge Mukonzo, E. K., & Colinet, G. (2025). Simulation of the Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.) on a Loosened Plinthosol Amended with Termite Mound Material in the Lubumbashi Region. *Agriculture (Switzerland)*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/agriculture15212272>
- Nkongolo, K., **Mukalay, J. B.**, Lubobo, A. K., & Michael, P. (2025). Critical examination of soil metals distribution in the Copper Belt City of Lubumbashi (D.R. Congo): analysis of soil eukaryotic communities. *Chemistry and Ecology*, 41(7), 912–935. <https://doi.org/10.1080/02757540.2025.2514488>
- Nkongolo, K., **Mukalay, J. B.**, Lubobo, A. K., & Michael, P. (2025). Soil Microbial Responses to Varying Environmental Conditions in a Copper Belt Region of Africa: Phytoremediation Perspectives. *Microorganisms*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010031>
- Kukupula Pezo, D., **Banza Mukalay, J.**, Nyembo Kimuni, L., Mukobo Mundende, R. P., & Kasongo Lenge Mukonzo, E. (2023). Evaluation of maize grain yield and economic profitability under different soil fertility management systems of an Arenosol in Democratic Republic of Congo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17(2), 574–582. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v17i2.23>
- Michel, M. K., **John, B. M.**, Francis, K. M., Magnifique, C. M., Emery, K. L. M., & Louis, B. L. (2021). Impact of Organic Amendments and Mineral Fertilizers on the Growth of Vitroplants of the Great Dwarf Cultivar of Banana (*Musa* sp) Installed on a Ferralsol. *Journal of Experimental Agriculture International*, 10–19. <https://doi.org/10.9734/jeai/2021/v43i1030742>
- Bwandamuka, F. M. K., **Mukalay, J. B.**, Ndandula, F. K., Masangu, F. K., Kasongo, M. M., Makanda, G. M., Fyama, J. N. M., & Mukonzo, E. K. L. (2021). Soil erosion risk assessment on some soils of the Lubumbashi plain, D.R. Congo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(5), 2095–2117. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i5.32>