

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline - Travail



Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la
Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ
JEAN LOROUGNON GUEDE

THÈSE DE DOCTORAT

ANNÉE UNIVERSITAIRE

2025-2026

N° D'ORDRE : 185

FORMATION DOCTORALE

AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT TROPICAL

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : AGRO-PÉDOLOGIE

THÈME :

Contribution à l'amélioration de la production durable du coton (*Gossypium hirsutum* L.) à l'aide de la fertilisation raisonnée du sol suivant le facteur $N-NH_4^+$: cas du bassin de production de Ouangolodougou (Côte d'Ivoire)

Prénoms : Koffi Djinkin Samuel

NOM : KOUASSI

JURY

Président : M. AYOLIE Koutoua, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé ;

Directeur : M. BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé ;

Rapporteur : M. KOUAKOU Kouakou Laurent, Professeur Titulaire, Université Nangui Abrogoua ;

Examineur 1 : M. ETTIEN Djetchi Jean-Baptiste, Professeur Titulaire, Université Felix Houphouët-Boigny ;

Examineur 2 : M. KOUASSI N'Dri Jacob, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon Guédé.

Soutenue le 07/Mars/2026

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	i
DEDICACE.....	vi
REMERCIEMENTS	vii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES.....	6
1.1. COTONNIER.....	7
1.1.1. Origine et répartition géographique	7
1.1.2. Systématique	7
1.1.3. Caractères morphologiques	8
1.1.4. Ecologie.....	10
1.1.5. Cycle de développement	11
1.1.6. Besoins minéraux du cotonnier	12
1.1.7. Importance socio-économique	15
1.2. QUELQUES NOTIONS SUR LE SOL	16
1.2.1. Définition et description.....	16
1.2.2. Constituants du sol	18
1.2.2.1. Constituants solides.....	19
1.2.2.2. Phase liquide	21
1.2.2.3. Constituants gazeux.....	21
1.2.3. Propriétés des sols	22
1.2.3.1. Propriétés physiques.....	22
1.2.3.2. Propriétés biologiques	24

1.2.3.3. Propriétés chimiques	25
1.2.4. Dégradation des sols.....	27
1.2.4.1. Dégradation physique des sols	27
1.2.4.2. Dégradation chimique des sols.....	28
1.2.4.3. Dégradation biologique des sols	28
1.2.5. Restauration des sols dégradés	28
1.2.6. Principales classes de sols en Côte d’Ivoire	29
1.2.6.1. ferralsols	29
1.2.6.2. Acrisols.....	30
1.2.6.3. Sols peu évolués	31
1.2.6.4. Sols à minéraux bruts	31
1.2.6.5. Sols hydromorphes	31
1.2.6.5.1. Sols hydromorphes d’apport colluvial	32
1.2.6.5.2. Sols hydromorphes d’apport illuvial	32
1.2.6.6. Vertisols	33
1.2.6.7. Sols bruns tropicaux	34
1.3. NOTIONS DE FERTILITE DES SOLS	35
1.3.1.1. Fertilité biologique	35
1.3.1.2. Fertilité physique.....	35
1.3.1.3. Fertilité chimique	36
1.3.2. Déterminants de la fertilité du sol	37
1.3.2.1. Matière organique.....	38
1.3.2.2. Eléments minéraux.....	38
1.3.2.3. Structure et texture du sol.....	41
1.3.2.4. Acidité du sol	41
1.3.2.5. Capacité d’échange cationique.....	42

1.3.3. Changement climatique et fertilité du sol.....	42
1.3.4. Technique culturale et fertilité du sol.....	43
1.3.5. Pression foncière et fertilité du sol.....	44
1.4. NOTION DE FERTILISATION RAISONNÉE DES SOLS.....	44
1.5. NOTION D'AGRICULTURE DURABLE	46
1.6. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MILIEU D'ÉTUDE	47
1.6.1. Localisation géographique	47
1.6.2. Climat.....	48
1.6.3. Végétation	49
1.6.4. Sol et relief.....	49
1.6.5. Activités socio-économiques.....	50
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES.....	51
2.1. MATERIEL.....	52
2.1.1. Matériel édaphique.....	52
2.1.2 Matériel végétal.....	53
2.1.3. Matériel technique de terrain.....	54
2.1.4. Matériel de laboratoire	55
2.1.5. Intrants chimiques	56
2.1.6. Matériel de traitement statistique des données.....	56
2.2. METHODES	56
2.2.1. Caractérisation morphopédologique et chimique des sols sous cotonnier.....	56
2.2.1.1. Caractérisation morphopédologique des sols sous cotonnier.....	56
2.2.1.1.1. Choix des parcelles.....	56
2.2.1.1.2. Ouverture des fosses.....	58
2.2.1.1.3. Description morphologique des sols	58
2.2.1.1.3.1. Détermination de la profondeur utile du sol et caractéristiques associées	59

2.2.1.1.3.2. Détermination de la couleur des horizons	60
2.2.1.1.3.3. Détermination de l'humidité du sol.....	60
2.2.1.1.3.4. Estimation de la texture des horizons du sol	60
2.2.1.1.3.5. Détermination de la structure des horizons du sol	61
2.2.1.2. Caractérisation chimique des sols sous cotonnier	61
2.2.1.2.1. Prélèvement des échantillons de sol.....	61
2.2.1.2.2. Préparation des échantillons de sol en vue des analyses chimiques au laboratoire .	62
2.2.1.2.3. Détermination des caractéristiques chimiques des sols au laboratoire.....	62
2.2.2. Détermination des doses d'engrais adaptées aux sols sous cotonnier par la technique N-NH ₄ ⁺	64
2.2.3. Evaluation des effets de la fertilisation raisonnée sur les paramètres agronomiques du cotonnier.....	66
2.2.3.1. Conduite des essais agronomiques.....	66
2.2.3.2. Préparation du sol.....	67
2.2.3.3. Semis	67
2.2.3.4. Application des doses d'engrais	67
2.2.3.5. Traitements insecticides	68
2.2.3.6. Détermination des effets de la fertilisation du sol sur les paramètres agronomiques du cotonnier.....	68
2.2.4. Analyse statistique des données	69
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	71
3.1. RESULTATS	72
3.1.1. Caractérisation morphopédologique et chimique des sols sous cotonnier	72
3.1.1.1. Caractéristiques morphopédologiques et environnement des sols étudiés.....	72
3.1.1.2. Caractéristiques chimiques des sols en première année d'expérimentation.....	80
3.1.1.2.1. Acidité, statut organique et phosphore assimilable	80
3.1.1.2.1.1. Acidité	81

3.1.1.2.1.2. Carbone et matière organiques	81
3.1.1.2.1.3. Azote total	81
3.1.1.2.1.4. Ratio C/N.....	82
3.1.1.2.1.5. Phosphore assimilable	82
3.1.1.2.1.6. Bases échangeables et statut N-NH ₄ ⁺ des sols	84
3.1.2. Détermination des doses d’engrais adaptées aux sols sous cotonnier par la technique N-NH ₄ ⁺	89
3.1.2.1. Relation entre la somme des bases échangeables et l’azote minéralisable	89
3.1.2.2. Equilibres chimiques dans les sols	90
3.1.2.3. Type de fertilisations adoptées pour les sols des 10 sections retenues	91
3.1.3. Evaluation des effets de la fertilisation raisonnée sur les paramètres agronomiques du cotonnier.....	92
3.1.3.1. Effets de la fertilisation du sol sur le cotonnier à la première année d’expérimentation (2018 à 2019)	92
3.1.3.1.1. Effet sur la hauteur	92
3.1.3.1.2. Effet sur le nombre de branches végétatives et fructifères.....	94
3.1.3.1.3. Effet sur les nombres d’entre-nœuds et de capsules.....	94
3.1.3.1.4. Effet sur le rendement du cotonnier	97
3.1.3.1.5. Effets spécifiques des traitements tests sur le rendement.....	99
3.1.3.2. Somme des bases échangeables, facteur N-NH ₄ ⁺ et rendements obtenus lors des ...	100
3.2. DISCUSSION	105
3.2.1. Caractéristiques morphologiques et qualité des sols étudiés	105
3.2.2. Caractéristiques chimiques et qualité des sols étudiés	106
3.2.3. Pertinence et effet de la fertilisation appliquée	108
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	113
REFERENCES.....	116

DEDICACE

Je dédie cette thèse à mes géniteurs.

Même s'ils ne sont plus de ce monde, qu'ils sachent que je défendrai toujours les valeurs qu'ils m'ont inculquées !

Que leurs âmes reposent en paix.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse de doctorat à l'Université Jean Lorougnon Guédé a été une expérience profondément enrichissante, tant sur le plan académique et professionnel que sur le plan humain. Elle a bénéficié de l'apport précieux de nombreuses personnes. Il m'est donc impossible de soumettre ce travail à l'appréciation du jury sans exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes celles et ceux qui m'ont soutenu. Les remerciements qui suivent viennent du fond de mon cœur.

Je tiens, tout d'abord, à adresser mes sincères remerciements à Mme ADOHI KROU Viviane, Professeur Titulaire en Physique et Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), pour ses efforts constants et son engagement quotidien, en faveur du bon fonctionnement de l'institution, qui ont permis la soutenance de cette thèse.

Je remercie également M. SORO Dogniméton, Professeur Titulaire en Agro-pédologie, Vice-Président chargé de la Pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique de l'Université Jean Lorougnon Guédé et M. KONÉ Issiaka, Professeur Titulaire en Socio-anthropologie, Vice-Président chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour leurs conseils avérés et leur disponibilité à répondre aux préoccupations impliquant la formation des étudiants de l'UJLoG.

Je tiens aussi à remercier Mme TONESSIA Dolou Charlotte, Professeur Titulaire en Phytopathologie, ex-directrice de l'UFR Agroforesterie qui m'a initié à la recherche en assurant la direction scientifique et l'encadrement de mes travaux de Master.

Je tiens, à exprimer ma gratitude à M. KOUASSI Clément, Maître de Conférences en Microbiologie et Sécurité Alimentaire, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Agroforesterie, pour mon accueil au sein de son UFR.

Je ne saurais assez remercier M. BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire en Agro-pédologie, pour la confiance qu'il m'a témoignée en me confiant la réalisation des travaux de recherche. En qualité de directeur scientifique de ce travail, sa maîtrise de la pédologie, sa bienveillance, sa grande générosité et sa disponibilité ont été déterminantes pour mener ce projet à son terme.

Mes vifs remerciements vont également à M. AYOLIÉ Koutoua, Professeur Titulaire en Physiologie Végétale et Directeur du Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole,

pour ses sages conseils et son soutien constant et aussi d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je ne saurais oublier les membres du jury qui ont contribué fortement à l'amélioration de ce travail. Il s'agit de :

- Monsieur KOUAKOU Kouakou Laurent, Professeur Titulaire en Biotechnologie végétale, Agro-physiologie à l'Université Nangui Abrogoua, rapporteur de cette thèse.
- Monsieur ETTIEN Djetchi Jean Baptiste, Professeur Titulaire en Agro-pédologie à l'Université Felix Houphouët Boigny, Examineur.
- Monsieur KOUASSI N'Dri Jacob, Professeur Titulaire en Phytotechnique à l'Université Jean Lorougnon Guédé, Examineur.

Je ne pourrai trouver les mots justes pour exprimer ma reconnaissance et mon profond respect à M. ZRO Bi Gohi Ferdinand, Professeur Titulaire en Pédologie pour son dynamisme, son efficacité et sa rigueur dans le travail dont j'ai bénéficié tout le long de la rédaction de ce mémoire, malgré ses multiples occupations.

Je suis reconnaissant envers Messieurs KONATÉ Zoumana, ABOBI Akré Hebert, et GUEI Arnauth Martinez, Docteurs, Maîtres de Conférence en Agro-pédologie et M. N'GANZOUA Kouamé René, Maître-Assistant en Agro-pédologie, ainsi que toute l'équipe du département d'Agro-pédologie de l'UJLoG, pour leurs observations utiles et leurs précieux conseils.

Mes remerciements s'adressent également à M. TOURE Bessimory, Docteur, Assistant en Agro-pédologie pour son aide pendant la phase de terrain de cette thèse.

Je tiens à dire un grand merci à mon grand frère, KOUAKOU Konan Jean-Paul, pour tous les sacrifices qu'il a consentis depuis ma classe de CP1 jusqu'à cette thèse.

Je ne saurais remercier mon père spirituel, KOUAME Yao Dieudonné Guedi Etruité, pour ses incessantes prières adressées à Dieu afin que je réussisse ce projet de thèse de doctorat.

Mes remerciements s'adressent également à KOUADIO Mankloua Aladema, Maman Ahizozi et tous ces Hommes de Dieu qui m'ont soutenu spirituellement, en intercédant pour moi auprès de Dieu afin que je trouve grâce à ses yeux.

Je saisis aussi cette occasion pour remercier l'ensemble des producteurs de coton ayant mis à ma disposition leurs parcelles ainsi que tous les conseillers agricoles de la Société d'Exploitation Cotonnière Olam (SECO) pour leurs disponibilités et leurs aides.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma famille, notamment mes frères et sœurs, pour leur soutiens moral et financier inestimable.

Que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette étude, et qui n'auraient pas été mentionnées ici, se sentent chaleureusement remerciées.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANOVA	: Analyse de la Variance
CEC	: Capacité d’Echange Cationique
COS	: Carbone organique du sol
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
GPS	: Global positioning system (Système de Positionnement Mondial)
INPHB	: Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny
INTERCOTON	: Organisation Interprofessionnelle agricole de la filière Coton
ISO	: International Organization for Standardization (Organisation Internationale pour la Normalisation)
JAL	: Jour après levé
JAS	: Jour après semis
LAVESO	: Laboratoire d’Analyse des Végétaux et Des Sols
MOS	: Matière organique du sol
PIB	: Produit Intérieur Brut
SECO	: Société d’Exploitation Cotonnière Olam.
STIPA	: Système de Transfert de l’Information Pédologique et Agronomique
UFR	: Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé
WRB	: World Reference Base (Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : besoins en eau du cotonnier en fonction des différentes phases de développement 11

Tableau II : catégorisation de la qualité d'un sol en fonction de ses caractéristiques chimiques 39

Tableau III : performormances agronomiques de la variété Gouassou F1 53

Tableau IV : énumération des méthodes d'analyses des propriétés chimiques des sols 64

Tableau V : doses des fertilisants 66

Tableau VI: application des doses d'engrais 67

Tableau VII : acidité, statut organique et phosphore assimilable des sols étudiés..... 83

Tableau VIII : teneurs en N-NH₄⁺ et bases échangeables des sols étudiés 87

Tableau IX : CEC, taux de saturation en bases échangeables (V), somme des bases échangeables (SBE) des sols étudiés..... 88

Tableau X : équilibres chimiques dans les sols des 10 sections retenues 91

Tableau XI : fertilisants apportés aux sols des 10 sections retenues en fonction des carences 92

Tableau XII : hauteur du cotonnier en fonction des traitements 94

Tableau XIII : nombres de branches végétatives et fructifères du cotonnier en fonction des traitements 95

Tableau XIV : nombres d'entre-nœuds et de capsules en fonction des traitements..... 96

Tableau XV : rendements du cotonnier en fonction des traitements 97

Tableau XVI : somme des bases échangeables et taux de N-NH₄⁺ 101

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : architecture d'un cotonnier	10
Figure 2 : profil de sol	18
Figure 3 : évolution du kilogramme d'engrais azoté sous culture de riz suivant les valeurs de N-NH ₄ ⁺	41
Figure 4 : carte de localisation géographique du département de Ouangolodougou	48
Figure 5 : quelques échantillons de sols prélevés à Nambigué	52
Figure 6 : semence de coton de la variété Gouassou F1	53
Figure 7 : quelques matériels de terrain utilisés	54
Figure 8 : quelques équipements de laboratoire utilisés.....	55
Figure 9 : localisation des parcelles choisies.....	58
Figure 10 : dispositif de prélèvement des échantillons de sol sur une parcelle.....	62
Figure 11 : pratique de fertilisation du sol recommandée selon la relation SBE-(N-NH ₄ ⁺)	65
Figure 12 : dispositif de mesure des paramètres agronomiques.....	69
Figure 13 : profil de Barrovogo.....	73
Figure 14: profil de Gnanmandô	74
Figure 15: profil de Ladjivogo	74
Figure 16: profil de Koussanga	75
Figure 17: profil de Pleuhouo.....	75
Figure 18: profil de Ouangolodougou.....	76
Figure 19: profil de Benifesso	77
Figure 20: profil de Dabavogo	78
Figure 21: profil de Nambigué	78
Figure 22: profil de Soumailavogo.....	79
Figure 23: profil de Torla	79
Figure 24: profil de Nioronigué	80

Figure 25 : évolution des SBE des sols en fonction de leurs taux de $N-NH_4^+$ pour la première année d'expérimentation	89
Figure 26 : vues de parcelles témoin et test de la section de Torla	98
Figure 27 : relation entre les traitements tests et le rendement du coton	99
Figure 28 : évolution du taux de $N-NH_4^+$ et les SBE des trois dernières années d'expérimentation.....	102
Figure 29 : évolution des SBE des sols en fonction de leurs taux de $N-NH_4^+$ pour le deuxième, troisième et quatrième année d'expérimentation	103
Figure 30 : évolution des rendements de coton en fonction des années obtenus au cours des deuxième, troisième et quatrième année d'expérimentation	104



INTRODUCTION

Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU) la population mondiale, estimée à 8,16 milliards d'habitants en 2024, continue de croître et pourrait atteindre 9,7 milliards en 2050, avec un taux d'accroissement plus élevé dans les pays en développement. Nourrir cette population en pleine expansion constitue donc un enjeu majeur (ONU, 2024). En 2015, plus de 900 millions de personnes souffraient déjà de sous-alimentation, dont 80 % étaient des petits agriculteurs (Fall & Jacquemot, 2023). Les causes principales de cette sous-alimentation sont les conflits, les catastrophes naturelles, la sécheresse, les pratiques agricoles inadéquates, la pauvreté et la hausse des prix des intrants. L'accroissement démographique entraîne une pression foncière sur les sols cultivables, le surpâturage, l'agriculture intensive, ce qui a pour conséquence la dégradation des terres cultivées.

Par ailleurs, les sols subissent depuis plusieurs décennies une dégradation accélérée. Selon un rapport des Nations Unies cité par Nyembo *et al.* (2012), plus de 50 % des sols agricoles en Afrique, notamment en Afrique de l'Ouest, sont dégradés. Ces sols sont souvent encroutés, compactés ou trop perméables, ce qui les rend peu adaptés à l'agriculture. De plus, les éléments nutritifs sont exportés lors des récoltes sans retour au sol, accentuant leur appauvrissement (Mulaji, 2011). Ces dégradations physiques et chimiques des sols plongent l'Afrique dans une insécurité alimentaire grandissante alors que la majorité de sa population dépend de l'agriculture et des activités associées (Grandjean & De Cannière, 2015). L'agriculture constitue la principale source de revenus et génératrice d'emplois pour les populations africaines (Edbo, 2021). Les efforts sont souvent compromis par la baisse de la fertilité des sols cultivables (Sanchez, 2002).

Sous l'effet conjugué de la croissance démographique et des activités des orpailleurs clandestins, les terres agricoles subissent une pression croissante qui accélère leur appauvrissement et provoque une baisse significative des rendements des cultures (Boris, 2017). Cette dégradation est aggravée par l'orientation de l'agriculture ivoirienne vers les cultures de rente telles que le cacao, le café, le palmier à huile, l'hévéa, le coton, l'anacarde et la mangue dont le succès économique, depuis l'indépendance, et les importantes devises qu'elles génèrent ont favorisé leur expansion au détriment des cultures vivrières et maraîchères, désormais reléguées au second plan (Bikié *et al.*, 2000 ; Sanchez, 2002). Dans ce contexte, les sols les plus fertiles sont, chaque année, consacrés prioritairement à ces cultures d'exportation, dans un système agricole marqué par la quasi-disparition de la jachère, la faible utilisation des fertilisants et la sous-valorisation des résidus agro-industriels à des fins agricoles (Saïdou *et al.*, 2008). Face à l'épuisement progressif de la fertilité des sols, la préservation et la gestion durable

de la fertilité des sols apparaissent aujourd'hui comme un enjeu national majeur pour un pays à forte vocation agricole tel que la Côte d'Ivoire (Fatondji *et al.*, 2009). En effet, la fertilité des terres agricoles constitue le principal facteur biophysique qui influence la production agricole (Argueta *et al.*, 2022). Elle joue un rôle essentiel dans la production des cultures de rente telles que le cacaoyer, le caféier, l'anacardier et le cotonnier (Touoyem, 2022).

Parmi ces cultures de rente, on note que le cotonnier quatrième culture de rente du pays, occupe une place majeure dans le secteur agricole ainsi que dans le développement socio-économique des populations rurales des régions du nord (Stessens, 2002 ; Paul-Kévin & Olivier, 2021). Cette culture assure, directement ou indirectement, les moyens de subsistance d'environ 3,5 millions de personnes (Edmond, 2015). Elle génère environ 7% des recettes d'exportation nationales et contribue à hauteur de 1,7% au PIB du pays (Koffi, 2013). La production annuelle est estimée à environ 120 milliards de francs CFA, plaçant la Côte d'Ivoire parmi les principaux producteurs de coton de la sous-région ouest-africaine (Berti *et al.*, 2006).

Cependant, la filière cotonnière fait face à de nombreux défis : la chute des prix, la désorganisation du mouvement coopératif, une pluviométrie de plus en plus irrégulière, une pression parasitaire accrue, mais surtout une dégradation constante de la fertilité des sols (Roupsard, 2000 ; Fok, 2007 ; Faye, 2019). Ce dernier facteur a contribué, ces dernières années, à une stagnation, voire une baisse des rendements, malgré l'usage plus important d'engrais minéraux (Badiane *et al.*, 2015 ; Hien, 2016). Il est donc important de restaurer la fertilité des sols sous cotonnier afin d'assurer la pérennité de cette production en Côte d'Ivoire. Pour relever ce défi, plusieurs solutions sont envisagées, telles que l'adoption de nouvelles techniques culturales, l'apport d'amendements minéraux ou organiques, la rotation des cultures, ou encore la pratique de la jachère (Dugue & Rawski, 2024).

Dans les zones cotonnières de la Côte d'Ivoire, les effets conjugués des changements climatiques et de la croissance démographique accentuent la pression foncière sur les terres cultivables, réduisant considérablement les superficies disponibles pour la jachère, autrefois essentielle à la restauration naturelle de la fertilité des sols (Zagbaï *et al.*, 2006 ; Akédrin *et al.*, 2010 ; Coulibaly *et al.*, 2012). Face à cette situation, l'amélioration durable de la productivité cotonnière ne peut plus reposer sur les pratiques traditionnelles, mais repose, sur l'optimisation de la fertilisation organique et chimique des sols, à travers l'adoption de techniques de fertilisation plus adaptées (Emmanuel *et al.*, 2018).

La fertilité organique est, en effet, essentielle à la pérennité des écosystèmes agricoles et à la santé des cultures (Piutti *et al.*, 2015 ; Denis, 2024). Les matières organiques telles que le compost, le fumier ou les résidus végétaux apportés au sol lui fournissent progressivement des éléments nutritifs indispensables comme l'azote, le phosphore, le potassium et le soufre (Huber & Schaub, 2011 ; Badji, 2020). En effet, la décomposition de la matière organique sous l'action de la microflore du sol libère progressivement les éléments nutritifs, rendant ceux-ci assimilables par les plantes pour assurer leur croissance optimale (Huber & Schaub, 2011). Par ailleurs, la matière organique améliore la structure du sol en favorisant l'agrégation des particules, ce qui accroît sa stabilité, son aération, l'infiltration de l'eau et sa résistance à l'érosion, rendant ainsi le sol plus résilient face aux aléas climatiques (Annabi, 2005).

Quant à la fertilisation minérale, elle permet de mettre rapidement à disposition des plantes des nutriments directement assimilables. De ce fait, elle représente une source privilégiée pour garantir la production à court, moyen et long terme (Schöl, 1998). Toutefois, un apport continu et non maîtrisé peut dégrader les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Akanbi *et al.*, 2014 ; Crusciol *et al.*, 2016). Cette dégradation a été particulièrement observée dans les sols sous cotonnier, comme l'a souligné Blanchard (2010).

Ainsi, les formulations minérales telles que le NPK (14-18-18-6S-1B) qui a été développé et promu dans les zones cotonnières depuis 1980 dont celles de la Côte d'Ivoire (Anselme, 2016) et qui n'a presque pas été adapté aux conditions édaphiques changeantes, auraient contribué à acidifier les sols du fait de l'absence de calcium et de magnésium, éléments essentiels à l'amélioration de la réaction du sol (Hien, 2016 ; Emmanuel *et al.*, 2018). C'est en cela que le concept de la "fertilisation raisonnée" trouve tout son sens.

La fertilisation raisonnée est, en effet, un élément clé pour une production végétale durable. Elle consiste à apporter aux cultures la juste quantité d'engrais minéraux répondant à leurs besoins réels à l'effet de concilier productivité, respect de l'environnement et gestion durable des sols (Schvartz *et al.*, 2005). La présente recherche promeut cette approche. Elle vise en général à actualiser les formulations des engrais minéraux en cotonculture dans l'optique de limiter les pertes dans l'environnement et maximiser la rentabilité agricole. Pour ce faire, trois objectifs spécifiques ont été définis. Ces objectifs consistent à :

- 1) déterminer les caractéristiques morphopédologiques et chimiques des sols sous cotonniers ;
- 2) déterminer les doses d'engrais adaptées à ces sols par la technique N-NH₄⁺ ;

- 3) évaluer les effets de la fertilisation raisonnée sur les paramètres agronomiques du cotonnier.

L'étude repose sur trois hypothèses formulées comme suit :

- 1) les propriétés morphopédologiques sont favorables à la productivité du cotonnier ;
- 2) les doses d'engrais minéraux apportés aux sols sous cotonnier conviennent à la production optimale du coton ;
- 3) la fertilisation raisonnée accroît le rendement du cotonnier.

Cette thèse qui rend compte du travail réalisé est subdivisée en trois grandes parties. La première partie présente les généralités concernant le cotonnier, le sol, la fertilité et la fertilisation raisonnée, l'agriculture durable ainsi que le cadre de l'étude. La deuxième partie de la thèse décrit, dans un premier paragraphe, le matériel utilisé et dans un second, les méthodes employées pour collecter et analyser les données. Les résultats obtenus sont analysés et discutés dans la troisième partie de la thèse. Une conclusion assortie de perspectives, ainsi qu'une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.



**PREMIERE PARTIE :
GENERALITES**

1.1. COTONNIER

La cotonculture est l'une des principales cultures d'exportation en Afrique subsaharienne et la quatrième principale culture de rente en Côte d'Ivoire. Cependant, son développement requiert des conditions naturelles et anthropiques particulières. C'est pourquoi, le premier volet des généralités qui porte sur le cotonnier est destiné à donner des indications sur son origine, sa systématique tout en décrivant sa morphologie, son exigence écologique et son cycle de développement. Il définit aussi l'importance socio-économique et les besoins minéraux du cotonnier.

1.1.1. Origine et répartition géographique

Le Cotton, *Gossypium* spp, est cultivé dans de nombreuses régions du monde depuis des milliers d'années. C'est un arbuste originaire d'Inde. Il a été répandu sous les tropiques (Amérique du Sud et Centre, Afrique, Inde, Pakistan et Asie du Sud-Est), également dans les régions désertiques (Moyen-Orient, Asie centrale) où la culture peut être irriguée et dans les zones tempérées (États-Unis, Chine, Europe) (Cirad-Gret, 2002). La première récolte du coton remonte au XVII^{ème} siècle, période marquant l'introduction de l'espèce *Gossypium barbadense* Linné 1753 en Afrique (Hau, 1988).

1.1.2. Systématique

Le cotonnier appartient à la famille des Malvaceae et au genre *Gossypium*. Il comprend environ quarante espèces diploïdes ($2n = 2x = 26$) et six espèces tétraploïdes ($2n = 4x = 52$) (Cirad gret, 2002). Seules quatre espèces ont été domestiquées et cultivées pour leurs fibres (Parry, 1982). Les espèces diploïdes *G. herbaceum* et *G. arboreum*, communément appelées "cotonniers de l'ancien monde", produisent le coton à fibres épaisses et courtes dit "indien" et utilisées de manière artisanale (Masset, 2008). Les espèces tétraploïdes *G. barbadense* et *G. hirsutum* appelées "cotonniers du nouveau monde" assurent 90 % de la production mondiale dans le cas de *G. hirsutum* et un peu plus de 5 % de la production pour *G. barbadense*. Leurs fibres sont de qualité supérieure. Ces deux espèces fournissent près de 95 % de la production mondiale actuelle (Lançon, 1995).

La position systématique du cotonnier est la suivante (Parry, 1982) :

Règne	:	Végétal
Classe	:	Magnoliopsidae
Ordre	:	Malvales
Famille	:	Malvaceae
Genre	:	<i>Gossypium</i>
Espèces	:	<i>G. hirsutum</i>

1.1.3. Caractères morphologiques

Le cotonnier est une plante arbustive pérenne mais il est exploité sous forme de plante annuelle (Figure 1). L'espèce sauvage (*Gossypium arboreum*) se présente sous la forme d'un arbuste pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur ; en revanche, le développement des variétés cultivées est plus limité (Joseph, 2005). La taille moyenne variant entre 1 et 1,5 m. La partie souterraine du cotonnier comprend une racine pivotante pourvue de nombreuses ramifications latérales. Ces ramifications réalisent la fixation de la plante au sol et assurent la plus grande partie de son alimentation (Armel, 2008). La partie aérienne comprend :

- une tige principale érigée, à croissance terminale et continue (monopode) servant de support au reste de la plante. De cette tige, partent des rameaux de deux natures : les branches fructifères (BF) et les branches végétatives (BV).
- les branches végétatives se développant à partir des nœuds de base du plant situés au-dessus du nœud cotylédonaire. Ces branches en nombre variable suivant les variétés et les cultivars sont parfois absentes (Parry, 1982). Elles présentent une croissance continue comme l'axe principal avec des ramifications secondaires qui peuvent développer des fruits. A la différence des branches fructifères, les branches végétatives ne portent pas directement les fruits mais donnent lieu à des ramifications secondaires qui peuvent produire des fruits (Boquet & Moser, 2003 ; Davidonis *et al.*, 2004). Leur développement est initié avant l'apparition des branches fructifères en général, mais elles peuvent encore réapparaître plus haut sur le plant en cas de défaillance de croissance (disparition du méristème de la tige principale du fait de

piqûre d'insectes) ou en cas de reprise de croissance après la fin d'un cycle (émergence d'une branche végétative à l'aisselle d'une branche fructifère).

- les branches fructifères ou rameaux sympodiaux : elles se développent à partir de tous les nœuds du tronc principal situés au-dessus des branches végétatives. Chez la plupart des variétés de *G. hirsutum*, elles apparaissent vers les 5^{ème} et 8^{ème} nœuds à partir des cotylédons (Hearn & Constable, 1984), sur la tige principale, ou dès le premier nœud sur les branches végétatives. Elles présentent une croissance discontinue, qui commence par la formation d'un entre-nœud, suivi de la production d'une feuille et d'une fleur au niveau du méristème terminal. Par la suite, une structure identique (entre-nœud, feuille, fleur) se développe à partir du bouton axillaire de la feuille. De la sorte, plusieurs fleurs peuvent apparaître sur le même rameau fructifère. En raison de leur croissance sympodique, elles sont formées de segments successifs. Chaque segment de branche correspond à une période de croissance. Un bouton floral et une feuille se développent à l'extrémité du segment. L'allongement du segment suivant se réalise à partir d'un bourgeon situé en position latérale, qui détermine l'aspect en « zigzag » de la branche fructifère (Parry, 1982) (Figure 1). Le nombre et la longueur des branches fructifères peuvent être variables suivant les conditions d'environnement ou le génotype de la variété utilisée.

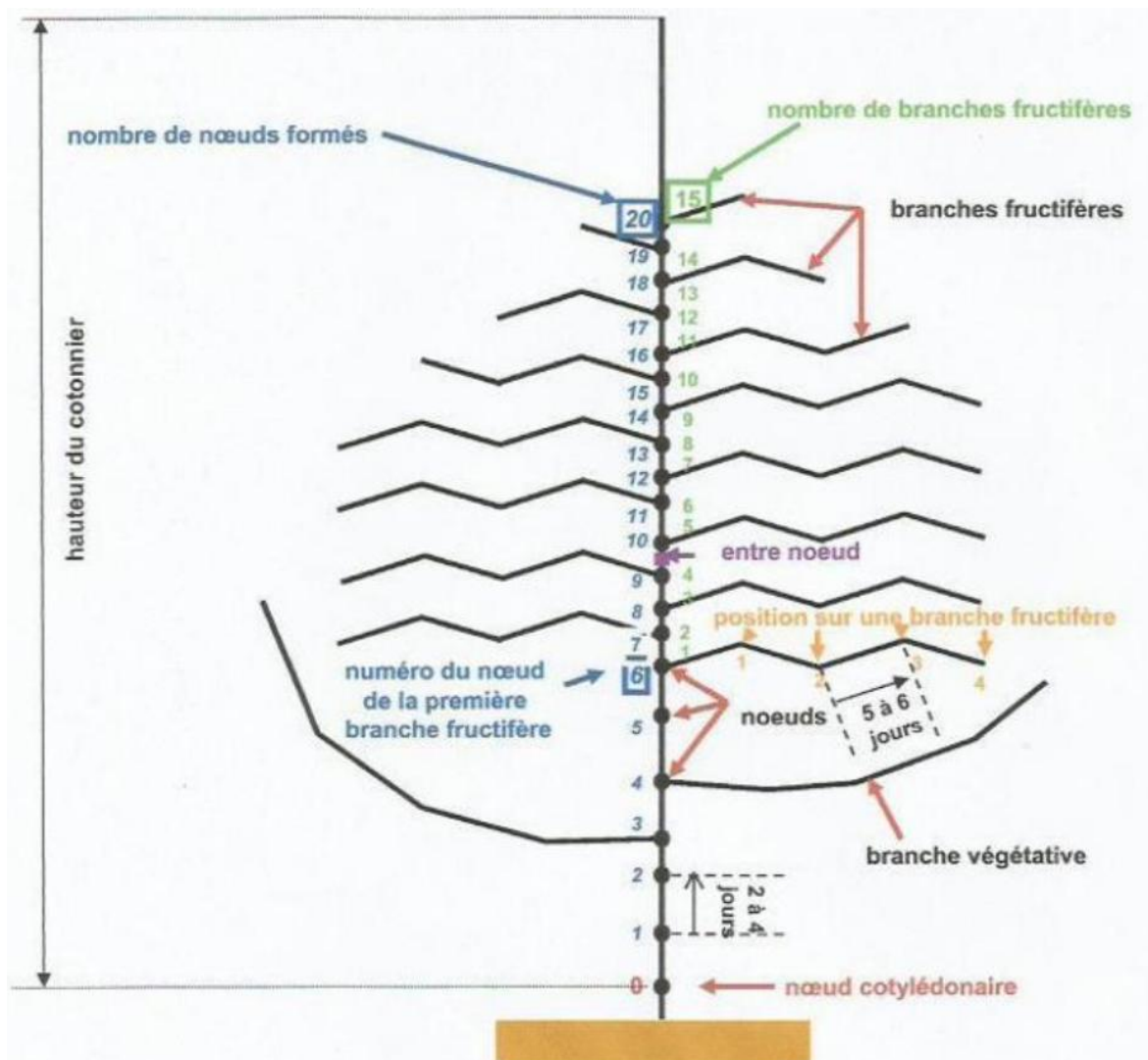


Figure 1 : architecture d'un cotonnier

Source : Renou (2007)

1.1.4. Ecologie

La culture du cotonnier nécessite tout d'abord un climat avec des conditions favorables à une bonne production telles que la température, l'ensoleillement et l'humidité du sol (Sankara, 2016). Une saison sèche marquée est indispensable à une bonne ouverture des capsules et à la récolte (FAO, 2014a). Le cotonnier est une plante héliophile qui exige beaucoup de lumière et de chaleur, en fonction des différentes phases de son cycle. Sa croissance est possible entre 14 et 38 °C, en dessous de 4°C le cotonnier dépérit (Traoré, 2008). Il se développe mieux dans les sols profonds, perméables et assez homogènes (Parry, 1982).

Les sols fertiles et bien drainés favorisent sa croissance. C'est pourquoi, les sols limono-argilo sableux ou limono sablo argileux sont les plus indiqués pour sa culture. Il tolère les sols

salins à concentration inférieure à 2 % (Sement, 1986). Il se développe mieux sur les sols dont le pH est compris entre 6 et 7. Les sols engorgés d'eau lui sont défavorables. Les besoins en eau de la plante durant le cycle végétatif sont compris entre 600 et 800 mm d'eau (Tableau I) et bien répartis sur le cycle cultural du semis à la récolte (Cirad-gret, 2002, Helvetas, 2008). Les phases les plus sensibles sont, dans l'ordre, le stade plantule (plants fragiles) et le stade de la floraison où tout stress hydrique peut provoquer des désordres physiologiques aboutissant à la chute des fleurs appelée "shedding".

Tableau I : besoins en eau du cotonnier en fonction des différentes phases de développement

	Phases du développement			
	De la levée au 1 ^{er} bouton floral	Du 1 ^{er} bouton à la 1 ^{ère} fleur	Maximum de la floraison	Fructification
Nombre de jours après semis	10 à 45	45 à 75	75 à 120	120 et +
Consommation d'eau en mm/jr	1 à 2,5	2,5 à 6	6 à 10	4 à 5,5

Source : Traoré (2008)

1.1.5. Cycle de développement

Le cotonnier est une plante vivace cultivée comme une culture annuelle. La fleur est hermaphrodite et le mode de reproduction est préférentiellement autogame avec des taux d'allogamie pouvant atteindre 30 % dans certaines localités en fonction de la densité des insectes pollinisateurs (Demol *et al.*, 1992). Le cycle de développement du cotonnier *G. hirsutum* L., du semis à la récolte, dure environ 180 jours (Vaissayre & Cauquil, 2000). On distingue trois stades de développement, dont les durées sont fonction des conditions climatiques (Ritchie *et al.*, 2007) :

- la levée survient environ quatre jours après le semis et est suivie de l'étalement des cotylédons qui dure environ 10 jours ;

- le stade végétatif correspond à la croissance de la plante, depuis l'apparition des premières feuilles jusqu'à l'ouverture de la première fleur (50 au 65^{ème} jour après le semis) ;
- le stade reproductif comprend la floraison, la formation et la maturation des capsules (45 à 130 jour après semis).

La floraison commence au premier nœud de la première branche fructifère et se poursuit en progressant sur la branche immédiatement supérieure, et d'un nœud à l'autre, le long des branches. Les fleurs fécondées donnent des capsules qui mettent trois à quatre semaines pour atteindre leur taille définitive ; puis deux à trois semaines pour dessécher et s'ouvrir, en laissant apparaître le coton-graine (Sement, 1986).

1.1.6. Besoins minéraux du cotonnier

Le cotonnier est très exigeant en nutriments qui jouent chacun un rôle spécifique dans sa physiologie et dans son développement. Ces nutriments sont :

- l'azote (N) : c'est l'élément essentiel, il augmente le volume de la floraison et améliore sa précocité (Benedict, 1984). Il contribue à élever le poids des graines, à allonger les fibres et à augmenter la teneur en protéines des graines. Lorsque les principales déficiences du sol sont corrigées, l'azote devient le facteur essentiel du rendement (Parry, 1982). Les besoins en azote varient suivant le stade de développement. Les besoins totaux en azote sont de 4 % de 0 à 20 jours, 13 % de 20 à 50 jours, 43 % de 50 à 90 jours et 40 % de 90 à 130 jours. La carence en azote se caractérise par une chlorose, une perte de l'intensité de la couleur verte sur toute la plante en raison de la réduction de la chlorophylle. Les premiers symptômes de jaunissement surgissent sur les feuilles les plus vieilles de « l'axe principal » ; le déficit en azote ralentit la vitesse de croissance du cotonnier, réduit le nombre et la longueur des inter-nœuds par conséquent, diminue le nombre de branches végétatives et fructifères (Carmi & Shalhevet, 1982). Lorsque la carence devient sévère, les feuilles prennent une coloration bronze, sèchent et tombent de façon précoce. A cela, s'ajoute une chute des boutons floraux, des fleurs et des fruits nouveaux, endommageant ainsi la productivité.
- le phosphore (P) : il stimule chez le cotonnier la croissance des racines et joue un rôle important dans la floraison et le développement des fruits. Contrairement à l'azote qui prolonge la phase végétative, le phosphore favorise la maturation des capsules en accélérant leur ouverture. Sa carence réduit la photosynthèse, l'accumulation et la

translocation des hydrates de carbone vers les bourgeons du cotonnier (Parry, 1982). Cela entraîne un développement très lentement des plantes, les vieilles feuilles deviennent rouges (suite à l'accumulation de l'anthocyane) avec des taches ferrugineuses sur les bords évoluant vers un assèchement des feuilles et un rougissement de la tige qui peut également se produire. Une carence très sévère, provoque la chute des boutons floraux, une réduction de la taille des bourgeons et un retard de fructification, de maturation des capsules (Parry, 1982). Le résultat final de cette carence est la réduction de la productivité.

- le potassium (K) : permet au cotonnier de résister à certaines maladies cryptogamiques telles que la fusariose (Parry, 1982 ; Soltner, 1989). Un apport en potassium augmente la longueur des fibres, le poids de la graine et sa teneur en huile. La carence en potassium est caractérisée par une chlorose internervaire des feuilles de l'axe principal, suivie d'une nécrose sur les bords (Parry, 1982). En outre, elle provoque un raccourcissement du cycle de la plante, une malformation des capsules, une réduction de la productivité et de la qualité de la fibre (Dakouo, 1994).
- le calcium (Ca) : a un effet sur la croissance et le développement de la plante. Il est essentiel au maintien de l'intégrité structurelle des membranes et des parois pectocellulosiques (Dakouo, 1994) lors du processus de division cellulaire, durant l'absorption ionique, la germination du grain de pollen et pendant la croissance du tube pollinique. La présence du calcium dans la solution du sol est fondamentale pour le développement des racines du cotonnier. La carence en calcium (Ca) n'est pas connue sur le champ. D'une manière générale, les effets de l'acidité du sol et de son manque en d'autres éléments nutritifs se manifestent plus rapidement que le manque de cet élément nutritif dans une plantation. Les symptômes de carence en calcium chez le cotonnier sont caractérisés par une désorganisation des tissus (Bouchy, 1971), accompagnée d'une réduction de la croissance, d'un enroulement des bords des feuilles, d'un effondrement du pétiole, ainsi qu'une réduction de la floraison, de la fructification et une perte des bourgeons.
- le magnésium (Mg) fait partie de la molécule de la chlorophylle (Malavolta *et al.*, 1997) et est donc essentiel à la photosynthèse. C'est un activateur de nombreuses enzymes. En effet, toutes les enzymes phosphorylases dépendent de la présence du magnésium qui forme un pont entre l'ATP ou l'ADP et la molécule de l'enzyme (Dakouo, 1994). Le transfert de l'énergie de ces composés est fondamental lors des processus de

photosynthèse, de respiration, de réaction de synthèse de composés organiques et de travail mécanique exécuté par la plante. Les symptômes de carence en magnésium se caractérisent par une croissance lente du cotonnier, une chlorose internervaire qui apparaît sur les feuilles de l'axe principal, tandis que le reste du limbe devient rouge pourpre en raison de l'accumulation de l'anthocyane (Sement, 1983).

- le soufre (S) fait partie de la chlorophylle et de toutes les protéines de la plante (Mariame, 2019). Il assure des fonctions dans la plante qui peuvent être classées en deux grands groupes : structurelle et métabolique. Une carence en soufre, diminue la photosynthèse ce qui affecte la productivité et la qualité de la fibre. Cette déficience réduit la croissance des plantes. Cela fait qu'elles émettent peu de branches végétatives et fructifères, et présentent des feuilles de couleur verte-jaune au niveau des jeunes branches. Les symptômes d'une carence en soufre s'apparentent à ceux de l'azote. Cette similitude est du fait que ces deux nutriments sont des constituants protéiques. Par contre, la différence est qu'ils apparaissent initialement sur les jeunes branches pour le soufre tandis que les symptômes de carence en azote apparaissent initialement sur l'axe principal de la plante (Dakouo, 1994).

Les fonctions du bore (B) dans la plante sont associées à celles du calcium, au niveau de la régulation du fonctionnement de la membrane et de la paroi cellulaire, de la division et de l'augmentation des cellules, de la lignification de la paroi cellulaire essentielle à la formation des tissus méristématiques. Il participe au métabolisme et au transport des hydrates de carbone, à travers la formation de complexes borate-sucres qui sont importants dans la synthèse des protéines. Il agit également sur le métabolisme des acides nucléiques, sur le métabolisme et le transport des auxines. Le cotonnier est très sensible à la déficience en bore (Hien, 2016). En cas de carence en bore, on observe des déformations et des nécroses sur les jeunes organes (Mengel & Kirbky, 1978) ; les pétioles présentent des renflements annulaires vert-foncés, les plantes prennent un aspect buissonnant, les feuilles deviennent cassantes en s'épaississant et les capsules chutent par suite d'un taux insuffisant de fécondation des ovules (Parry, 1982). Les symptômes les plus observés au champ sont le jaunissement des feuilles des jeunes branches. Il se produit une chute excessive des boutons floraux, des fleurs et même des fruits nouveaux en cas de carence (Kouffi, 2024). Cette chute est imputable à la non-viabilité du grain de pollen qui culmine sur la non fécondation de l'ovule ou soit à des troubles causés sur le système vasculaire de la région du pédoncule, empêchant ainsi un transport idéal de l'hydrate de carbone

vers ces organes. La carence sévère en bore provoque la mort du bourgeon apical et l'apparition anormale de nouveaux bourgeons (Hien, 2016).

La fertilisation sous cotonnier est indispensable, car elle permet de corriger les carences et/ou déficiences naturelles des sols ou celles qui peuvent apparaître par suite d'une culture intensive (FAO, 2014a). En Côte d'Ivoire, les engrais couramment utilisés sont l'engrais minéral NPK 15N 15P 15K+ 6S+1B et l'urée (46 % N) apporté en fumure d'entretien. Les doses recommandées pour la culture de coton sont estimées à 200kg/ha de NPK et 50 kg/ha d'urée (Pouya *et al.*, 2013). Tout retard d'apport est préjudiciable à l'expression du potentiel de production du cotonnier due à l'efficacité de la fumure minérale épandue (Dakouo, 1998).

1.1.7. Importance socio-économique

La culture cotonnière est particulièrement importante pour de nombreux pays vu son impact social et économique, tant dans les secteurs agricoles qu'industriels. Les cotonniers produisent la fibre textile naturelle la plus exploitée dans le monde. Le coton revêt une importance économique et sociale considérable pour les pays africains qui le cultivent, en particulier ceux de la zone qui utilisent le franc CFA (Hussein *et al.*, 2005 ; Berti *et al.*, 2006). En Côte d'Ivoire, initialement considéré comme culture de « case », le cotonnier a connu un intérêt spéculatif à partir de 1959, avec l'introduction de variétés plus productives, l'amélioration des techniques culturales et la protection des cultures (Renaudin, 2011). Les effets conjugués de l'augmentation des superficies et des rendements en coton-graine ont porté la production nationale de 69 tonnes en 1960 à un niveau record de 402 367 tonnes de coton graine en 1999, avant de chuter à 167800 tonnes en 2009, du fait de la crise militaro-politique (Doffou, 2013). Pour la campagne 2020-2021, la production de coton-graine dans le pays a atteint 559 483 tonnes (Intercoton, 2022). Selon les années, le coton contribue pour 5 à 10 % aux exportations nationales et génère chaque année environ 120 milliards de francs CFA de chiffre d'affaires, dont 70 à 80 % en devises. La culture cotonnière constitue la principale source de revenu des agriculteurs de la zone savanicole et une importante source d'entrée de devises pour la Côte d'Ivoire (Ochou *et al.*, 2001).

La culture du coton a permis aussi un début d'industrialisation de la région des savanes avec dix (10) usines d'égrenage, une filature et une huilerie de graine (Edmond, 2015). Actuellement, l'exploitation du cotonnier ne se limite plus à la seule production de fibre, puisque la graine est devenue une source importante de matières premières alimentaires pour l'homme et le bétail (Bachelier, 1999). L'huile extraite des graines de coton représente aujourd'hui

l'essentiel de la consommation d'huile alimentaire dans les pays sahéliens, au Cameroun et en Côte d'Ivoire. Elle est également utilisée comme matière première de l'industrie savonnaire et comme source d'énergie pour le fonctionnement de certains types de moteurs (Fok & Barbier, 2001 ; Vaitilingom, 2006). De plus, les farines de coton constituent une matière protéagineuse de choix (avec une teneur en protéines pouvant atteindre 50 %) pour l'alimentation animale, servant ainsi de base essentielle à une modernisation de l'élevage (FAO, 1990).

Des opérateurs agro-industriels et commerciaux, regroupés au sein de la structure INTERCOTON incluent les Organisations Professionnelles Agricoles (OPA) affiliées à des faïtières comme la Société d'Exploitation Cotonnière Olam (SECO), filiale du groupe Olam en Côte d'Ivoire. SECO est une société anonyme avec un conseil d'administration et a son siège social situé à Ouangolodougou, dans la région du Tchologo. Elle est spécialisée dans l'approvisionnement, l'égrenage (c'est-à-dire la séparation de la fibre de coton de la graine) et la commercialisation du coton, ainsi que dans l'encadrement des producteurs de coton (formations et appui technique). Cette société apparaît comme un acteur important de la filière cotonnière ivoirienne, travaillant en étroite collaboration avec les producteurs. Elle fournit aux producteurs les semences et les intrants nécessaires à la culture, tels que les engrais et les produits phytosanitaires. Pour ce faire, les producteurs de coton sont regroupés par village et plusieurs villages constituent une section. Cette société génère des emplois, contribue à l'amélioration du cadre de vie et à la réalisation d'infrastructures sociales et communautaires dans les zones nord de la Côte d'Ivoire (pistes, centres de santé, écoles) (Zagbaï *et al.*, 2006 ; Edmond, 2015).

1.2. QUELQUES NOTIONS SUR LE SOL

La détermination des constituants, des propriétés physiques, biologiques et chimiques est indispensable à la connaissance d'un sol (Gayan *et al.*, 2020 ; Jacques, 2021). Ce volet des généralités aborde donc les différents constituants et propriétés du sol, non sans avoir donné avant, la définition et la description du sol.

1.2.1. Définition et description

Depuis la naissance de la pédologie, de nombreuses définitions du sol ont été proposées. Le sol étant un milieu complexe, il a connu une évolution dans sa définition au cours du temps. Il peut être défini comme étant une entité naturelle de la couche supérieure de l'écorce terrestre et souvent meuble, résultant de la transformation, la décomposition et l'altération de la roche mère au contact des processus climatiques, biologiques et physico-chimiques (ISO, 2015). Un

sol prend naissance dès que la moindre vie végétale et animale vient s'installer dans les premiers débris de décomposition d'une roche (Soltner, 1992 ; Diarra, 2021).

La formation du sol fait suite à un processus de décomposition chimique provoquée par le lessivage des eaux d'infiltration, qui, chargées de substances dissoutes, favorisent la formation d'un mélange intime entre matières minérales et organiques. C'est pour cela le sol est considéré comme un réacteur biogéochimique interactif et un constituant multiphasique. Il constitue la couche supérieure meuble et d'épaisseur variable de la croûte terrestre, souvent colorée par l'humus, et résulte de la transformation lente et progressive de la roche mère sous-jacente sous l'action combinée des facteurs physiques, chimiques et biologiques. (Bencheikh, 2021).

Il convient de rappeler ici qu'un " sol agricole," résulte de la transformation d'un sol naturel par l'homme dans le but de produire des végétaux destinés à l'alimentation, à l'industrie ou à d'autres usages économiques. Cette transformation s'accompagne de modifications de la morphologie, des propriétés, et de la composition des sols. Le sol se présente comme constitué d'un certain nombre de couches plus ou moins horizontales ayant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques définies et dénommées horizons. L'ensemble des horizons depuis la surface jusqu'à la roche sous-jacente du sol est dénommé le profil (Dabin, 1970). Les horizons sont constitués de matière minérale, organique et leur nombre varie en fonction de l'état d'évolution du sol. Ils diffèrent les uns des autres par des caractéristiques telle que la couleur, l'abondance d'éléments grossiers, la texture, l'arrangement spatial des constituants et des vides associés. Ces différents horizons ont été décrits, répertoriés et désignés par des lettres majuscules A, B, E, C, R, S, M et O (Figure 2) par les pédologues du monde entier (Baize & Girard, 2008).

L'horizon A, de nature organo-minérale, a en général une couleur foncée et est situé sous l'horizon O. Il surmonte l'horizon E de couleur claire, essentiellement minéraux, appelé horizon éluvial. Ces horizons sont lessivés, appauvris en carbonates et hydroxydes. Cet horizon est subdivisé en A₀₀ - A₀ - A₁ - A₂ et A₃. Les horizons A₀₀, A₀ d'une part, puis les horizons A₁, A₂, A₃ d'autre part, se superposent dans l'ordre respectif lorsqu'ils sont présents simultanément dans le profil (Baize & Girard, 2008).

L'horizon A₀₀ est un horizon de surface, formé de débris végétaux facilement identifiables (feuilles, brindilles et autres) et l'horizon A₀ est constitué principalement de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnaissables sur le terrain. L'horizon A₁ est

un horizon minéral de couleur généralement sombre présentant en général moins de 30 % de matière organique bien mélangée à la partie minérale, et peut être ou non un horizon éluvial. L'horizon A₂ est un horizon de couleur plus claire que l'horizon sus-jacent ; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de matériaux en solution ou en suspension. L'horizon A₃ est un horizon de transition entre A et B, mais il est plus proche de A que de B (Baize & Girard, 2008).

Les horizons B ou illuviaux sous-jacents des horizons E sont aussi de nature minérale (horizons minéraux). Il est riche en divers constituants tels qu'argile, fer, matière organique, carbonate de calcium, etc. Cet enrichissement provient soit des transformations sur place des minéraux préexistants, soit des apports illuviaux.

L'horizon C est un horizon minéral correspondant à la roche mère plus ou moins altérée. L'horizon R, enfin, correspond au substratum géologique (granite, calcaire, grès, etc.).

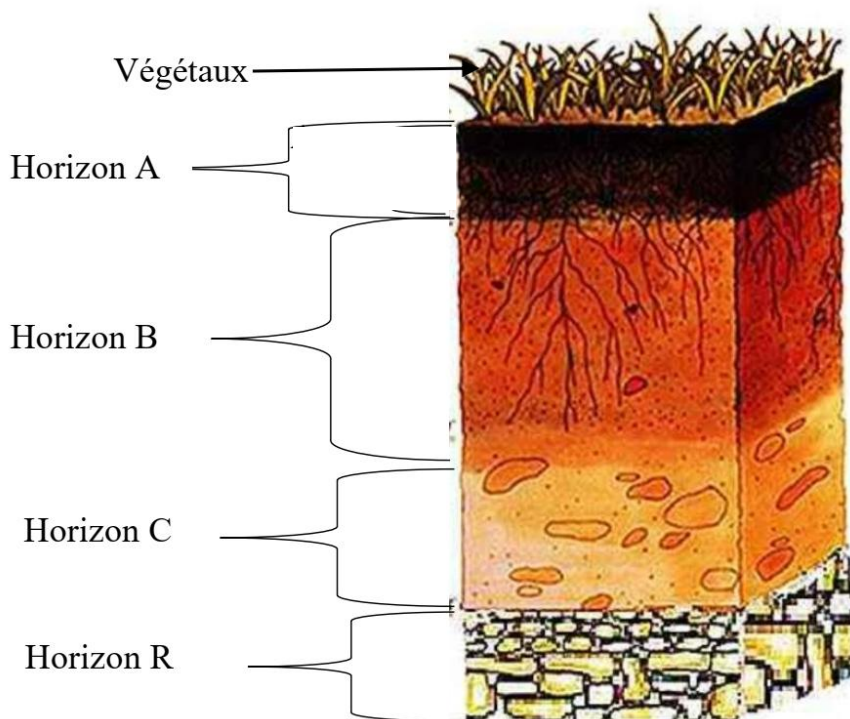


Figure 2 : profil de sol

Source : Christine *et al.* (2012).

1.2.2. Constituants du sol

Les sols peuvent être très différents d'un endroit à l'autre, cependant, ils sont généralement constitués de solides de nature organique et minérale, liquide et gazeux (Fondrillon, 2009).

1.2.2.1. Constituants solides

Le sol comprend deux grandes parties : la partie organique ou fraction organique et la fraction minérale.

❖ Fraction organique

Les débris organiques tels que les débris animaux (cire, détrit, cadavres ...) et les débris végétaux (feuilles, racines, rameaux, tronc d'arbre) constituent les éléments organiques du sol (Benahmed, 2017). La dégradation de ces éléments organiques donne l'humus qui est un composé organique stable, riche en radicaux libres comme la lignine et à noyaux aromatiques. L'humus régularise l'agencement du sol en présence de l'eau, d'air et la chaleur et est la source naturelle d'azote (Bliefert & Perraud, 2001 ; Benahmed, 2017).

La matière organique vivante, correspond à celle qui constitue les êtres vivants (animaux, plantes, micro-organismes). Elle est produite par ces organismes à partir de matières inorganiques comme le CO₂ et l'eau, grâce à l'énergie du soleil (la photosynthèse) (Zahia, 2024).

La matière organique fraîche (morte et très peu transformée) correspond aux organismes qui viennent de mourir et qui se distinguent selon leur degré de décomposition. La vitesse de décomposition de la matière organique fraîche évolue en fonction de sa composition, du temps, du climat, du type de sol et de l'activité biologique du sol. La décomposition de la matière organique fraîche dans le sol est assurée par les organismes décomposeurs du sol (vers de terre, bactéries, champignons, etc.) et qui utilisent la matière organique fraîche comme source d'énergie pour leur croissance. Cette décomposition aboutit d'une part, à la libération d'éléments minéraux qui pourront à nouveau servir à la croissance des plantes et d'autre part, des substances qui permettront la formation de l'humus, c'est-à-dire de la matière organique transformée (Francou, 2003 ; Beerah, 2019).

La matière organique transformée, également appelée humus, correspond à la matière morte totalement décomposée. Elle provient de la dégradation progressive de la matière organique fraîche d'origine végétale. En effet, lors de cette décomposition, une première fraction de la matière organique est constituée de substances facilement dégradables, telles que les sucres et les protéines. Sous l'action des micro-organismes du sol, ces composés se minéralisent rapidement, libérant directement des éléments nutritifs assimilables par les plantes ; ce processus est connu sous le nom de minéralisation primaire. Parallèlement, une autre fraction de la matière organique fraîche, plus résistante à la décomposition, est transformée par

les micro-organismes en humus. Ce dernier est principalement formé de composés complexes tels que la lignine et la cellulose, contenus dans les tissus végétaux, qui se dégradent lentement au fil du temps. En revanche, la décomposition des organismes d'origine animale ne produit pas d'humus, car leurs tissus ne contiennent ni lignine ni cellulose. Elle aboutit uniquement à la libération d'éléments minéraux, sans formation de matière organique stable. L'humus provient donc exclusivement de la matière organique végétale (Francou, 2003 ; Beerah, 2019). De plus, l'humus joue un rôle essentiel dans la qualité du sol : il lui confère sa couleur foncée caractéristique et son odeur spécifique. Surtout, il s'associe préférentiellement aux très petites particules de sol, comme l'argile pour former le complexe argilo-humique, structure fondamentale qui assure la stabilité et la cohésion du sol, tout en favorisant sa fertilité et sa durabilité (Aude, 2013). En d'autre terme l'humus regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et peut être classé en deux catégories : i) les substances non humiques qui correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques bio-physicochimiques sont reconnaissables (les hydrates de carbone, les protéines, les acides aminés, les lipide etc.) et ii) les substances humiques issues de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation etc.) de la matière organique du sol (Pansu & Gautheyrou, 2003 ; Sahnoune, 2014). Il peut présenter des charges négatives dues à la dissociation des atomes d'hydrogènes localisés sur les groupements carboxyles et phénols. De par ces charges négatives, l'humus va interagir avec certains ions du sol tels que les ions ferriques, l'aluminium et le calcium.

❖ Fraction minérale

Les éléments minéraux proviennent de la désagrégation mécanique et de la décomposition chimique des roches du substratum ou des matériaux apportés, alluvions, colluvions et dépôt éoliens. Les éléments minéraux peuvent être classés selon leur taille (granulométrie) ou leur composition chimique. Par granulométrie, on distingue les éléments grossiers constitués de graviers, cailloux/blocs (> 2 mm), les éléments fins constitués de sables (2 mm - 20 μ m), de limons (2 μ m - 20 μ m) et d'argiles (< 2 μ m) (Legros, 2009). Les proportions de ces différents éléments minéraux définissent la texture du sol et les façons dont sont assemblées ces particules élémentaires représentent la structure. Le sable et le limon sont des constituants chimiquement inertes car ces grains portent peu de charges électriques. Par comparaison aux sables et aux limons, les argiles sont des éléments les plus fins, mais aussi les plus réactifs. Les argiles présentent trois propriétés importantes qui varient selon leur structure minéralogique. Ces propriétés sont la surface spécifique (qui influe sur l'adsorption), la capacité d'échange cationique et les propriétés de gonflement. Les argiles présentent une charge globale

négative qui leur permet de fixer et redistribuer les ions H^+ et les cations métalliques présents dans le sol. Le taux d'argiles dans un sol va donc conditionner la capacité d'échange cationique et le pH du sol (Bronick & Lal, 2005 ; Aude, 2013). Les argiles sont hydrophiles et peuvent fixer les molécules d'eau, ce qui intervient sur la réserve hydrique du sol. Enfin, les argiles sont des colloïdes et peuvent se présenter sous forme dispersée (suspension homogène des particules dans l'eau) ou floculée (regroupement des particules en petits agrégats). De par ces propriétés, les argiles jouent un rôle central dans le sol influençant sa structure, sa porosité ou sa capacité d'échange ionique et le stockage du carbone.

1.2.2.2. Phase liquide

La phase liquide du sol remplit partiellement ou totalement les espaces libres (pores) compris entre les particules solides du sol. Il est composé d'eau et de substances minérales ou organiques solubles dans l'eau (Walter *et al.*, 2015). La présence de l'eau dans le sol est d'une importance fondamentale car elle est l'élément essentiel pour la fertilité du sol, sa présence rend possible les réactions chimiques entre divers constituants du sol. Elle constitue l'unique solvant dans le sol et l'unique transporteur de substance divers. Seul le mouvement de l'eau cause la translocation des substances tant dissoutes qu'en suspension. La solution du sol est indispensable pour la nutrition hydrique des végétaux (Walter *et al.*, 2015). L'eau alimente le sol en oxygène, en sels minéraux et en gaz carbonique, mais aussi, en éléments polluants (Bressoud *et al.*, 2009). La composition de la solution du sol varie selon le climat, les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire...etc.) et l'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne etc.) (Sahnoune, 2014).

1.2.2.3. Constituants gazeux

Les espaces libres entre les particules solides du sol et qui ne sont pas remplis par la phase liquide sont occupés par la phase gazeuse. Elle est composée de gaze et de l'air : vapeur d'eau et d' O_2 , CO_2 , N. Ces gaz provenant de l'altération des roches, de la décomposition des matières organiques et des apports par l'homme. L'oxygène (O_2) doit être présent dans le sol en quantité suffisante pour répondre aux besoins des plantes et des microorganismes (respiration aérobie). Le dioxyde de carbone (CO_2) doit également diffuser vers l'extérieur (Gobat *et al.*, 2010 ; Calvet, 2003 ; Benahmed, 2017).

1.2.3. Propriétés des sols

1.2.3.1. Propriétés physiques

La texture, la densité apparente, la porosité, la teneur en eau du sol, les éléments grossiers (taux, nature et états), la profondeur d'enracinement, la structure et la stabilité des agrégats sont les indicateurs qui permettent de mesurer les propriétés physiques des sols (Fardeau, 2015 ; Araya *et al.*, 2021).

❖ Texture

La texture du sol est basée sur la proportion relative de trois particules minérales : le sable, le limon et l'argile. Les pourcentages de chaque composant (sable, limon, l'argile) permettent de déterminer cette texture à partir du triangle textural avec précision (Schvartz *et al.*, 2005 ; Fardeau, 2015). La méthode d'estimation visuelle et tactile est une technique d'évaluation de la texture du sol sur le terrain, elle consiste à estimer les proportions de sable, de limon et d'argile par le toucher. Cette méthode rapide et économique se base sur la manipulation d'un échantillon de sol humide (boudin, anneau) pour évaluer sa consistance (rugosité, douceur, malléabilité, etc.). Au laboratoire, cela est mesuré à l'aide de techniques qui quantifient les informations liées à la vitesse, déterminant ainsi le temps de descente d'une particule dans l'eau, qui est déterminé par la loi de Stokes (Fardeau, 2015). La texture régule directement la structure du sol, et donc le régime hydrique et la porosité. Le rapport d'argile affecte en particulier la formation du complexe argilo-humique, la capacité d'échange, la fertilité et la profondeur d'enracinement. La texture est une propriété stable qui peut changer avec l'évolution, à long terme, du sol, ce qui est un bon indicateur (Gobat *et al.*, 2010).

❖ Densité apparente

La densité apparente est la masse de terre par unité de volume total qu'il occupe, incluant les espaces vides et les pores entre les particules. Elle est souvent exprimée en grammes par centimètre cube (g.cm^{-3}) ou en kilogrammes par mètre cube (kg.m^{-3}). Elle est utile pour le stockage, le transport et la formulation de mélanges, car elle donne une indication de la compacité (Fardeau, 2015). Le piétinement animal et le passage de machines lourdes dans des sols humides provoquent la compaction et augmentent la densité apparente du sol. Cette compaction réduit les pores du sol, ce qui diminue la circulation de l'air et de l'eau, affectant ainsi la santé des plantes et favorise l'érosion (Reynolds *et al.*, 2008 ; Fardeau, 2015).

❖ Porosité

La porosité se définit comme étant le volume des pores présents dans un volume de terre donné et est exprimée en pourcentage. Ces pores peuvent être remplis par des gaz et/ou de l'eau (Schvartz *et al.*, 2005 ; Fardeau, 2015). Les échanges de gaz entre le sol et l'atmosphère s'effectuent dans la porosité du sol (Schvartz *et al.*, 2005). Elle sert d'habitat aux microorganismes du sol et intervient dans la distribution et la disponibilité de l'eau (Kibblewhite *et al.*, 2008 ; Jacques, 2021). La porosité joue un rôle capital dans la fertilité des sols. Elle assure la circulation de l'air (O₂) et de l'eau, le bon développement des racines, et l'activité des microorganismes (Jacques, 2021).

❖ Teneur en eau

La teneur en eau du sol ou encore l'eau disponible pour les plantes correspond à la quantité d'eau maximale retenue par un sol qui serait disponible pour les plantes (Radcliffe *et al.*, 2010 ; Fardeau, 2015). Elle est variable au cours du temps et contrôlée par les précipitations, l'irrigation, l'évapotranspiration, les conditions de circulation de l'eau dans le profil (Fardeau, 2015) et la texture (Radcliffe *et al.*, 2010). Elle correspond à la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ et la teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent (Schvartz *et al.*, 2005 ; Radcliffe *et al.*, 2010).

❖ Eléments grossiers

Tous les constituants minéraux individualisés de dimension supérieure à 2 mm constituent les éléments grossiers du sol. Par pesée du « refus à 2 mm » après lavage et séchage permet de calculer le taux de charge grossière exprimé en pourcentage. Les éléments grossiers qui forment le squelette du sol, influencent son agronomie en modifiant les propriétés physiques. Leur présence affecte la perméabilité à l'eau et à l'air, la capacité de rétention d'eau et la structure du sol, ce qui a un impact direct sur la croissance des plantes, en particulier dans les sols caillouteux où leur abondance est élevée (Baize, 2000 ; Araya *et al.*, 2021).

❖ Profondeur d'enracinement

La profondeur d'enracinement se définit comme étant la profondeur limite exploitable par les racines selon l'espèce végétale considérée en un site déterminé. Elle est constatée directement sur le terrain sous une végétation pérenne adulte ou sous une culture annuelle, au moment où son système racinaire est le plus développé. La profondeur d'enracinement sert à estimer le réservoir maximal d'un solum, d'une unité typologique ou d'une unité

cartographique. Celui-ci est égal à la somme des réservoirs utilisables de chaque horizon jusqu'à la profondeur d'enracinement (Baize, 2016).

❖ Structure

La structure du sol correspond au mode d'organisation spatiale des particules minérales (sable, limon, argile) et organiques entre elles. Cet assemblage détermine la formation d'agrégats (ou mottes) et la porosité, influençant ainsi directement la circulation de l'air, de l'eau, le développement racinaire et la fertilité. On peut l'observer et la décrire à deux échelles : à l'échelle macroscopique (visible à l'œil nu) et à l'échelle microscopique (microstructure ou micromorphologie). L'échelle microscopique examine la façon dont les particules individuelles s'assemblent pour former des agrégats, tandis que l'échelle macroscopique étudie comment ces agrégats s'organisent dans la masse du sol. (Duchaufour, 2004 ; Jacques, 2021). Elle influence la teneur en eau pour les plantes et le potentiel hydrique du sol (Radcliffe *et al.*, 2010), ainsi que la distribution spatiale des racines (Pardo *et al.*, 2000), la sensibilité à l'érosion et la porosité du sol (Bronick & Lal, 2005).

❖ Stabilité des agrégats

Un agrégat peut être défini comme un groupe de deux ou plus particules élémentaires qui sont liées en formant une unité dont la résistance est supérieure à celle des particules séparées, constituant l'agrégat (Fardeau, 2015). L'agrégation est le processus par lequel les particules minérales et organiques du sol s'associent pour former des agrégats (Jangorzo, 2013). La stabilité des agrégats est la capacité d'un sol à maintenir l'arrangement spatial des agrégats et des vides lorsqu'il est exposé à différents stress tels qu'une pluie (Cosentino *et al.*, 2006).

1.2.3.2. Propriétés biologiques

Les propriétés biologiques du sol correspondent à l'ensemble des organismes (comme les bactéries, champignons, vers de terre, etc.) qui y vivent, que ce soit en passant tout leur cycle de vie dans le sol ou en y séjournant une partie de leur existence. Ces organismes sont très diversifiés en fonction de leur couleur, leur taille et sont généralement divisés en quatre catégories : la microfaune, la mésofaune, macrofaune et la mégafaune (El Alami, 2013 ; Briones, 2014 ; Baize, 2016).

La microfaune représente les organismes dont la taille est comprise entre 0,002 et 0,2 mm. Elle est composée principalement de nématodes et de protozoaires qui sont abondants dans les milieux très humides (Duchaufour, 2004).

La mésofaune du sol est un ensemble d'organismes d'une taille intermédiaire entre la microfaune et la macrofaune, mesurant de 0,2 à 4 mm. Elle comprend principalement des micro-arthropodes comme les collemboles et les acariens, qui vivent dans les pores du sol et la matière organique en décomposition. Son rôle est essentiel car elle fragmente la matière organique, ce qui facilite son attaque par les micro-organismes et contribue à la transformation de la litière (Cortet, 2010).

La macrofaune regroupe tous les êtres vivants ayant une taille comprise entre 2 à 20 mm. Ces êtres sont dominés par les lombrics qui ingèrent les débris organiques, enrichissent le fumier, ce qui favorise la croissance des microfaunes et de la microflore. Aussi, les lombrics brassent, aèrent et régulent l'activité biologique du sol, d'où tout le rôle important et précieux qu'on leur attribue dans le sol (Touyre, 2015).

La mégafaune dont les individus mesurent entre 20 à 200 mm, représente les mammifères qui vivent sur sol. Ces mammifères jouent un rôle incontestable dans la formation du sol. En effet, ils brassent le sol pour créer des cavités à réutiliser par d'autres membres de la communauté animale du sol (Touyre, 2015).

1.2.3.3. Propriétés chimiques

L'acidité (pH), le taux de matière organique (MO) du sol, la teneur en éléments nutritifs du sol, le rapport C/N, la capacité d'échange cationique (CEC) ou encore le taux de saturation du complexe d'échange sont les indicateurs d'évaluation des propriétés chimiques du sol (Baize, 2000 ; Sharma *et al.*, 2010 ; Thibault & Lecompte, 2018).

❖ L'acidité du sol

Le potentiel d'hydrogène (pH) renseigne sur le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol (Schvartz *et al.*, 2005). La mesure de l'acidité permet de quantifier la concentration des ions H^+ dans les solutions de sol. On peut déterminer, en fait, deux pH pour chaque échantillon de sol : l'un dans l'eau et l'autre dans du chlorure de potassium (KCl) (Baize, 1988). Le premier renseigne sur l'acidité effective de la solution et le second sur l'acidité potentielle (Fardeau, 2015). Le pH optimal pour la production végétale est d'environ 6,5 dans un sens général, car la plupart des plantes préfèrent un pH légèrement acide à neutre, généralement entre 6,0 et 7,5. Cependant, ce n'est pas universel ; certaines cultures ont des besoins spécifiques (Jacques, 2021). Le pH d'un sol influence la capacité de ses constituants porteurs de charges à piéger ou libérer les cations (Schvartz *et al.*, 2005).

❖ Matière organique du sol

La matière organique du sol (MOS) résulte de la décomposition des résidus d'animaux et des végétaux (racines, litières de feuilles, résidus de culture) ou de microorganismes, d'hydrates de carbone, de lignines, de protéines, de lipides, présents dans le sol (Lehmann & Kleber, 2015). La MOS est donc un mélange hétérogène de composés carbonés d'origines diverses (végétales, animales, microbiennes), dont la stabilité et le taux de renouvellement diffèrent (Trigalet *et al.*, 2017). En effet, le temps de renouvellement de la MOS varie selon plusieurs facteurs tels que l'abondance d'organismes décomposeurs et l'énergie dont ils ont besoin, ou encore les propriétés et l'abondance des surfaces minérales qui peuvent protéger la MOS (Lehmann & Kleber, 2015). La MOS qui n'est pas protégée est exposée à l'oxydation et la forme la plus oxydée du carbone contenu dans la MOS est le CO₂ (Trigalet *et al.*, 2017). Le processus de décomposition de la MOS est influé par l'humidité, la température, la communauté microbienne présente dans le sol et les conditions ambiantes du sol (Lehmann & Kleber, 2015 ; Zakem *et al.*, 2021).

❖ Teneur en bases échangeables

La plante a besoin de carbone (C), d'azote minéral (N), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), de potassium (K), de magnésium (Mg), de calcium (Ca), de phosphore (P), de soufre (S) et de nombreux micronutriments pour son développement (Baize, 2000 ; Schvartz *et al.*, 2005). Le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O) proviennent de l'air (dioxyde de carbone) et de l'eau (absorbée par les racines). Les autres nutriments essentiels, comme l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont puisés du sol sous forme de sels minéraux par les racines (Schvartz *et al.*, 2005). La teneur en éléments nutritifs du sol est donc un indicateur important de la fertilité du sol (Jacques, 2021).

❖ Rapport C/N

Le rapport C/N donne des informations sur la dynamique d'évolution de la MOS. Un rapport C/N idéal se situe entre 9 et 10 (Thibault *et al.*, 2018). Un rapport faible (C/N < 9) indique une dégradation rapide de la MOS tandis qu'un rapport élevé (C/N > 10) traduit sa décomposition lente. Les microorganismes qui décomposent la MOS ont besoin d'azote (N). Si la matière organique apportée au sol a un rapport C/N faible, elle apporte suffisamment d'azote aux microorganismes du sol, ce qui permet une croissance rapide de la population microbienne qui décompose alors rapidement la MOS. Un rapport C/N élevé signifie que la MOS ne contient pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone.

❖ Capacité d'échange cationique

La Capacité d'échange cationique (CEC) se définit comme la quantité totale de cations échangeables (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , H^+ , Al^{3+} , NH_4^+) qui peuvent être adsorbés sur certains constituants solides du sol, porteurs de charges tels que la MOS, les oxydes de fer ou d'aluminium et certains minéraux argileux comme la kaolinite (Fardeau, 2015 ; Jacques, 2021). Elle varie dans le temps (Schvartz *et al.*, 2005). La plupart des cations échangeables, sauf Al^{3+} , sont des nutriments pour les plantes (Jacques, 2021).

❖ Taux de saturation en bases

Le taux de saturation en bases est la proportion des sites d'échange du sol occupés par les cations basiques (comme le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium) par rapport à la capacité totale d'échange cationique (CEC). Il est exprimé en pourcentage et est un indicateur important de la fertilité chimique du sol, car un taux élevé suggère une meilleure neutralisation de l'acidité et une plus grande disponibilité des nutriments essentiels pour les plantes (Kessab, 2025).

1.2.4. Dégradation des sols

La dégradation des sols résulte de la perte de leurs fonctions vitales : production de biomasse (fertilité), régulation du cycle de l'eau, stockage du carbone, et habitat de la biodiversité (Diallo, 1995). Elle résulte de facteurs tels que la surexploitation des ressources naturelles, la déforestation, le déséquilibre du bilan des matières organiques et minérales causé par les feux de brousse répétés, le surpâturage, le défrichement, les pratiques culturales inadaptées, l'érosion, ainsi que l'industrialisation et l'urbanisation (Roose *et al.*, 1993 ; Sogbedji, 2006 ; Lare, 2008). Cette dégradation peut être de nature physique (érosion, compactage), chimique (salinisation, pollution) ou biologique (perte de matière organique) (Dabin, 1985 ; Mazzucato & Niemeijer, 2000).

1.2.4.1. Dégradation physique des sols

La dégradation physique des sols est une désorganisation de leur structure, principalement causée par l'érosion, la compaction et la salinisation. Ce processus se manifeste par la perte de la couche arable, une diminution de l'infiltration de l'eau et une mauvaise aération, entraînant une baisse de la fertilité et de la productivité des sols (Edwards *et al.*, 2000).

L'érosion est une dégradation physique qui consiste à transporter les matériaux des couches superficielles du sol par l'eau ou le vent. Elle affecte 84 % des sols dégradés, et

constitue un problème majeur mondial car elle entraîne la perte de la matière organique fertile. L'une des principales causes de celle-ci est l'accroissement du ruissellement provoqué par de fortes pluies, les activités humaines telles que les pratiques agricoles et la topographie des sols.

Une autre forme de dégradation physique du sol est la compaction qui se manifeste par une réduction exagérée de la porosité du sol (Celik *et al.*, 2004). Cela réduit la colonisation du sol par les racines, diminuant ainsi la résistance des cultures au stress hydrique et une faible capacité d'approvisionnement en éléments minéraux du sol. L'encroûtement superficiel du sol est aussi à mentionner.

Au total, la dégradation physique du sol entraîne la perte de la structure du sol, la diminution de sa porosité, de sa capacité d'infiltration et de sa capacité de rétention en eau, ce qui empêche le développement racinaire des plantes (Claire, 2008).

1.2.4.2. Dégradation chimique des sols

La dégradation chimique du sol se traduit par un appauvrissement en éléments nutritifs et une acidification (Celik *et al.*, 2004). L'épuisement des nutriments résulte de l'exportation des éléments minéraux, liée aux pratiques culturales sans apport compensatoire, ainsi que de la lixiviation et de l'érosion. L'acidification du sol est, quant à elle, principalement causée par un usage excessif de produits phytosanitaires ou d'engrais chimiques. Elle peut également survenir en raison d'une concentration accrue de certains éléments minéraux dans le sol, comme l'aluminium (Edwards *et al.*, 2000 ; Celik *et al.*, 2004).

1.2.4.3. Dégradation biologique des sols

La dégradation biologique correspond à la perte de la biomasse du sol, se traduisant par une réduction de la matière organique ainsi qu'une diminution en quantité et en qualité des micro-organismes. Cette dégradation résulte de plusieurs facteurs, notamment le déboisement, le surpâturage, l'agriculture itinérante, les feux de brousse et la pollution des sols par les produits phytosanitaires (Edwards *et al.*, 2000 ; Celik *et al.*, 2004 ; Claire, 2008).

1.2.5. Restauration des sols dégradés

La perte de fertilité des sols agricoles concerne tous les types de sols et influence négativement la croissance, le développement et le rendement des cultures. Elle constitue, par ailleurs, la principale cause de la diminution de la disponibilité des produits agricoles (Chan *et al.*, 2008). Pour préserver ou restaurer la fertilité des sols, diverses techniques ont été mises en place, telles que l'amendement avec des résidus agro-industriels sous forme de fumier ou de

compost, ainsi que le remaniement des sols par l'activité des vers de terre et des termites (Sawadogo *et al.*, 2008).

Par ailleurs, des pratiques culturales comme la jachère, le terrassement, l'utilisation de plantes de couverture et la rotation des cultures contribuent à restaurer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Boli & Roose, 2000). Certaines études ont également montré l'intérêt des résidus agro-industriels carbonisés pour la restauration des sols dégradés (Cheng *et al.*, 2006 ; Chan *et al.*, 2008).

1.2.6. Principales classes de sols en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, plusieurs classes de sols ont été dénombrées sur la base de la classification établie par la Commission de la Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) (Aubert, 1965) et selon la WRB (2014). Les sols ferrallitiques ou ferralsols et ferrugineux ou Acrisols constituent plus de 90 % de ces sols (Kassin, 2009).

1.2.6.1. ferralsols

Les ferralsols représentent les sols les plus anciens et les plus altérés dans la taxonomie (WRB, 2014). Ces sols présentent un profil de type ABC, dominé par les oxydes de fer et d'aluminium, ce qui les rend peu fertiles et difficiles à gérer tant sur le plan agronomique qu'environnemental (FAO, 2014b).

Sur le plan morphologique et/ou physique, les ferralsols se caractérisent par une des horizons bien distincts et un développement important de l'ensemble du profil. On les trouve dans presque toutes les régions du pays : au sud (Alépé, Adzopé), au sud-est (Agboville), au sud-ouest (Lakota, Soubré), à l'ouest (Tabou, Guiglo, Touleupleu, Danané, Man, Duékoué), à l'est (Abengourou), au centre (Bouaké, Katiola), au centre-est (Prikro, Bongouanou), au centre-ouest (Daloa, Vavoua, Gagnoa) et au centre-nord (Dabakala) (Soro *et al.*, 2011). L'altération des minéraux silicatés est particulièrement intense ; il en est de même pour la décomposition de la matière organique, ce qui entraîne une rapide dégradation de cette dernière. En conséquence, l'horizon humifère dans les ferralsols est peu développé et recouvert d'une mince litière composée de feuilles et de branchages. Cet horizon accueille un réseau racinaire très dense. L'horizon lessivé situé en dessous, d'épaisseur comprise entre 50 cm et 1 mètre, présente une texture sableuse à sablo-argileuse et des couleurs allant du gris-beige au brun-rougeâtre, selon la richesse initiale en éléments ferromagnésiens de la roche-mère (Avenard, 1971 ; FAO, 2014c). Sous cet horizon lessivé, il existe fréquemment un horizon graveleux, constitué principalement d'éléments quartzeux plus ou moins émoussés et ferruginisés. Ce niveau

graveleux, variable en profondeur et en épaisseur, épouse les formes topographiques selon une ligne sinueuse. Il recouvre un horizon d'accumulation argileuse et ferrugineuse, rouge à brun-rougeâtre, marqué par des traînées jaunes, rosées ou grisâtres diffuses (Dabin *et al.*, 1960). Aussi, dans l'horizon graveleux, la présence de concrétions peut être importante, avec parfois une induration généralisée sous certaines conditions. En profondeur, la densité des concrétions diminue progressivement, laissant place à une argile tachetée de nuances brun-rougeâtre, ocre-jaunâtre et gris-clair. Cette fraction argileuse est de type kaolinique, argile dominante dans ces sols (WRB, 2014). La gibbsite, minéral peu stable, peut apparaître en forte proportion dans les colloïdes des premiers stades d'altération. Sur certaines roches riches en éléments ferromagnésiens, la phase argileuse peut être un mélange de montmorillonite et de kaolinite.

Au plan chimique, les ferralsols sont en général acides, avec un pH variant entre 4,5 et 6. La somme des bases échangeables y est faible, inférieure à 8 cmol kg⁻¹, et le taux de saturation en bases du complexe adsorbant oscille le plus souvent entre 15 et 30 % (FAO, 2014b).

Dans les régions subtropicales humides comme la Côte d'Ivoire et équatoriales, l'épaisseur importante des ferralsols les rend favorables aux cultures pérennes telles que le palmier à huile, le cacaoyer, le caféier et l'hévéa, ainsi qu'aux cultures annuelles comme le manioc, le maïs, l'igname et le coton (AGRIMET, 1991). Sous couvert végétal, ces sols présentent de bonnes caractéristiques agronomiques, grâce à un bon régime hydrique et à des réserves solides en matière organique (Dabin et Maignen, 1979). Cependant, ils nécessitent une gestion adéquate en culture (Segalen, 1995 ; Oorts *et al.*, 2003), car ils se dégradent rapidement sous l'effet de facteurs majeurs tels que la déforestation et les pratiques culturales inadaptées (Bationo *et al.*, 1998). C'est ainsi que plusieurs auteurs attestent que la mise en culture des sols ferrallitiques entraîne une dégradation progressive de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (Boyer, 1982 ; Pieri, 1989).

1.2.6.2. Acrisols

Les acrisols se caractérisent par une différenciation morphologique marquée des horizons supérieurs, une structure massive à l'état sec et la présence d'un horizon d'accumulation profond où peuvent se former des indurations liées à la concentration des hydroxydes de fer.

Ces sols sont acides, très altérés et présentent un faible taux de saturation en bases échangeables. Ils sont riches en sesquioxides de fer, souvent individualisés et répartis tout au long du profil (WRB, 2014), avec une accumulation fréquente dans les horizons inférieurs. Les

acrisols affichent généralement des teintes rouges, rougeâtres ou ocre, souvent accompagnées d'une abondance de concrétions sur une épaisseur relativement importante (Koffi, 2023).

La teneur en argile diminue dans la partie inférieure du sol, où dominant la kaolinite et l'illite parmi les minéraux argileux. La lixiviation des oxydes de fer et des argiles peut entraîner la formation d'un horizon éluvial blanchâtre situé entre l'horizon supérieur et l'horizon argique subsuperficiel.

La capacité d'échange cationique est généralement inférieure à 24 cmol.kg^{-1} , et le taux de saturation en bases échangeables est inférieur à 50 % (WRB, 2014). En Côte d'Ivoire, les acrisols sont présents au nord-est (Bondougou, Kong) et au centre du pays (Toumodi) (Koffi, 2023).

1.2.6.3. Sols peu évolués

Les sols peu évolués en Côte d'Ivoire sont principalement des sols hydromorphes (sols gorgés d'eau) et des sols peu profonds comme les sols ferrugineux. On les trouve dans les bas-fonds, les zones humides et les régions côtières sableuses. Ils présentent souvent une faible fertilité et des contraintes pour l'agriculture, comme le manque de drainage, mais peuvent être améliorés par des apports d'amendements et des techniques agricoles adaptées (Perraud, 1971)

1.2.6.4. Sols à minéraux bruts

Aubert (1965) mentionne parmi les sols minéraux bruts les accumulations de blocs de cuirasse ferrugineuse, où ce matériau joue le rôle d'une sorte de roche-mère secondaire. C'est sur cette base que la végétation peut ensuite se reconstituer, initiant une nouvelle phase de pédogenèse qui aboutira à la désagrégation et à la disparition progressive de la cuirasse. Selon lui, les nappes caillouteuses d'origine granitique, doléritique ou schisteuse, présentes dans des régions où le socle affleure, peuvent également être considérées comme des sols minéraux bruts ou des sols squelettiques. Il précise que la répartition de ces sols minéraux bruts est très restreinte dans les zones tropicales de la Côte d'Ivoire.

1.2.6.5. Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes en Côte d'Ivoire sont des sols gorgés d'eau, se trouvant généralement dans les bas-fonds et les zones basses. Ils peuvent être de type minéral ou organique et sont souvent utilisés pour l'agriculture, notamment la culture de bananes, mais nécessitent des travaux de drainage préalables en raison de leur forte teneur en eau (Le Loeuff, 1994). Ils peuvent présenter une hydromorphie temporaire ou une hydromorphie permanente.

L'hydromorphie temporaire désigne une saturation du sol en eau, de manière non permanente mais récurrente. Elle se manifeste par des engorgements qui entraînent une dégradation des conditions d'oxygénation du sol (anoxie), ce qui modifie la chimie du sol, notamment l'oxydation du fer et du manganèse, visible par des traces de couleur rouille ou grisâtre. Cette condition est souvent causée par la présence d'une nappe phréatique superficielle ou par un drainage interne limité (Le Loeuff, 1994).

L'hydromorphie permanente est une condition d'un sol où une saturation en eau durable et constante se produit, résultant en une décoloration généralisée du sol et des dépôts de fer réduit (couleur bleu-vert). Cette saturation permanente est causée par des conditions de drainage faibles, comme une nappe phréatique proche de la surface, un niveau imperméable (plancher argileux) en dessous, ou une faible porosité. Elle affecte l'ensemble du profil du sol et est fréquente dans les sols organiques des dépressions humides (Bourrié, 2018)

1.2.6.5.1. Sols hydromorphes d'apport colluvial

Les sols hydromorphes issus d'apports colluviaux correspondent aux sols du cordon littoral, qui se sont formés sur des sables marins récents ou actuels. Ces sols ne s'étendent que sur quelques centaines de mètres de largeur le long du littoral (Dabin *et al.*, 1960). Ils se caractérisent principalement par une légère accumulation superficielle de matière organique sur une épaisseur de 25 à 30 centimètres, ainsi que par une grande uniformité texturale du profil, dominée par du sable grossier, du moins dans les premiers mètres de sédiments. La nappe phréatique se situe généralement entre 7 et 8 mètres de profondeur. On observe une tendance au lessivage progressif dans ces sols, qui devient plus marquée à mesure que l'on s'éloigne du rivage, notamment dans des zones topographiquement plus basses où la nappe phréatique est plus proche de la surface (Dabin *et al.*, 1960).

1.2.6.5.2. Sols hydromorphes d'apport illuvial

Il s'agit de sols dont les caractéristiques résultent d'une évolution principalement influencée par un excès d'eau, provoqué par un engorgement temporaire, qu'il soit au niveau de la surface, en profondeur ou sur l'ensemble du profil, lié à la présence ou à la remontée d'une nappe phréatique (Aubert, 1965). La présence d'eau est associée à des conditions topographiques basses et planes, telles que les zones où l'écoulement est difficile (bas-fonds, fonds de vallées, dépressions lagunaires), les zones susceptibles d'être inondées par les crues fluviales, ou encore les zones où la nappe phréatique est sujette à des variations fréquentes, comme les sables littoraux. L'hydromorphie se manifeste juste sous l'horizon humifère ou

parfois uniquement dans les horizons plus profonds par la présence de taches liées aux phénomènes de réduction et de réoxydation, des taches grises et rouilles ou par la redistribution des oxydes de fer et de manganèse en milieu réducteur, ce qui donne des teintes gris-bleuâtres. Selon la quantité d'accumulation organique, deux sous-catégories de sols hydromorphes sont reconnues : les sols hydromorphes organiques et les sols hydromorphes minéraux (Aubert, 1965).

1.2.6.6. Vertisols

Selon Aubert (1965), les vertisols sont toujours des sols très argileux, dominés principalement par des argiles gonflantes de type 2/1. Cette composition argileuse leur confère leur capacité à se rétracter et à se dilater considérablement selon les variations de teneur en eau, ce qui crée des fentes profondes en période sèche. La différenciation des horizons dans un vertisol est surtout liée à leur structure, tandis que leur couleur est généralement uniformément gris foncé à noire. Ces sols se caractérisent par la présence constante de fissures de dessiccation à la surface, provoquées par la sécheresse, ainsi que par des surfaces planes de glissement en profondeur, signes du mouvement interne du profil. Ils sont généralement riches en calcium et magnésium, et parfois en sodium. Par ailleurs, un microrelief ondulé appelé « gilgai » peut apparaître à la surface (Wilding & Tessier, 1988). Deux conditions sont nécessaires à la formation des vertisols : un pédoclimat alternant une période saturée en eau suivie d'une saison très sèche, et une roche-mère capable de fournir des argiles gonflantes, directement ou par décomposition (comme c'est le cas pour les roches calcaires). Les vertisols se distinguent par une bonne fertilité liée à leurs propriétés physico-chimiques : un taux de saturation d'environ 78,23 %, une forte présence de calcium dans le complexe adsorbant, un pH compris entre 6 et 7, ainsi qu'une capacité d'échange cationique (CEC) d'environ 23,06 cmol.kg⁻¹ (Wilding & Tessier, 1988). Ils disposent également d'une bonne capacité de rétention en eau. Un taux élevé de fer libre (9,08 %), témoignant aussi de l'influence de l'hydromorphie dans la dynamique des profils. Ces sols sont bien adaptés à la culture de nombreuses plantes telles que le riz, le blé, le haricot, le tabac, le maïs, le poivron, le melon, le chou, le piment, entre autres. Malgré cette fertilité intéressante, les vertisols présentent une contrainte agronomique majeure liée à leur texture argileuse et aux fissures profondes de retrait qu'ils développent (Wilding & Tessier, 1988).

1.2.6.7. Sols bruns tropicaux

Les sols bruns tropicaux, aussi appelés terres brunes ou noires, se développent sur des roches basiques telles que les dolérites et amphibolites, généralement en position de plateaux ou sur des pentes. La fraction argileuse de ces sols comprend non seulement de la kaolinite, mais aussi de l'illite et de la montmorillonite, ce qui se traduit par un rapport silice/alumine supérieur à 2. La présence de montmorillonite est en partie liée à des conditions temporaires d'hydromorphie causées par des facteurs pétrographiques ou topographiques (Perraud, 1971). Morphologiquement, ces sols sont souvent peu profonds, entre 50 cm et 1 mètre, et contiennent fréquemment des affleurements ou fragments de roche saine dans leur horizon superficiel (Aubert, 1965). Ils possèdent un horizon argilo-humifère brun foncé à noir, d'une structure grumeleuse typique, parfois remplacé par un horizon B à structure polyédrique fine, épais de 20 à 50 cm, qui constitue la couche superficielle. En dessous, un horizon plus clair, brun-jaune foncé ou gris-verdâtre, à structure prismatique ou grossièrement polyédrique, fait transition avec la zone d'altération de la roche, caractérisée par un faciès de décomposition en boules. Dans les savanes, des nodules calcaires sont souvent présents dans tout le profil, alors qu'en zone forestière, ils sont plus rares et se situent généralement au-dessus de l'horizon d'altération. Sur le plan physico-chimique, ces sols présentent en surface une saturation élevée, avec un faible degré de désaturation en profondeur (Aubert, 1965). La somme des bases échangeables est très élevée (20 à 40 méq/100 g) et le pH est neutre à légèrement acide. L'horizon de surface, brun foncé, est riche en matière organique et en azote, avec un rapport C/N inférieur à 10, ainsi qu'un rapport acide fulviques/acides humiques inférieur à 1. La forte teneur en bases échangeables combinée à un taux d'argile supérieur à 30 % favorise le développement d'une structure grumeleuse moyenne à nuciforme et une cohésion marquée des agrégats. Si les réserves en eau sont importantes, l'eau utile pour les plantes varie entre 10 et 15 %, tandis que le point de flétrissement est élevé, entre 20 et 30 %. Les fortes concentrations en calcium et magnésium constituent une caractéristique essentielle de ces sols (Dabin *et al.*, 1960). Géographiquement, les sols bruns tropicaux se trouvent dans des gisements intra-zones sur les affleurements de roches vertes (amphibolites) et dolérites, notamment dans les chaînes métamorphiques birrimiennes, à partir de la limite sud des ferralsols vers les régions soudaniennes. En Côte d'Ivoire, ils occupent les sommets de collines, les pentes et les bas de pente sur un modelé accidenté au sein des massifs de roches basiques (Perraud, 1971). En zones forestières, ils se limitent à quelques collines juxtaposées à des sols ferrallitiques modérément ou faiblement désaturés, tandis que dans la chaîne de la Haute-Comoé, leur étendue est plus

importante. En savane, ils se situent sur les chaînes de collines du complexe volcano-sédimentaire, voisinant avec des sols ferrallitiques faiblement désaturés, souvent indurés (Lévêque, 1972). Ces sols sont très fertiles, et en forêt, la topographie demeure le principal facteur limitant, influençant la profondeur des sols et leur exploitabilité. L'hydromorphie est généralement peu contraignante. Pour des cultures autres que le cacaoyer, notamment les cultures vivrières, il est essentiel de protéger les sols afin d'éviter la dessiccation des horizons et la rupture des racines. En savane, seules les terres brunes en position basse ou sur pente faible sont adaptées à la culture du coton, ainsi qu'aux cultures vivrières, maraîchères et au tabac, le facteur limitant principal étant la disponibilité en eau utile pour les plantes (Aubert, 1965).

1.3. NOTIONS DE FERTILITE DES SOLS

Du point de vue agronomique, la fertilité du sol se définit comme étant l'aptitude à produire d'un sol. Dans la conception globale, la fertilité du sol est un potentiel de production végétale dont l'appréciation est liée à la connaissance des différentes composantes et principalement les composantes physiques, chimiques et biologiques (Millogo, 2002). Selon Soltner (1986), la fertilité d'un sol est la résultante de ses bonnes propriétés physiques, chimiques et biologiques. Il en ressort que les différentes composantes de la fertilité sont liées d'où la nécessité de les définir succinctement.

1.3.1.1. Fertilité biologique

La fertilité biologique du sol est la capacité d'un sol à soutenir une activité microbienne saine, qui est essentielle pour le recyclage des matières organiques, la disponibilité des nutriments et la structure du sol. Elle dépend principalement de la présence de matière organique et de la diversité des organismes du sol (microbes, vers de terre, insectes), et se manifeste par la création de porosité, qui permet une bonne aération et une meilleure rétention d'eau. Les activités microbiennes consistent entre autres à la transformation de la matière organique et des substrats minéraux, à la biosynthèse de l'humus, aux actions spécifiques de fixation de l'azote et de dénitrification et enfin aux actions diverses (modifications du pH, rôle sur la structure...). Roose (1977) et Soltner (1986) soulignent que ces activités microbiennes influencent considérablement la fertilité chimique et physique du sol.

1.3.1.2. Fertilité physique

La fertilité physique d'un sol définit sa capacité à offrir un support mécanique, de l'air et de l'eau aux racines, déterminée par sa structure, sa porosité, sa texture et sa profondeur. Un sol bien structuré, aéré et résistant à l'érosion est crucial pour une bonne croissance racinaire et

l'absorption des nutriments (Traore, 2012). En zone tropicale sèche, les structures des sols sont fragiles et mal développées en raison de l'érosion, de l'épuisement des nutriments et de l'effet de la pluie battante qui compacte la surface (Boyer, 1983). Quant à l'eau, elle constitue le principal facteur abiotique limitant la productivité végétale, plafonnant les rendements et causant une forte variabilité interannuelle. La réserve en eau disponible pour la plante dépend du profil de sol, caractérisé par sa capacité de rétention, son humidité au point de flétrissement et sa profondeur (Benoit, 2020).

1.3.1.3. Fertilité chimique

De tous les paramètres de fertilité, le facteur chimique a été le plus quantifié par les agronomes. Le modèle des bilans minéraux est un outil utilisé pour le suivi de cette fertilité chimique, car il permet de quantifier la quantité d'éléments nutritifs présents et leur potentiel de mobilité, qui est influencé par les systèmes de culture. C'est dans le domaine de l'analyse des facteurs chimiques que les agronomes sont plus avancés (Sebillotte, 1989). Cela se justifie, vraisemblablement, par le fait que le rendement des cultures et la richesse chimique du sol sont le plus souvent associés (Pieri, 1989). Il convient, cependant, de distinguer l'abondance des éléments nutritifs dans le sol due à la nature de la roche mère, de la quantité d'éléments mobilisables, qui elle, dépend de l'ambiance physico-chimique et biologique. Ce caractère est susceptible d'être modifié par les systèmes de culture. C'est le cas, par exemple, des systèmes de culture avec exportation des résidus sans apport de fertilisants qui appauvrissent le sol. La baisse du niveau des éléments chimiques s'accompagne d'une acidification et des toxicités diverses (Boyer, 1983). La question de l'identification des carences et des déficiences minérales a bénéficié de nombreux travaux. Les plus simples des outils de diagnostic font référence à des symptômes foliaires et à des normes sur les teneurs en éléments minéraux du sol. Les phénomènes responsables de la diminution des stocks minéraux du sol sont : les exportations à travers la récolte, les pertes induites par l'érosion, le lessivage, la lixiviation et pour N en particulier, la dénitrification, la volatilisation et la réorganisation microbienne (Roose, 1981 ; Stoorvogel & Smaling, 1990).

Les pertes minérales liées aux exportations par les cultures dépendent du niveau des rendements et du mode de gestion des résidus de récolte. Le brûlis des résidus de récolte, qui est pratiqué en culture cotonnière en Afrique de l'Ouest, induit la perte totale de N par volatilisation et accroît les risques de pertes par lessivage des autres minéraux. Le prélèvement des résidus de récolte à des fins domestiques est une autre source de pertes minérales, notamment de K qui est le minéral le plus concentrés dans la paille des céréales (Kintche, 2011).

Les pertes liées à l'érosion, au ruissellement et à la lixiviation dépendent de l'élément considéré moins importantes pour le phosphore (P) ; (Janssen *et al.*, 1990), de la texture et la structure du sol (pente, porosité et CEC), de la pluviométrie, du degré de maîtrise du phénomène, à travers les pratiques culturales (labour et paillage) et de l'importance du couvert végétal et du système racinaire de la plante (Roose & Barthès, 2001). En zone soudano sahélienne, les pertes N, P et K dues à l'érosion et au ruissellement, ont été rapportées aux valeurs moyennes respectives de 47, 16 et 32 kg ha/an (Roose, 1981). Les pertes N par dénitrification sont élevées en conditions de forte acidité et de dessèchement du sol. Celles liées à la réorganisation microbienne sont élevées lorsque le rapport C/N du sol est élevé (incorporation au sol de la paille de céréales, du fumier ou du compost mal décomposés).

La baisse du taux d'argile du sol est essentiellement due à l'érosion. Le compactage du sol en cas de motorisation excessive, est le plus souvent la dégradation de la structure du sol imputable aux pratiques culturales (Roussel *et al.*, 2001). Dans le cas des terres de barre, il a été rapporté que la motorisation pulvérise et induit la prise en masse des particules du sol, augmente de 10 à 20% la densité apparente, traduisant ainsi la baisse de la porosité et réduit la stabilité du sol, en raison de l'augmentation du taux d'argiles dispersées (Balbino *et al.*, 2002).

1.3.2. Déterminants de la fertilité du sol

Les déterminants de la fertilité du sol sont un ensemble de facteurs chimiques, biologiques et physiques interdépendants. Les facteurs chimiques incluent le pH et les nutriments comme le phosphore et le potassium. Les facteurs biologiques englobent l'activité des microorganismes et des macroorganismes (vers de terre) et la matière organique du sol. Les facteurs physiques comprennent la structure du sol, sa profondeur, sa texture et sa capacité de drainage (Larson & Pierce, 1992 ; Doran & Parkin, 1994). Le pH et la Capacité d'Échange Cationique (CEC) sont des indicateurs majeurs de la fertilité du sol, car ils sont intimement liés et influencent la disponibilité des nutriments. Enfin, le rendement des cultures est fortement corrélé avec le niveau de fertilité du sol, l'expression du climat, les techniques culturales et le potentiel de la plante concernée à tolérer les conditions du sol et du milieu ambiant. Par exemple, lorsque l'agriculteur respecte le calendrier cultural, il améliore généralement la production car il permet de planifier au mieux les semis, l'irrigation, la fertilisation et la récolte en fonction des conditions climatiques optimales et des besoins des plantes (Angers *et al.*, 1992). S'agissant du degré différent avec lequel les plantes tolèrent les conditions, le mil et le sorgho donnent de bons rendements en sols à fertilité médiocre, contrairement au maïs et au cotonnier qui sont fortement sensibles à la déficience minérale et hydrique (De Rouw & Jean-Louis Rajot, 2004).

Le rendement des cultures est un indicateur partiel car il ne reflète pas tous les aspects de la fertilité du sol, mais il est considéré comme le plus précieux car c'est un résultat concret et mesurable qui dépend de multiples facteurs (Fardeau, 2015).

1.3.2.1. Matière organique

La matière organique peut être perçue comme le principal déterminant de la fertilité du sol. Ses rôles ont été présentés dans des études anciennes et récentes (Feller, 1995). Elle augmente la capacité de rétention et d'infiltration d'eau dans le sol, assure la stabilité structurale et participe à l'économie des cations échangeables à travers la formation de la CEC. Elle rend le sol meuble, facilite la pénétration des racines et améliore les propriétés acido-basiques du sol à travers ses effets positifs sur le pH (Schnitzer, 1986). La minéralisation de la matière organique constitue une source potentielle de l'azote (N) et du phosphore (P) aux plantes cultivées. Elle contient des hormones naturelles (auxines et gibberelline) qui améliorent la germination des graines, initialisent le développement et la potentialité des racines à absorber des nutriments (Schnitzer, 1986).

1.3.2.2. Eléments minéraux

❖ Rôle

Environ treize éléments minéraux entrent dans l'alimentation des plantes cultivées. Trois d'entre eux, à savoir l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K), sont consommés en quantités élevées et déterminent le niveau des rendements. L'azote commande l'assimilation chlorophyllienne, il est le principal facteur qui augmente quantitativement la production agricole (Mosier *et al.*, 2004). Le phosphore assure le transport d'énergie dans les phénomènes de photosynthèse et de métabolismes divers (Huang, 2018).

Il favorise, en particulier, le développement racinaire et la nodulation chez les légumineuses et se révèle le facteur de précocité des végétaux (Brady *et al.*, 2008). Le potassium est, d'une part, un facteur de vigueur et de résistance aux maladies ou à la sécheresse et, d'autre part, le facteur régulateur des fonctions chlorophylliennes de la plante. Le potassium est donc l'élément d'équilibre, de santé et de développement qualitatif de la plante (Scherer *et al.*, 2003).

Les minéraux tels que le magnésium (Mg) et le calcium (Ca) sont consommés en quantités faibles, mais leur carence peut entraver la production en raison de leurs effets qui sont positifs sur les propriétés acido-basiques du sol et de leur interaction positive avec les minéraux majeurs, K notamment (Fageria & Baligar, 2004 ; Milkha & Sukhdev, 2004).

Les oligo-éléments du sol, bien que présents en petites quantités, sont essentiels à la croissance des plantes. Ils incluent des éléments comme le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore et le molybdène, qui jouent un rôle crucial dans divers processus métaboliques tels que la photosynthèse et la formation des protéines (Taoufik, 2018).

❖ Bilan minéral

Le bilan minéral est la différence entre les entrées minérales au sol et les sorties. Il permet de catégoriser la qualité d'un sol (Tableau II) (Crétenet & Gourlot, 2016) et d'évaluer les quantités de minéraux à apporter au sol pour compenser les déficits (Van der Pol, 1992). Les travaux Tié (1995) ont montré que de la quantité d'azote minéralisable (N-NH₄⁺/H₂O₂) permet de prédire les éléments minéraux dont le sol a besoin pour approcher l'équilibre minéral en son sein. En effet, En Côte d'Ivoire, les travaux de Tié (1995) et Tié *et al.* (2010) sur les Vertisols et Ferralsols ont permis de mettre en évidence l'extraction d'une fraction d'azote minéralisable du sol sous la forme de N-NH₄⁺. Ces études ont démontré que cette forme d'azote pouvait être utilisée comme indicateur pertinent de la fertilité chimique du sol.

Tableau II : catégorisation de la qualité d'un sol en fonction de ses caractéristiques chimiques

Normes d'interprétation		Très pauvre	Pauvre	Moyen	Riche
	Ca ²⁺	< 1	1 à 2,3	2,3 à 3,5	>3,5
Bases échangeables (meq/100g)	Mg ²⁺	< 0,4	0,4 à 1	1 à 1,5	>1,5
	K ⁺	< 0,08	0,08 à 0,18	0,18 à 0,40	>0,40
Matière Organique de Sol %		< 0,60	0,60 à 0,75	0,75 à 0,90	>0,90

Source : Crétenet & Gourlot (2016).

Par ailleurs, la découverte d'une forte corrélation entre le N-NH₄⁺ et, d'une part, la capacité d'échange cationique (CEC) (Tié *et al.*, 2010), et d'autre part, le calcium échangeable (Tokpa *et al.*, 2020 ; Tokpa, 2021), souligne l'influence de ce paramètre sur la disponibilité des éléments nutritifs pour la plante. Ainsi, des valeurs seuils ont été définies pour ce paramètre : lorsque la teneur en N-NH₄⁺, extraite selon les méthodes décrites par Tié (1995) et Tié *et al.* (2010), se situe dans l'intervalle [0,55 ; 0,7] g.kg⁻¹, l'utilisation de l'azote apporté par la fertilisation s'avère peu efficace. En revanche, les sols présentant des teneurs en N-NH₄⁺

inférieures à cet intervalle exploitent mieux l'azote de la fumure (Tié, 1995 ; Tokpa *et al.*, 2019). De plus, des teneurs élevées en $N-NH_4^+$ peuvent induire des déséquilibres minéraux dans le sol, perturbant ainsi la nutrition minérale des plantes et affectant la production (Tokpa & Sery, 2023).

En complément, les recherches conduites par Tié (1995) sur le riz pluvial dans la région centre-ouest de la Côte d'Ivoire ont révélé des réponses variables de cette culture à la fumure azotée, en fonction des valeurs de $N-NH_4^+ / H_2O_2$. En effet, l'auteur a observé qu'au-delà de $0,80 \text{ g.kg}^{-1}$ de $N-NH_4^+ / H_2O_2$, l'efficacité de l'engrais azoté appliqué (200 NPK + 50 kg/ha d'urée) devenait négative, avec une intensité croissante de cette inefficacité (Figure 3).

À l'inverse, pour des valeurs inférieures à $0,5 \text{ g.kg}^{-1}$, la culture répond favorablement à la fumure azotée. L'évolution de la réponse de la culture du riz à la fertilisation azotée en fonction des valeurs de $N-NH_4^+ / H_2O_2$ suit la loi des accroissements moins que proportionnels, telle qu'énoncée par Mitscherlich (1909), qui constitue l'un des principes fondamentaux de la fertilisation (Figure 3).

Selon cette loi, lorsque l'on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, le rendement n'augmente pas proportionnellement au-delà d'un certain seuil ; en effet, un maximum est atteint, au-delà duquel tout apport supplémentaire n'est justifié ni d'un point de vue agronomique, ni d'un point de vue économique. Par conséquent, la fertilisation devrait viser l'atteinte d'un rendement économique optimal. Dans le cas du paramètre $N-NH_4^+ / H_2O_2$, l'apport d'azote au sol ne semble pas justifié au-delà de $0,80 \text{ g.kg}^{-1}$, l'optimum de rendement se situant entre $0,5$ et $0,80 \text{ g.kg}^{-1}$ de $N-NH_4^+ / H_2O_2$. Ainsi, l'intervalle de valeurs $[0,5 ; 0,80] \text{ g.kg}^{-1}$ de $N-NH_4^+ / H_2O_2$ a été considéré par l'auteur comme celui de la non-réponse à la fertilisation azotée.

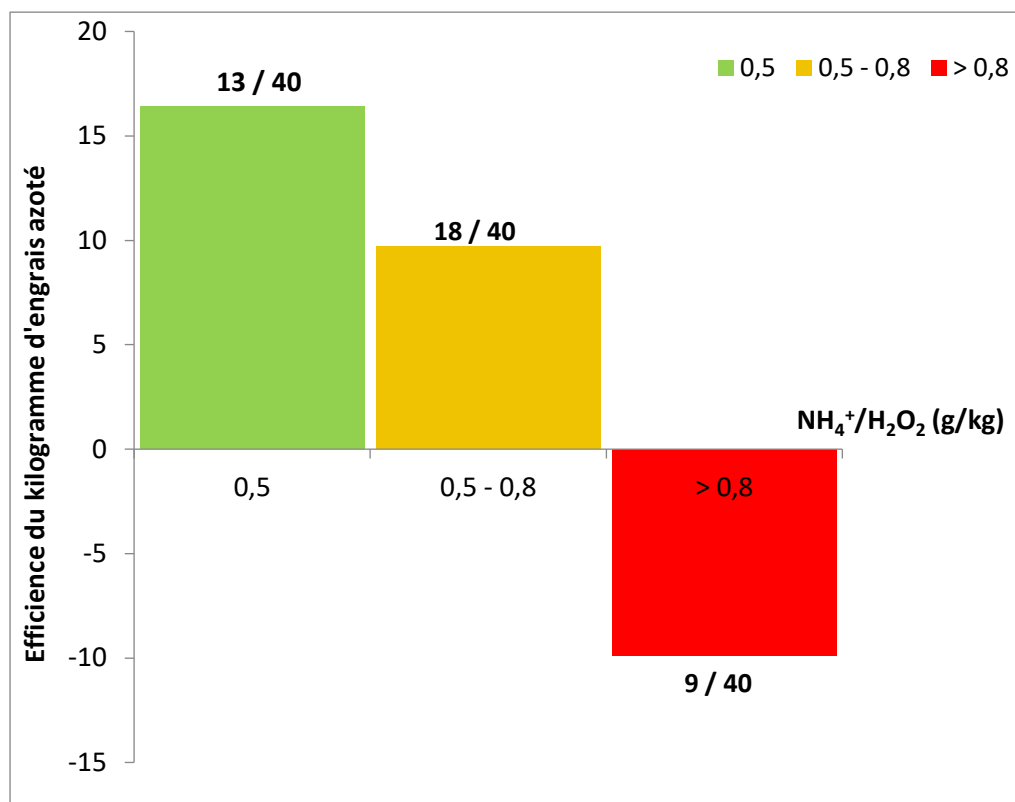


Figure 3 : évolution du kilogramme d'engrais azoté sous culture de riz suivant les valeurs de

$N-NH_4^+ / H_2O_2$

Source : Tié (1995)

1.3.2.3. Structure et texture du sol

La manière dont les différents constituants du sol sont assemblés à un moment donné (structure) et leurs proportions (texture) déterminent aussi la fertilité du sol. En général, les sols argileux sont plus fertiles que les sols sableux. En effet, comme la matière organique, l'argile retient l'eau et améliore le niveau de drainage du sol, assure la stabilité structurale et contribue à la formation de la CEC (Six *et al.*, 2002). La baisse du taux d'argile du sol est essentiellement due à l'érosion. Le compactage du sol en cas de motorisation excessive, est le plus souvent la dégradation de la structure du sol imputable aux pratiques culturales. La motorisation pulvérise et induit la prise en masse des particules du sol, augmente de 10 à 20% la densité apparente, traduisant ainsi la baisse de la porosité et réduit la stabilité du sol, en raison de l'augmentation du taux d'argiles dispersées (Balbino *et al.*, 2002 ; Neufeldt *et al.*, 1999).

1.3.2.4. Acidité du sol

Une bonne alimentation minérale des cultures exige des niveaux optimaux de certains paramètres du sol dont le pH en dehors des stocks minéraux qui doivent être élevés. Des valeurs trop faibles du pH entraverait la nutrition azotée et phosphatée tandis que des valeurs trop

élevées entraveraient la nutrition potassique et phosphatée. Les cultures tolèrent, à des degrés différents, les propriétés acido-basiques du sol. Le maïs tolère des pH allant de 6 à 8, le cotonnier de 6,5 à 7,5 tandis que le sorgho peut tolérer des valeurs aussi faibles qu'élevées (5,4 à 7,8).

1.3.2.5. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) joue un rôle majeur en tant que pouvoir tampon de la pression osmotique entre le milieu extérieur et les cellules des racines (Schvartz *et al.*, 2005 ; Diacono & Montemurro, 2010 ; Fardeau, 2015). Plus un sol est riche en argiles et en matières organiques, plus sa capacité à adsorber des cations est grande. Au contraire, plus un sol est riche en sable et pauvre en matières organiques, plus sa CEC est faible (Jacques, 2021). Le taux de saturation d'un sol en bases échangeables est le pourcentage de la CEC qui est occupé par des cations basiques tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ (Schvartz *et al.*, 2005 ; Jacques, 2021). Plus ce taux est élevé, plus il y a de cations nutritifs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) disponibles et le taux de saturation du complexe d'échange en bases l'est aussi (Schvartz *et al.*, 2005 ; Jacques, 2021).

Les sols ferrugineux et ferralitiques d'Afrique de l'Ouest sont dominés par la kaolinite qui est peu gonflante avec des CEC plus faibles (2 à 15 Cmol/kg), comparativement à celles de la montmorillonite (80 à 150 Cmol/kg) et de la vermiculite (10 à 200 Cmol/kg). Ainsi, la CEC de ces sols tropicaux est à près de 80% d'origine organique (Guibert *et al.*, 1999). Wiseman & Püttmann (2005) et Mikutta *et al.* (2006) ont également observé que l'argile contribue moins que les oxydes de fer à la formation de la CEC dans les particules fines du sol.

1.3.3. Changement climatique et fertilité du sol

Le changement climatique représente une menace pour la durabilité des sols à travers le monde. Il concourt à accentuer la dégradation du sol et la raréfaction des ressources organiques à l'échelle des écosystèmes (Youl, 2009). Plusieurs organismes internationaux de lutte contre le changement climatique, estiment que l'Afrique de l'ouest est l'une des régions les plus vulnérables du monde face au changement climatique. Cela est marqué par des signes évidents de changement observés au cours de ces dernières décennies.

Dans ces dernières années, les pays de l'Afrique de l'Ouest ont connu une réduction substantielle de la moyenne pluviométrique. Par ailleurs, une analyse de la pluviométrie montre une tendance significative du déplacement des isohyètes vers le sud à 200 km, qui reflète une diminution des précipitations à travers l'Afrique de l'Ouest. Cela se traduit par des saisons de

pluies plus courtes suivies de longues périodes de sécheresse pendant lesquelles l'évaporation et l'évapotranspiration atteignent des niveaux maximums (CSAO-SWAC *et al.*, 2008).

Une réduction de la moyenne des précipitations annuelles allant de 15 % à plus de 30 % a été enregistrée dans diverses régions depuis 1970. Celle-ci s'accompagne de sécheresses récurrentes et d'une grande variation au début des différentes saisons, ayant entraîné des baisses encore plus marquées des débits des fleuves (IUCN, 2004 ; ENDA *et al.*, 2007). Le débit d'eau du fleuve Niger a baissé de 30 % entre 1971 et 1989 ; ceux des fleuves Sénégal et Gambie ont chuté de près de 60 % contre une baisse des précipitations de l'ordre de 25 % en moyenne annuelle, dans le même bassin et pour les mêmes périodes de référence. Globalement, le débit moyen des grands fleuves de la région a subi une baisse de 30 % à 60 % depuis le début des années 1970. Cette variation très prononcée par rapport à la baisse des niveaux de précipitations s'explique par une combinaison de facteurs climatiques et une augmentation de la demande en eau (IUCN, 2004 ; CSAO-SWAC *et al.*, 2008). Les fortes sécheresses récurrentes qui ont eu lieu au début des années 70, dans la première moitié des années 80 et à la fin du XX^{ème} siècle, accélèrent la désertification, qui à son tour engendre une diminution de la productivité agricole, une réduction de la biodiversité, une dégradation de l'environnement et amoindrit la résilience des écosystèmes (Speth *et al.*, 2010).

1.3.4. Technique culturale et fertilité du sol

La technique culturale joue un rôle important dans la fertilité des sols (Bado, 2002 ; Recous *et al.*, 2015). De ce fait, en général, les producteurs prennent de plus en plus conscience de la nécessité d'une bonne fertilisation organo-minérale pour améliorer les rendements dans les systèmes de culture en générale (Camara, 2024). Avec le déploiement des conseillers agricoles dans presque toutes les zones de production de coton, les producteurs sont quotidiennement informés et encadrés pour l'adoption des techniques de production en adéquation avec les réalités du moment (Gbenahou, 2017).

Ainsi, ils sont permanemment informés sur les doses de fumure organique et de fumure minérale recommandées par la recherche. Mais une chose est de connaître et d'appliquer ces recommandations. En effet, la plupart des producteurs ne respectent pas les doses recommandées (Pouya *et al.*, 2013). En ce qui concerne la matière organique, on constate que, chaque année, la presque totalité des résidus de culture est exportée. Certains producteurs tentent souvent de compenser ces pertes en apportant du compost ; mais ce dernier est le plus souvent issu d'un compostage mal suivi et est donc de mauvaise qualité. En plus, il est très

souvent apporté trop tôt ou trop tard au champ et, au lieu d'être une solution aux problèmes de fertilité de la parcelle, il devient source d'autres problèmes tels que la prolifération des mauvaises herbes et des ravageurs des cultures.

Pour la fertilisation minérale, l'augmentation du prix des engrais minéraux et la diminution du prix du kilogramme de coton ces dernières années ont contraint les paysans à réduire considérablement leurs commandes et donc à apporter moins d'éléments minéraux aux cultures. Par conséquent, le bilan minéral des parcelles pendant une rotation coton-céréales est déficitaire pour certains des principaux éléments minéraux (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Les apports par la fertilisation organo-minérale ne compensent plus les exportations par les récoltes et résidus de culture. Les cultures se développent donc moins bien, les rendements baissent et les déficits minéraux des parcelles cultivées s'aggravent. Ces déficits minéraux chroniques conduisent à l'épuisement des sols en certains éléments minéraux, potassium et magnésium notamment (Gaborel, 2006).

1.3.5. Pression foncière et fertilité du sol

Le taux de croissance de la population est bien plus grand en Afrique subsaharienne que dans n'importe quelle autre région du monde. Cette forte croissance démographique en corrélation avec la pression foncière est l'une des causes de la dégradation des sols. Celle-ci a entraîné une raréfaction des terres disponibles, ce qui s'est traduit par un raccourcissement des périodes de jachère et une extension spatiale vers des zones marginales (Dugué, 2009). Une des préoccupations majeures des populations est l'accès à la terre, vu que des personnes en plus grand nombre doivent produire leur nourriture et vivre de la terre. Les systèmes traditionnels de gestion des sols demandent une disponibilité suffisante de terre permettant d'assurer de longues périodes de jachère destinées à maintenir la fertilité du sol (Maliki, 2013). Quand il n'y a plus de nouvelles terres à cultiver, la terre en jachère doit être remise en culture et la fertilité du sol chute.

1.4. NOTION DE FERTILISATION RAISONNÉE DES SOLS

La fertilisation raisonnée est une approche agronomique qui consiste à adapter les apports de fertilisants aux besoins des plantes tout en respectant l'environnement et la rentabilité économique de l'exploitation. Elle vise à optimiser la nutrition des cultures en tenant compte des facteurs spécifiques du sol, du climat et de la culture elle-même (Schvartz *et al.*, 2005). La fertilisation raisonnée des sols doit prendre en considération plusieurs facteurs : les besoins en éléments nutritifs des plantes, la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, les restitutions

d'éléments nutritifs par les résidus de récolte, la quantité et la forme chimique des éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux et le devenir des éléments nutritifs dans le système sol plante environnement (air, eau) ainsi que la rentabilité économique de la culture (Sokrat *et al.*, 2017).

L'agriculture raisonnée est fondée sur un principe de raisonnement global prenant en considération les finalités économiques, qualitatives, environnementales et sociales. La fertilisation raisonnée a pour but de fournir aux cultures les nutriments nécessaires, en adaptant les apports d'engrais aux besoins réels des plantes. Pour ce faire, elle prend en compte les éléments déjà présents dans le sol, le potentiel de rendement de la culture et d'autres facteurs environnementaux. Les outils développés pour aider l'agriculteur sont, entre autres, les analyses de sol qui permettent de connaître les éléments fertilisants présents dans le sol et les méthodes d'évaluation des besoins de la plante.

De plus, dans des situations à risques, l'agriculteur peut mettre en place des cultures intermédiaires qui piègent les nitrates et évitent les fuites d'azote en profondeur (Alaoui & Ajiro, 2005). La fertilisation raisonnée vise à équilibrer les besoins des cultures en éléments nutritifs avec les éléments déjà présents dans le sol et les fertilisants ajoutés pour une récolte satisfaisante en qualité et rendement (Claude, 2017). On peut utiliser, à cet effet, des fertilisants chimiques identiques aux éléments prélevés naturellement par les plantes dans le sol (Fardeau, 2015), lesquels éléments constituent les engrais minéraux qui sont ainsi des compléments indispensables pour obtenir une production végétale optimale, tout en maintenant la fertilité des sols (Ben Haddadi, 2021).

La fertilisation minérale connaît un progrès assez notable au cours des deux dernières décennies. Or, son emploi ne s'avère profitable que s'il est justifié par des données sur la fertilité du sol et sur l'apport en éléments fertilisants. D'une part, sur les sols très pauvres, on a parfois avantage à remettre dans le sol autant et même plus d'azote, de phosphore et de potasse que ce qui est enlevé par la culture. D'autre part, toute fertilisation de sols déjà très fertiles ou ayant bénéficié peu auparavant d'un apport important de fumier pourrait n'entraîner aucun profit additionnel et même nuire aux cultures et à l'environnement (Alaoui & Ajiro, 2005).

Une fertilisation optimale favorise l'obtention de rendements optimaux tout en maximisant la rentabilité des cultures. Elle contribue aussi à maintenir l'équilibre de la fertilité du sol et à éviter l'apparition de différents problèmes cultureux, comme les carences ou la croissance excessive des mauvaises herbes. Fertiliser sans excès permet aussi de réduire les

risques de contamination des eaux par les éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore (Martin, 2020). C'est en cela que la fertilisation raisonnée apparaît comme un maillon clé de l'agriculture durable.

1.5. NOTION D'AGRICULTURE DURABLE

L'agriculture durable se définit comme un modèle agricole qui cherche à produire de manière pérenne, tout en respectant les trois dimensions du développement durable, à savoir l'environnement, l'économie et la société (Assogba, 2014). Son objectif central est de répondre aux besoins alimentaires actuels sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs. Ainsi, elle vise non seulement à conserver les sols, l'eau et la biodiversité, mais également à favoriser une économie agricole viable et une justice sociale équitable. Autrement dit, elle consiste à appliquer concrètement les principes du développement durable à la production agricole (Godard & Hubert, 2002 ; Zahm et al, 2008 ; Assogba, 2014).

Dans cette perspective, l'agriculture durable s'efforce de maintenir la productivité des terres sur le long terme tout en réduisant son impact environnemental grâce à des pratiques respectueuses des ressources naturelles. Parmi les principes essentiels, figurent la conservation du sol, la gestion durable de l'eau, la préservation de la biodiversité, la limitation des intrants chimiques qui inclue la fertilisation raisonnée des sols, la réduction des déchets ainsi que la protection de la santé des agriculteurs et des consommateurs (Ahouangninou, 2013). Ces pratiques s'appuient d'ailleurs sur des processus naturels, tels que le recyclage des nutriments, la fixation biologique de l'azote, la diversification des cultures ou encore l'utilisation des auxiliaires biologiques pour lutter contre les ravageurs (Ahouangninou, 2013 ; Sall, 2015 ; Kangatlam, 2025).

Par ailleurs, ce modèle encourage un approvisionnement local et une économie circulaire, ce qui contribue à réduire à la fois la consommation d'énergie et la production de déchets. Sur le plan environnemental, il tend à préserver les écosystèmes agricoles et à limiter la dégradation des sols, la pollution des eaux et la perte de biodiversité (Turlin, 2016). À ce titre, il promet l'adoption de techniques telles que la rotation des cultures, l'agroforesterie, l'agriculture sans labour et la diminution de l'usage des pesticides et fertilisants chimiques. De plus, il vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à maintenir l'équilibre des cycles naturels (Turlin, 2016).

En ce qui concerne la dimension économique, l'agriculture durable cherche à garantir la rentabilité des exploitations sur le long terme. Cela suppose de générer des revenus stables pour

les agriculteurs, d'utiliser efficacement les ressources et de mettre en place une gestion financière responsable. De surcroît, elle tend à réduire la dépendance vis-à-vis des intrants importés et coûteux, tout en favorisant l'autonomie alimentaire locale (Roufaï, 2005) Sur le plan social, ce modèle prend en compte les conditions de travail des agriculteurs, la sécurité alimentaire ainsi que la qualité de vie des communautés rurales. Il s'agit donc de promouvoir une agriculture équitable, respectueuse des droits humains, qui soutienne la transmission des savoir-faire et favorise l'accès à une alimentation saine et suffisante pour tous. Dans cette logique, plusieurs pratiques se révèlent particulièrement pertinentes : la rotation des cultures pour améliorer la fertilité des sols et briser les cycles de ravageurs, l'agriculture biologique pour réduire l'usage d'intrants chimiques, l'agroforesterie afin d'intégrer arbres et cultures et diversifier les revenus, l'agriculture sans labour pour préserver la structure des sols, la gestion économe de l'eau ainsi que la préservation des espèces locales pour promouvoir la biodiversité agricole (Zahm et *al.*, 2008 ; Guessoum, 2018 ; Saadaoui, 2023).

En définitive, l'agriculture durable poursuit des objectifs majeurs, tels que la sécurité alimentaire à long terme, la résilience des écosystèmes agricoles, la lutte contre le changement climatique, la réduction de la pauvreté rurale et l'amélioration de la santé publique. Toutefois, elle doit relever plusieurs défis, notamment la croissance démographique mondiale, la dégradation des sols, la surexploitation de l'eau et la dépendance aux énergies fossiles (Zahm et *al.*, 2008). Malgré ces contraintes, ses avantages demeurent indéniables : elle contribue à améliorer durablement la productivité agricole, à protéger la biodiversité, à préserver la santé des sols et à réduire l'empreinte écologique de l'agriculture. Enfin, elle favorise une meilleure qualité de vie pour les agriculteurs et les consommateurs, tout en renforçant le développement économique des zones rurales et la résilience face aux aléas climatiques (Zahm et *al.*, 2008 ; Maalej, 2013).

1.6. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU MILIEU D'ÉTUDE

1.6.1. Localisation géographique

Les travaux ont été réalisés dans le bassin cotonnier du département de Ouangolodougou (Figure 4). Ce département est situé au Nord de la Côte d'Ivoire, dans la région du Tchologo. Il est limité par le département de Ferkessédougou au Sud-Est et par le département de Korhogo au Sud-ouest. La ville de Ouangolodougou est située à 614 km d'Abidjan et à 45 km de Ferkessédougou, entre 9°44'00" et 10°28'00" de latitude Nord et 5°00'00" et 5°50'00" de longitude Ouest (Koné, 2021). La ville est chef-lieu du département qui a une superficie de 17

728 km² et qui est une zone stratégique de développement du fait de sa proximité avec les capitales du Burkina Faso et de la République du Mali.

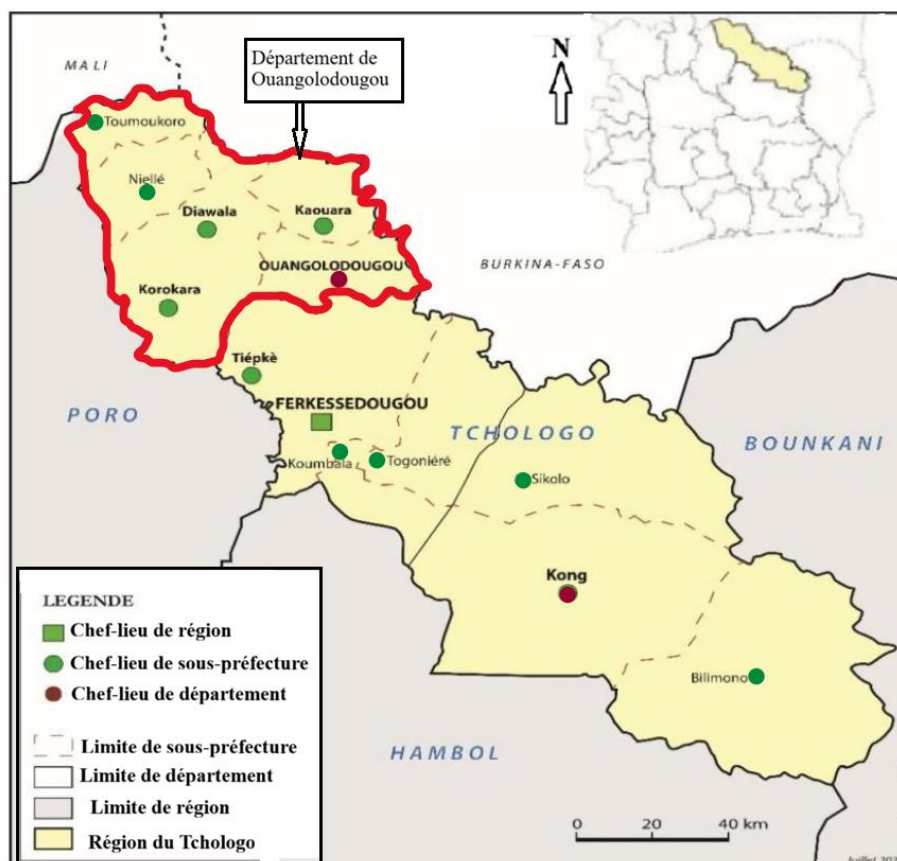


Figure 4 : carte de localisation géographique du département de Ouangolodougou

Source : CNTIG (2019).

1.6.2. Climat

La localité de production cotonnière de Ouangolodougou a un climat du type tropical de transition, du genre soudanien. Le climat est caractérisé par des amplitudes thermiques quotidiennes importantes avec une moyenne annuelle de 26° C et une humidité comprise entre 40 et 50 % (Yao, 2009).

La zone est marquée par une alternance de deux saisons : une saison sèche, de novembre à avril, caractérisée par l'harmattan avec pour points culminants en décembre et en février, et des pointes de chaleur, en mars et avril. La saison pluvieuse s'étend de mai à octobre avec des pics en août et septembre. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1000 mm et 1200 mm (Coulibaly *et al.*, 2016).

1.6.3. Végétation

Le département de Ouangolodougou appartient au domaine soudanien, caractérisé par une mosaïque de savane guinéenne (ou sub-soudanaise) boisée et une forêt galerie autour des cours d'eau (talwegs) qui abondent dans la zone selon la classification d'Aubreville (1949). *Lannea velutina* et *Terminalia avicennioides* constituent les arbres dominants dans les formations naturelles.

Dans les parcs agro forestiers, l'on rencontre des arbres fruitiers présents naturellement mais remaniés par les activités humaines, comme le baobab (*Andansonia digitata*), le néré (*Parkia biglobosa*), le raisinier sauvage (*Lannea microcarpa*), *Sclerocarya birrea*, le karité (*Vitellaria paradoxa*), le Jujubier (*Ziziphus mauritiana*) ou des arbres à usages multiples comme le Balanzan (*Faidherbia albida*). La strate herbacée est caractérisée par un recul de l'*Andropogon gayanus* et un recru d'*Andropogon pseudapricus*, *Cymbopogon giganteus* et *Pennisetum pedicellatum*, moins appréciées par le bétail. Les formations plus fermées sont composées de *Daniellia oliveri* et *Isobertinia doka*. (Koné, 2021). On y rencontre d'autres espèces telles que ficus (*Ficus sur*) et eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) (Pierre, 2020).

1.6.4. Sol et relief

Les formations géologiques de la zone de Ouangolodougou appartiennent au domaine éburnéen. On note plusieurs types de granites dont le type Baoulé de craton, le type Baoulé de géosynclinal (types Ferké et Koffisouka) et le type Bondoukou (Jourda *et al.*, 2006). Un ensemble de schistes et de roches vertes qui abrite une diversité de sols peu profonds sur granite ou gneiss dont les principales unités sont les sols ferrallitiques, hydromorphes de bas-fonds et sableux s'associent à ces granites. Le relief est peu accidenté, caractérisé par des plaines et des plateaux.

Ces sols ferrallitiques ont une couche arable peu profonde (40 à 60 cm), limitée par des indurations (Carapaces ou cuirasses) (Perraud, 1971 ; Bigot *et al.*, 2005, Coulibaly *et al.*, 2016). Ces sols ont des propriétés physiques généralement médiocres et présentent des contraintes d'aménagement (sols indurés peu profonds) (Yao, 2009). La région de Ouangolodougou a un relief caractérisé par des plateaux latéritiques, entrecoupés de monticules granitiques par endroit et une succession de plaines alluvionnaires.

1.6.5. Activités socio-économiques

Le département de Ouangolodougou est un important carrefour, notamment sur les routes qui conduisent au Burkina Faso et au Mali. De ce fait, cette situation géographique stratégique fait de Ouangolodougou un carrefour important pour les flux commerciaux et humains entre la Côte d'Ivoire et ces pays voisins (Ouedraogo, 2023). En effet, grâce à ses infrastructures de transport et à son positionnement frontalier, Ouangolodougou joue un rôle central dans la circulation de biens et de personnes, contribuant ainsi à l'essor de ses activités économiques. Ces dernières reposent principalement sur plusieurs piliers : l'agriculture, l'artisanat, le commerce, les services, et dans une moindre mesure, l'industrie agroalimentaire.

Par ailleurs, le département est favorable à l'agriculture vivrière et de rente, notamment avec les cultures de coton, maïs, mil, riz, sorgho, ainsi que des cultures d'exportation comme l'anacarde et la mangue. De plus, l'élevage de bovins et d'ovins constitue également une activité importante, contribuant non seulement à la diversité économique locale, mais aussi à la sécurité alimentaire (Ndiaye, 2020).

Il convient également de souligner que le commerce constitue une activité clé à Ouangolodougou, soutenu par une dynamique de marchés de proximité, comme celui récemment inauguré à Torla, qui facilite l'échange de produits agricoles, artisanaux et divers produits importés ou locaux. Enfin, l'artisanat local, marqué par des productions artisanales variées, est aussi un moteur économique notable qui génère, selon les enquêtes, une grande part des revenus de la population (Ndiaye, 2020).



DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

2.1. MATERIEL

Pour la réalisation de l'expérimentation, plusieurs types de matériel ont été utilisés. Ce matériel comprend : un matériel édaphique, un matériel végétal, un matériel technique de terrain, un matériel de laboratoire, des intrants chimiques et un matériel de traitement statistique des données.

2.1.1. Matériel édaphique

Les sols utilisés dans cette étude sont ceux des parcelles cotonnières des localités de Barrovogo, Benifesso, Dabavogo, Diaratchè, Gnanmandô, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Nambolvogo, Nironigué, Ouangolodougou, Oumarvogo, Pleuhouo, Soumailavogo et Torla situés toutes dans le département de Ouangolodougou. Trente échantillons de ces sols en raison de deux échantillons par localité ont servi à déterminer leurs caractéristiques chimiques. Certains de ces échantillons de sol sont représentés sur la Figure 5.



Figure 5 : quelques échantillons de sols prélevés à Nambigué

2.1.2 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de semence du cotonnier *Gossypium hirsutum* Linné, espèce cultivée en Côte d'Ivoire. La semence utilisée est la variété Gouassou F1 (Figure 6), recommandée et distribuée gratuitement aux agriculteurs par la Société d'Exploitation Cotonnière (SECO). Cette variété est vulgarisée pour ses performances agronomiques (Tableau III).



Figure 6 : semence de coton de la variété Gouassou F1

Tableau III : performances agronomiques de la variété Gouassou F1

Caractéristiques	Description
Cycle végétatif	Moyen à précoce
Potentiel de rendement	Elevé souvent > 2,5 t/ha en conditions optimales
Rendement fibre	Elevé
Fibres	Bonne longueur, résistance élevée,
Tolérance/Résistance	Bonne tolérance aux maladies foliaires et meilleure tolérance aux insectes ravageurs
Vigueur	Très forte vigueur végétative dès le semis

2.1.3. Matériel technique de terrain

Plusieurs outils (Figure 7) ont été utilisés sur le terrain. Ces outils comprennent une machette qui a permis de débroussailler les parcelles, quand un GPS « Global Positioning System » permettait de déterminer les positions géographiques des fosses. Les prises de vue des fosses et de leurs environnants ont été réalisées à l'aide d'un appareil photo numérique de marque CANON. La délimitation des parcelles, ainsi que les mesures des distances ont été effectuées en utilisant un ruban-mètre de 100 mètres de longueur. Les fosses pédologiques ont été creusées à l'aide de pioches et de pelles. Pour la description des profils, une daba a servi à rafraichir les faces des fosses. La couleur des horizons a été déterminée à l'aide du code Munsell. Un couteau de pédologue a été employé pour délimiter les horizons. Une tarière a servi à prélever les échantillons de sols sur toutes les parcelles.



Figure 7 : quelques matériels de terrain utilisés

A- Couteau de pédologue ; B- Appareil photographique de marque CANON ; C- Ruban-mètre ; D- Code Munsell ; E- GPS

2.1.4. Matériel de laboratoire

Au laboratoire, deux types de matériel ont été utilisés (Figure 8), l'un pour préparer les échantillons de sol aux analyses et l'autre, pour les analyses proprement dites.

Le matériel de préparation des échantillons de sol comprend une balance électronique de précision et un broyeur centrifuge à billes qui, dans cet ordre, ont permis, la pesée des échantillons de sol à analyser, puis le broyage de ces échantillons. Aussi, un agitateur mécanique à mouvement de va-et-vient a été utilisé pour l'homogénéisation des solutions des sols.

Pour les analyses, une centrifugeuse a été utilisée pour la séparation granulométrique des échantillons de sol. Le matériel d'analyse comprend aussi, des fioles et béciers pour recueillir les solutions de sols, un spectromètre d'absorption atomique (SAA) pour le dosage des bases échangeables et du phosphore, un pH-mètre électronique pour mesurer le pH du sol et un distillateur Kjeldahl pour doser l'azote.

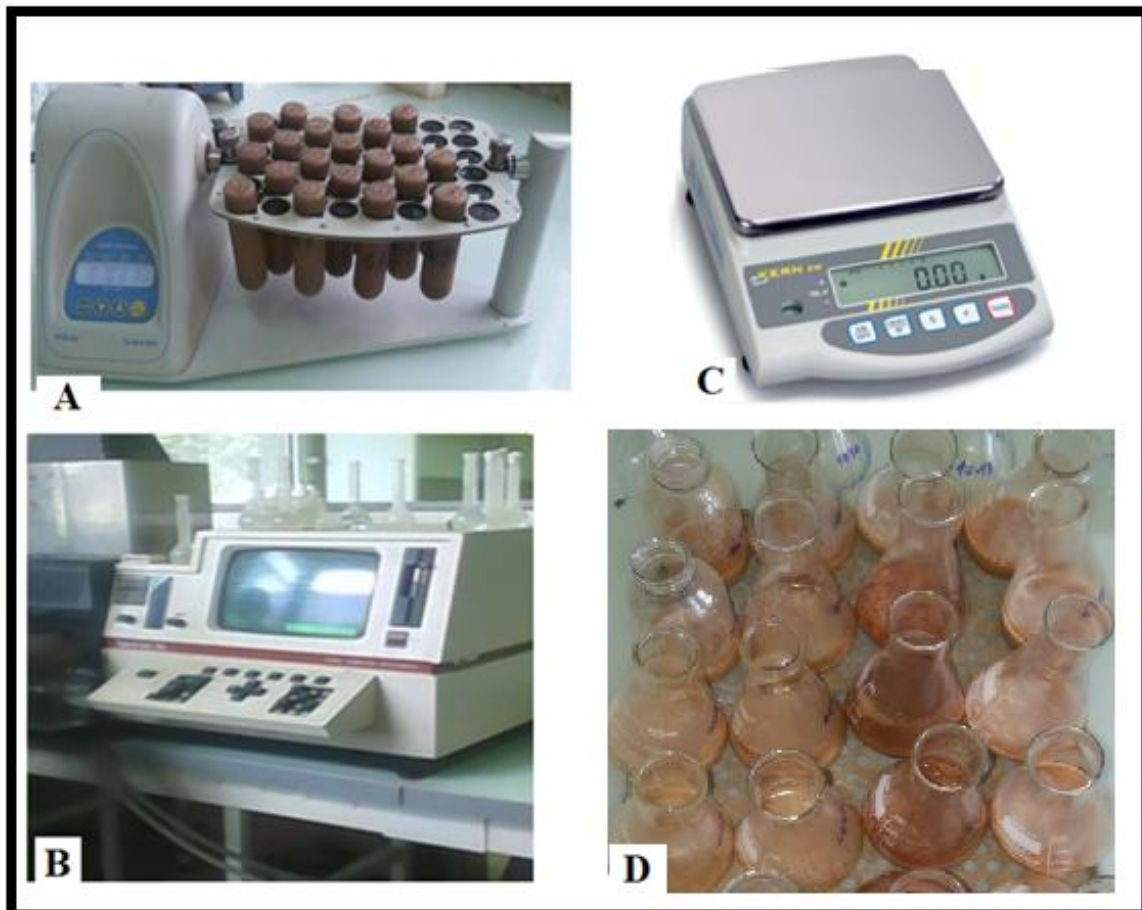


Figure 8 : quelques équipements de laboratoire utilisés

A- Agitateur mécanique ; B- Spectromètre d'absorption atomique ; C- Balance électronique de précision ; D- Fioles

2.1.5. Intrants chimiques

Les intrants utilisés comprennent des engrais minéraux et des insecticides. Les engrais minéraux, à savoir, le NPK (15-15-15), l'urée (46 % de N), la dolomie (30 % CaO) et le chlorure de potassium KCl (60 % de K₂O) ont servi à fertiliser les sols. Les insecticides utilisés sont le Thalis 56 EC, le Duel 336 EC et le Conquest 88EC. Ils ont servi à lutter contre les ravageurs du cotonnier.

2.1.6. Matériel de traitement statistique des données.

Pour cette étude, deux logiciels ont été utilisés : le tableur Excel version 2016, pour la saisie des données et la réalisation des analyses statistiques descriptives, notamment le calcul des moyennes et des écarts-types, et le logiciel R, employé pour effectuer l'analyse de variance (ANOVA) des moyennes des variables évaluées. Ce logiciel a permis aussi de déterminer les corrélations entre les paramètres agronomiques du cotonnier.

2.2. METHODES

L'étude a été menée en trois phases successives conformément aux objectifs visés. La première phase est une caractérisation morphologiques *in situ* des sols des parcelles de coton. Cette phase a été suivie de la détermination des caractéristiques chimiques des sols étudiés et de la formulation de la fertilisation à leur appliquer. Enfin, les doses d'engrais déterminées ont été appliquées, avec une évaluation des effets sur la culture du cotonnier.

2.2.1. Caractérisation morphopédologique et chimique des sols sous cotonnier

2.2.1.1. Caractérisation morphopédologique des sols sous cotonnier

2.2.1.1.1. Choix des parcelles

Une prospection préalable a été effectuée dans les 15 sections de la Société d'Exploitation Cotonnière (SECO), mandatée par le Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricole (FIRCA) pour accompagner les producteurs de coton de la Région du Tchologo afin de choisir les parcelles. Ces 15 sections ont été toutes retenues pour notre étude. Elles sont toutes situées dans le département de Ouangolodougou dont 12 dans la localité de Ouangolodougou (Barrovogo, Benifesso, Diaratchè, Gnanmandô, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Nironigué, Ouangolodougou, Oumarvogo, Pleuhouo, et Torla) et trois dans la localité de Kaoura (Dabavogo, Nambolvogo et Soumailavogo). Les parcelles retenues dans ces 15 sections sont celles des producteurs qui respectent l'itinéraire technique préconisé par la Société d'Exploitation Cotonnière (SECO).

Cet itinéraire technique repose sur des principes agronomiques rigoureux et une gestion intégrée des cultures. Il commence par une préparation minutieuse du sol, comprenant le défrichage, le travail du sol et la gestion des résidus. S'ensuivent des densités de semis adaptées aux variétés cultivées ainsi que les périodes de semis, généralement entre mai et juin. L'itinéraire prévoit aussi le traitement des semences par des insecticides et fongicides, un désherbage régulier et l'élimination des plants faibles (démariage). Par ailleurs, il est essentiel de respecter le calendrier des traitements phytosanitaires, d'alterner les familles de pesticides et d'appliquer les doses prescrites. La récolte doit être espacée dans le temps et réalisée à l'aide de sacs spécifiques permettant le tri sur le champ.

Pour couvrir l'ensemble des sections du bassin de production de Ouangolodougou, 30 parcelles cotonnières d'au moins un hectare chacune ont été sélectionnées, avec deux parcelles choisies dans chaque section (Figure 9).

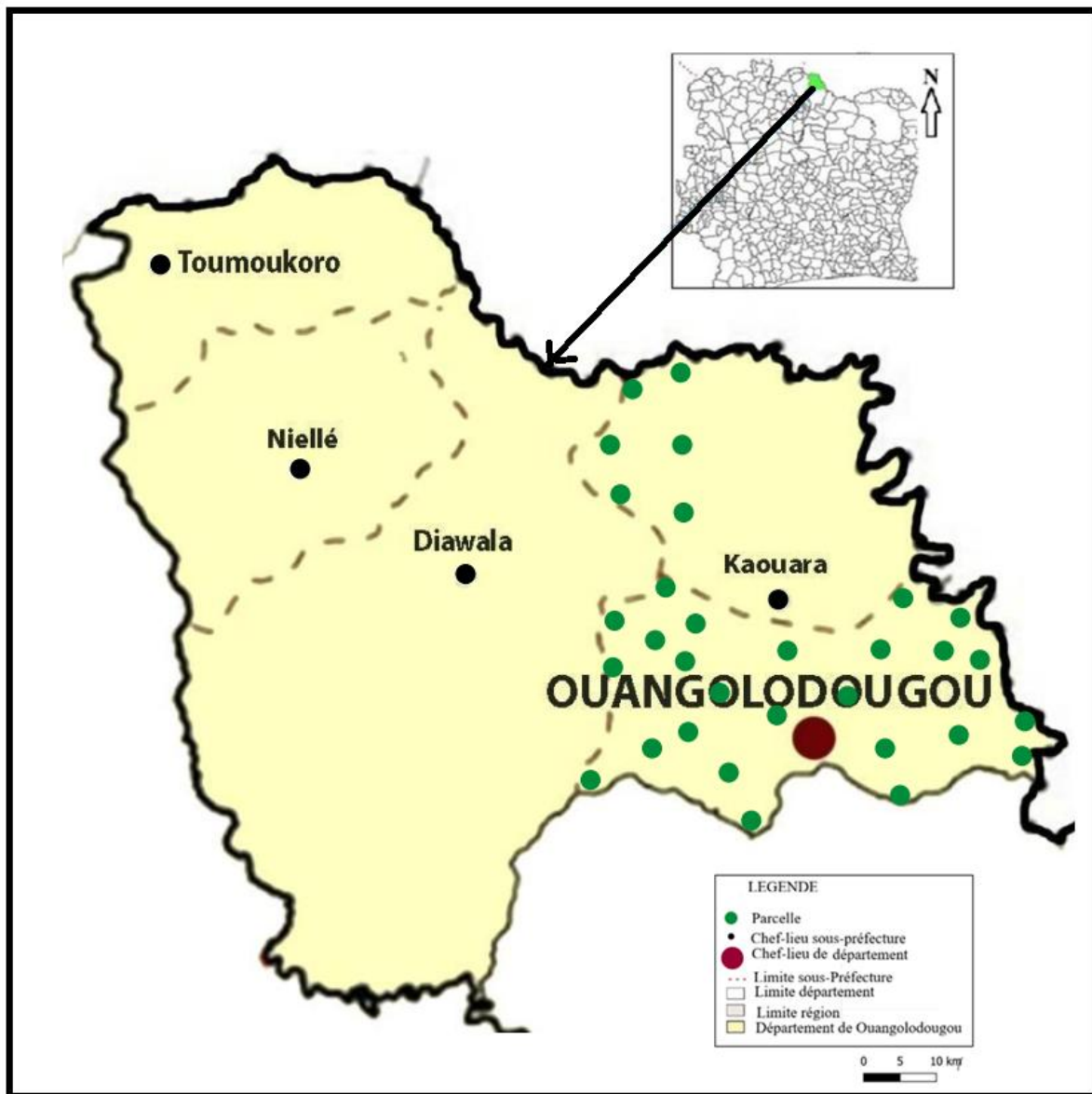


Figure 9 : localisation des parcelles choisies

2.2.1.1.2. Ouverture des fosses

Dans chaque parcelle paysanne choisie, deux fosses pédologiques ont été ouvertes manuellement. Chaque fosse présente des dimensions de 100 cm de longueur, 80 cm de largeur et une profondeur de 100 cm. Avant l'ouverture des fosses, l'état de l'environnement des fosses (pente, utilisation des sols, affleurement) a été décrit.

2.2.1.1.3. Description morphologique des sols

La description des sols a été faite en se basant sur les paramètres morpho-pédologiques définis par Boyer (1982) pour l'évaluation des sols agricoles. Ces paramètres concernent : la profondeur utile et les caractéristiques associées, la compacité, la proportion d'éléments

grossiers, l'hydromorphie, le drainage interne, la couleur, l'humidité des horizons, la texture et la structure. La base de dénomination employée (Aubert, 1965) repose sur celle établie par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS).

2.2.1.1.3.1. Détermination de la profondeur utile du sol et caractéristiques associées

❖ Profondeur utile et épaisseurs des horizons des sols

La profondeur et l'épaisseur des horizons du sol ont été mesurées à l'aide d'un mètre ruban. Ces paramètres peuvent être limités par des caractéristiques, qui ont été également évaluées ; il s'agit de la compacité des horizons et de l'hydromorphie à faible profondeur.

❖ Compacité des horizons des sols

La compacité du sol a été appréciée par le test de pénétration réalisé en enfonçant un couteau de pédologue sur la face verticale de l'horizon (Ardouin, 2014). Cinq degrés d'appréciation ont été retenus :

- l'horizon est meuble, lorsque le matériau obtenu est non cohérent (le couteau pénètre sans effort jusqu'à la garde);
- l'horizon est peu compact, lorsque seul un léger effort est nécessaire pour enfoncer le couteau jusqu'à la garde ;
- l'horizon est moyennement compact, lorsque l'enfoncement du couteau jusqu'à la garde requiert un effort important ;
- l'horizon est compact, lorsque le couteau ne pénètre pas complètement, même sous un effort important ;
- l'horizon est très compact, lorsque le couteau ne peut pénétrer dans le sol.

❖ Hydromorphie et drainage interne des horizons des sol

L'hydromorphie des horizons du sol a été évaluée par l'observation des taches résultant d'un excès d'eau temporaire ou permanent dans ces horizons. Concrètement, il s'est agi d'identifier et de mesurer, sur la surface des horizons d'un profil pédologique, les taches d'oxydo-réduction, caractérisées par l'alternance de taches rouille et gris-verdâtre décolorées. Ces marques sont causées par la stagnation temporaire ou permanente de l'eau, liée à l'imperméabilité du sol ou à un drainage interne insuffisant.

2.2.1.1.3.2. Détermination de la couleur des horizons

La couleur des différents horizons a été déterminée à l'aide du code Munsell (1988). Cette méthode a consisté à prélever une motte de sol humide et à la comparer aux différentes couleurs référencées dans le code Munsell, qui sont classées selon la nomenclature anglo-saxonne (Value, Hue, Chroma). La couleur a permis ainsi d'apprécier le drainage interne du sol : une couleur homogène traduit un bon drainage interne, tandis qu'une coloration hétérogène indique un phénomène d'hydromorphie temporaire. Ce dernier suggère une circulation d'eau dysfonctionnelle dans le sol, pouvant entraîner des processus d'oxydoréduction, sources d'asphyxie pour les plantes.

2.2.1.1.3.3. Détermination de l'humidité du sol

L'humidité du sol sur le terrain a été estimée à l'aide de sensations tactiles, complétées par d'autres perceptions telles que le comportement mécanique des échantillons (un échantillon plastique et malléable étant perçu comme humide, tandis qu'un échantillon friable ou fragile semble seulement frais ou sec). Cinq modalités sont reconnues selon STIPA (1982) :

- horizon sec, lorsqu'aucune humidité n'est décelable ;
- horizon frais et humide, quand une motte de sol est malléable, avec une humidité proche de la capacité au champ et absence d'eau libre ;
- horizon très humide, lorsque l'on observe la présence débutante d'eau libre ;
- horizon noyé, lorsque l'eau libre est présente et saturant tout ou une partie de la porosité.

2.2.1.1.3.4. Estimation de la texture des horizons du sol

L'estimation de la texture des horizons a été réalisée de manière tactile, suivant la méthode décrite par Delaunois *et al.*, (2013). Pour chaque horizon, une motte de sol a été prélevée puis tamisée à travers un tamis de mailles de 2 mm de diamètre. Le sol fin obtenu a été humidifié afin d'en apprécier la texture. Une texture sableuse à sable grossier (plus de 50 % de sable) se caractérise, au toucher, par une rugosité prononcée, avec des grains de sable visibles à l'œil nu et un effritement rapide de l'échantillon entre les doigts. Dans le cas d'une texture sableuse à sable fin, le toucher est rugueux mais doux. Pour les limons, le toucher est lisse et soyeux, comparable à la sensation du talc. Pour apprécier les taux d'argile, la méthode du boudin a été utilisée. Les sols qui collent aux doigts sans qu'il soit possible de former un boudin contiennent environ 17 à 20 % d'argile. En revanche, lorsque la pâte obtenue peut être façonnée comme une pâte à modeler, avec possibilité de rouler un anneau à partir du boudin, le taux d'argile est

supérieur à 30 %. Un tel sol forme une plaquette, souvent brillante, à la surface du doigt sur lequel il adhère.

2.2.1.1.3.5. Détermination de la structure des horizons du sol

La structure du sol est généralement déterminée par observation visuelle de l'arrangement des éléments constitutifs les uns par rapport aux autres (Roger Estrade *et al.*, 2004). Lorsque les particules du sol sont reliées en agrégats par les colloïdes argilo-humiques formant des grumeaux, la structure est qualifiée de structure grumeleuse donc bonne pour l'activité agricole. À l'inverse, si les particules sont étroitement liées, souvent par un ciment argileux, la structure est considérée comme compacte, rendant le sol impropre à l'activité agricole. Lorsque les particules s'agrègent en blocs de forme polyédrique (plusieurs faces planes ou arrondies, angles plus ou moins vifs) sans orientation dominante, la structure est dite polyédrique. Cette structure polyédrique peut être anguleuse (arêtes très vives) ou sub-anguleuse (arêtes émoussées). Si les particules élémentaires (sable, limon, argile) sont peu agrégées et restent indépendantes les unes des autres, formant un ensemble peu organisé, la structure est qualifiée de structure fragmentaire ou particulaire.

2.2.1.2. Caractérisation chimique des sols sous cotonnier

2.2.1.2.1. Prélèvement des échantillons de sol

Le prélèvement des échantillons de sol a été effectué juste après les premières pluies du mois de mai 2018. Le terrain étant généralement plat et homogène, 20 prises de terre ont été réalisées dans les billons sur l'ensemble de la surface à l'aide d'une tarière afin de constituer un échantillon composite par hectare, suivant la méthode de Tié (2019). La tarière a été enfoncée verticalement dans le sol jusqu'à 15 cm, correspondant à la profondeur utile exploitée par les racines assimilatrices (Tié, 2019). Celle-ci a été tournée pour couper et prélever une carotte de sol entière, puis retirée délicatement. Le contenu de la tarière (sol) a été recueilli dans un seau. Au fur et à mesure des prélèvements, les échantillons ont été mélangés dans le seau afin de constituer un échantillon composite par hectare. Les prélèvements ont été réalisés le long des lignes non croisées espacées de 20 m, en respectant une distance minimale de 25 m entre les points de prélèvement et 1 m entre les lignes et les bordures du terrain (Figure 10). D'un site à un autre, la tarière est nettoyée à l'eau pour éviter toute contamination croisée.

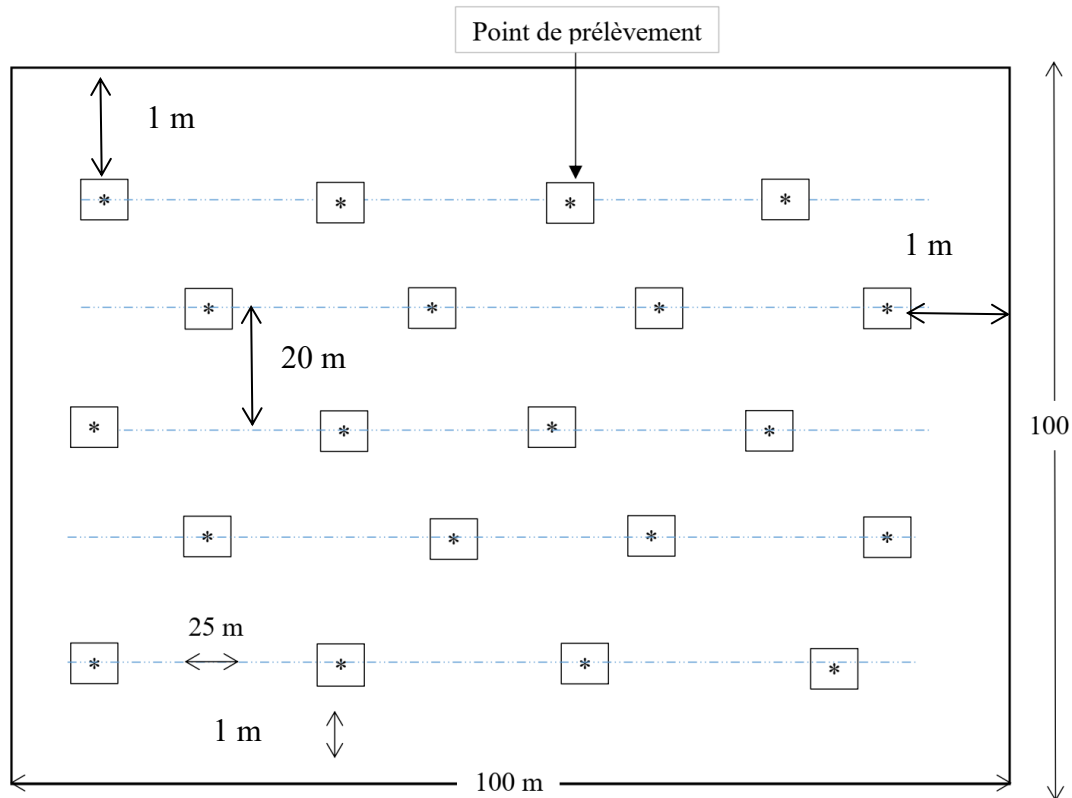


Figure 10 : dispositif de prélèvement des échantillons de sol sur une parcelle

2.2.1.2.2. Préparation des échantillons de sol en vue des analyses chimiques au laboratoire

Les échantillons de sol prélevés ont été séchés à l'air libre, à l'ombre et à l'abri de la pluie, pendant au moins une semaine, sur du papier journal. Une fois secs, ils ont été émiettés manuellement puis tamisés à l'aide d'un tamis de maille de 2 mm afin d'isoler la fraction fine du sol (tamisât), destinée aux analyses en laboratoire.

2.2.1.2.3. Détermination des caractéristiques chimiques des sols au laboratoire

Un aliquote de 1 kg de la fraction fine de chaque échantillon composite de sol a été emballé dans un sachet plastique, étiquetés et acheminé au laboratoire d'Analyse des Sols et des Végétaux (LAVESO) de l'École Supérieure d'Agronomie (ESA), situé à l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro. Les caractéristiques des sols déterminées sont : le pH, le statut organique (carbone et matière organiques), l'azote ammoniacal (N-NH_4^+) et nitrique (NO_3^-), le phosphore assimilable (Pass), ainsi que les bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Les analyses réalisées ainsi que les méthodes employées sont listées dans le tableau IV.

En effet, le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre (Diack & Loum, 2014). La méthode consiste à mettre dans un bécher propre et secs, 20 g d'échantillon de sol

tamisé plus 50 ml d'eau distillée. La solution obtenue a été homogénéisée manuellement pendant quelques secondes. Une fois homogénéisée la solution a été laissée au repos pendant 30 mn. La lecture a été faite à l'aide du pH-mètre.

Les teneurs en carbone organique ont été déterminées par la méthode de Walkley & Black (1934), alors que l'azote total a été dosé par la méthode de Kjeldahl (Diack & Loum, 2014). La méthode de détermination du carbone organique consiste à ajouter une solution de bichromate de potassium à un échantillon en présence d'acide sulfurique. Après la réaction, le dosage de la quantité de bichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon permet d'établir la concentration de carbone organique total (Yoboué *et al.*, 2018).

Quant à la mesure de l'azote total, une première étape ou digestion en milieu acide, transforme tous les composés organiques azotés en azote ammoniacal ; dans la seconde étape, les ions ammonium sont dosés par un système automatisé, les ions ammonium réagissent avec du salicylate, du nitroferricyanure et de l'hypochlorite de sodium pour former en milieu alcalin un complexe salicylate ammoniacal, dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration d'azote ammoniacal (Benjamin, 2023).

Le phosphore assimilable a été dosé selon la méthode d'Olsen modifiée (Olsen & Sommers, 1982). Le principe de cette méthode consiste à extraire le phosphore assimilable par la solution de fluorure d'ammonium (NH_4F) et d'acide chlorhydrique (HCl) selon la méthode Bray I. L'extraction du phosphore total a été faite par l'attaque perchlorique à chaud sur 1 gramme de sol broyé. Le dosage a été effectué par colorimétrie en présence de vanadomolybdate. Les teneurs en NO_3^- sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique. Le N-NH_4^+ du sol a été déterminé selon la méthode de Tié (1995) : 5 g de terre fine tamisée à 2 mm sont mis en contact avec 25 ml de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à 50% de qualité technique. Ensuite, la suspension obtenue est mise à l'étuve à 60 °C pendant 6 h puis dilué avec du KCl (1 M). Le mélange est filtré puis distillé selon la méthode Kjeldahl (Scarf, 1988). Les bases échangeables sont extraites par la méthode de saturation à l'ammonium à $\text{pH}=7$. Les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (Pansus & Gautheyrou, 2003). La CEC est mesurée sur les sols désaturés issus de l'extraction des bases échangeables.

Tableau IV : énumération des méthodes d'analyses des propriétés chimiques des sols

Variables mesurées	Méthodes
pH _{eau}	pH-mètre à électrode de verre (Diack & Loum, 2014)
Carbone organique (C)	Walkley & Black (Walkley & Black, 1934)
Matière organique	MO = 1,724 x C
Azote total (Nt)	Kjeldahl modifiée (Diack & Loum, 2014)
Phosphore assimilable	Olsen modifiée (Olsen & Sommers, 1982)
Calcium (Ca ²⁺)	Spectromètre d'absorption atomique (Pansu & Gautheyrou, 2003)
Magnésium (Mg ²⁺)	
Potassium (K ⁺)	
Sodium (Na ⁺)	
NO ₃ ⁻	Hach-2400 (Mehlich 2) (Anonyme,2002).
N-NH ₄ ⁺	Méthode de Tié (1995) Kjeldahl (Diack & Loum, 2014)
CEC	Dosage à l'acétate d'ammonium
Somme des bases échangeables (SBE)	SBE = Ca ²⁺ +Mg ²⁺ + K ⁺
Taux de saturation en bases	V = SBE/CEC ×100

2.2.2. Détermination des doses d'engrais adaptées aux sols sous cotonnier par la technique

N-NH₄⁺

Le niveau de fertilité des sols a été déterminé selon la démarche de diagnostic proposée par Tié (1995). Cette méthode est basée sur la manière dont la somme des bases échangeables (SBE) évolue dans le sol en fonction du taux d'azote minéralisable (N-NH₄⁺). En général, cette évolution se fait suivant une courbe qui croit jusqu'à atteindre un maximum autour duquel un plateau se dessine, puis la courbe décroît. La figure 11 montre un exemple d'application de cette méthode (Tié, 2019).

La zone de croissance exprime un besoin d'apport de fertilisants minéraux, notamment l'azote, le potassium et le phosphore. La zone de décroissance traduit quant à elle, un apport d'amendements calcique, magnésique et une fertilisation minérale phosphatée. La zone de plateau équivaut aux sols fertiles où il n'y a pas nécessité d'apport de fertilisant.

Par ailleurs, pour diagnostiquer les équilibres minéraux et juger de la carence relative des minéraux, les caractéristiques de ces équilibres chimiques doivent être déterminées et comparées à leurs seuils, notamment les rapports Mg^{2+}/K^+ , Ca^{2+}/Mg^{2+} et K^+/CEC qui renseignent sur les carences en bases échangeables. Pour le rapport Mg^{2+}/K^+ , la fourchette recherchée va de 3 à 25. Cette fourchette signale un bon équilibre, favorisant l'absorption du magnésium sans excès de potassium (Smith *et al.*, 2022). En ce qui concerne le rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} , cette fourchette s'étend de 3 à 5 indiquant ainsi un bon équilibre pour la plupart des cultures (Kumar *et al.*, 2023). Le rapport K^+/CEC se situe entre 2 à 5% de la CEC totale pour une bonne disponibilité selon Jones (2021).

L'état de fertilité des sols ayant été déterminé, une fertilisation adaptée à chaque niveau de déficience des sols a été conçue au laboratoire pour être testé en plein champ lors des essais agronomiques. Cette fertilisation adaptée à chaque niveau de déficience des sols est présentée dans le tableau V.

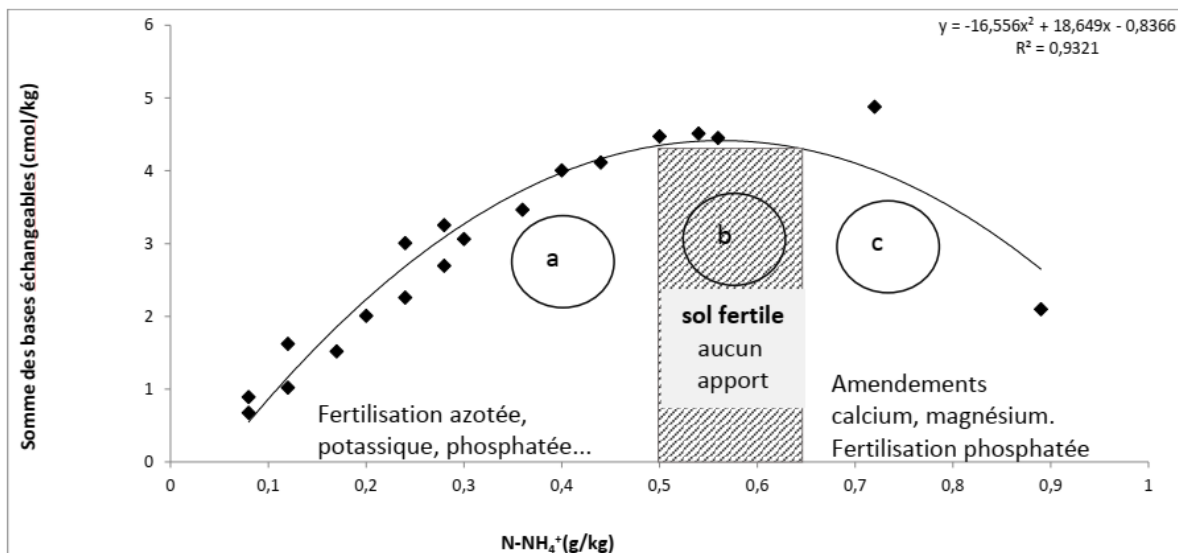


Figure 11 : pratique de fertilisation du sol recommandée selon la relation SBE-(N-NH₄⁺)

- SBE : Somme des Bases Echangeables ;
- a : phase de croissance de la courbe ; b : plateau ; c : phase de décroissance de la courbe.

Source : Tié (2019)

Tableau V : doses des fertilisants

Etat de fertilité	Engrais	Dose/ha	Nombre de sacs d'engrais/ha
Déficiência en N, P, K ⁺ et Ca ²⁺	NPK (15-15-15)	200 kg	4
	Dolomie (CaMg(CO ₃) ₂) à 30 % CaO	100 kg	2
	Urée (46 % N)	50 kg	1
	KCl (60 % K ₂ O)	50 kg	1
	NPK (15-15-15)	200 kg	4
Déficiência en N, P et K ⁺	Urée (46 % N)	50 kg	1
	KCl (60 % K ₂ O)	50 kg	1
	NPK (15-15-15)	200 kg	4

2.2.3. Evaluation des effets de la fertilisation raisonnée sur les paramètres agronomiques du cotonnier

2.2.3.1. Conduite des essais agronomiques

La conduite des essais portait sur l'évaluation des doses d'engrais apportées au sol. Pour ce faire, un dispositif expérimental a été mis en place. En effet, dans chaque section, deux parcelles paysannes d'une superficie d'un hectare ont été délimitées. Une parcelle a servi de témoin et a été fertilisée uniquement avec du NPK (15-15-15). La seconde parcelle, dite parcelle test, a bénéficié d'apports correspondants à la recommandation prédéterminée en utilisant l'approche N-NH₄⁺ (Tié, 1995). Il s'est agi d'apporter par hectare, 200 kg de NPK (15-15-15), 100 kg de dolomie à 30 % CaO, 50 kg d'urée à 46 % N et 50 kg de KCl à 60 % K₂O. En fonction des carences identifiées (TableauV), les parcelles test ont été fertilisées soit avec du NPK+Dolomie+urée+KCl ou soit du NPK+urée+KCl afin de diversifier les sources des éléments minéraux à apporter. Le premier est apporté lorsqu'il y a un déficit de Ca²⁺. Les sources de K⁺ sont diversifiées (NPK et KCl) ainsi que celles de l'azote (N). La dolomie (CaMg (CO₃)₂) apporte quant à elle le Ca²⁺ et le Mg²⁺. Le phosphore est apporté par le NPK. L'expérimentation ainsi réalisée comporte plusieurs étapes décrites par ce qui suit.

2.2.3.2. Préparation du sol

La préparation du sol a débuté par le défrichage. Un labour a été réalisé ensuite pour ameublir le sol par retournement du sol en bandes découpées à l'aide d'attelages bovins. Enfin, le billonnage a été réalisé à l'aide des bœufs de culture attelés.

2.2.3.3. Semis

Les semis ont été effectués dans les 30 parcelles le même jour, sur les billons, en poquets et en lignes, à l'aide d'un semoir. La distance entre deux lignes de semis était de 80 cm, avec un écartement de 40 cm entre les poquets. 15 à 20 kg de semences de coton ont été utilisées par hectare, à raison de trois à cinq graines par poquet fermé. Un démariage a été réalisé 15 jours après la levée (JAL), et a consisté à ne conserver que deux plants vigoureux par poquet.

2.2.3.4. Application des doses d'engrais

L'application des doses d'engrais figure dans le tableau VI. L'épandage de la dolomie (30 % CaO) a été réalisé sur la parcelle test avec déficit de Ca²⁺ lors du labour. Quant au NPK (15-15-15), il est mis en poquets fermés situés à environ 5 à 10 cm de la ligne de semis, sur les deux types de parcelles (témoin et test) 20 jours après le semis (20 JAS), juste après le démariage. Son application a été suivie d'un canadiennage effectué le même jour. Les épandages de l'urée (46% N) et du KCl (60% K₂O) ont été réalisés 40 jours après semis (40 JAS) sur les parcelles test, le long de la ligne de semis, à environ 5 cm des plants.

Tableau VI: application des doses d'engrais

Parcelles	Engrais	Dose/ha	Semis		
			Labour	20 JAS	40 JAS
Témoin	NPK (15-15-15)	200 kg		+	
	NPK (15-15-15)	200 kg		+	
	Dolomie (30 % CaO)	100 kg	+		
	Urée (46 % N)	50 kg			+
	KCl (60 % K ₂ O)	50 kg			+
Test	NPK (15-15-15)	200 kg		+	
	Urée (46 % N)	50 kg			+
	KCl (60 % K ₂ O)	50 kg			+

+ : épandage

2.2.3.5. Traitements insecticides

Les traitements insecticides ont commencé 45 jours après semis (JAS), avec trois insecticides de formulations différentes (Thalis 56 EC, Duel 336 EC et Conquest 88 EC) à la dose de 1 litre par hectare chacun. Chaque parcelle a été traitée six fois avec le même produit à intervalle régulier de temps de 15 jours jusqu'au 128^{ème} JAS.

2.2.3.6. Détermination des effets de la fertilisation du sol sur les paramètres agronomiques du cotonnier

Dans chaque parcelle, une surface de demi ha (50 m × 100 m) a été délimitée pour la collecte des données (Figure 12). Selon la méthode Ochou *et al.* (2015), de la gauche vers la droite, les 19^{ème}, 33^{ème} et 45^{ème} lignes de semis ont été sélectionnées. Sur chacune de ces lignes, un segment de 10 m a été délimité à l'aide de deux piquets selon les positions suivantes : à la 19^{ème} ligne, le premier piquet était à 10 m du bord et le second, à 20 m ; pour les 33^{ème} et 45^{ème} lignes, les piquets étaient respectivement à 20 et 30 m du bord, puis à 30 m et 40 m du bord.

Sur chaque segment, les mesures ont été réalisées en une seule fois au stade de fructification (130 JAS). Elles ont porté sur la hauteur des plantes déterminée à l'aide d'un ruban-mètre (en cm), les nombres de branches fructifères et végétatives, d'entre-nœuds et de capsules par plant déterminés par comptage. Le comptage des capsules a été effectué de bas en haut des plants, branche par branche, afin d'éviter toute omission. Seules les capsules saines et bien différenciées ont été prises en compte. De la même manière, les branches fructifères et végétatives ainsi que les entre-nœuds ont été comptés du bas vers le haut des plants. Le rendement a été déterminé à la récolte. Il s'est agi de diviser la quantité totale de coton récoltée par la superficie de récolte et de rapporter le résultat obtenu à l'hectare.

$$R \left(\frac{t}{ha} \right) = \frac{r \times 10000}{s}$$

R = rendement à l'hectare

r = rendement à la surface de collecte

s = surface de collecte.

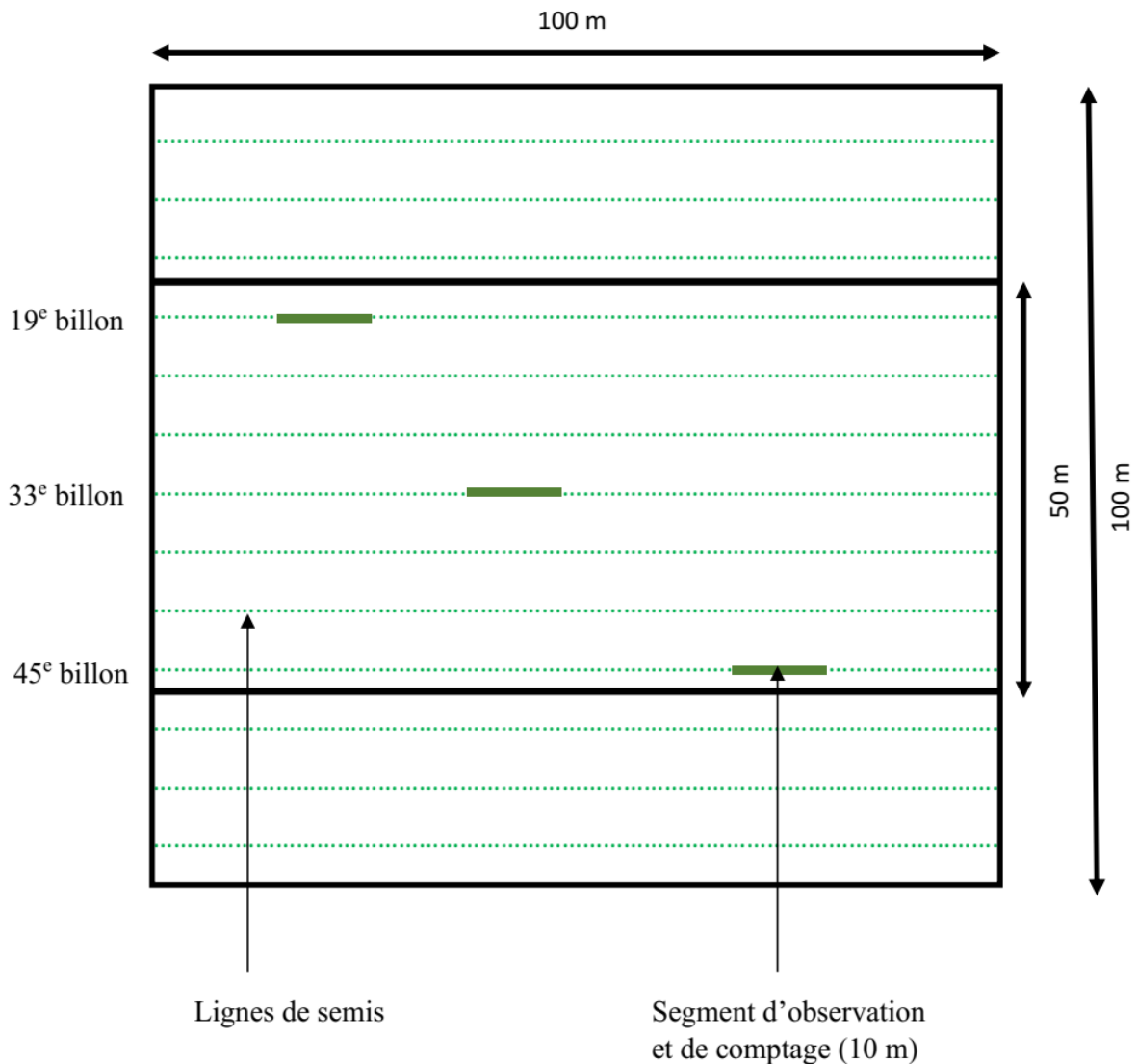


Figure 12 : dispositif de mesure des paramètres agronomiques.

Toutes les opérations liées à l'analyse du niveau de fertilité des sols en vue du raisonnement de la fertilisation ont été menées pendant quatre années consécutives, de 2018 à 2022. Au cours des trois dernières années de cette période (2019 à 2022), aucun apport de fertilisant n'a été effectué, conformément au principe de fertilisation adopté. Pendant ces trois années, l'évolution de la somme des bases échangeables en relation avec le taux de N-NH_4^+ a été suivie, ainsi que celle des rendements de coton.

2.2.4. Analyse statistique des données

Les données collectées ont été saisies et vérifiées sur Excel version 2016. Elles ont ensuite fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) afin de comparer les moyennes, après avoir

préalablement vérifié l'homogénéité des variances par les tests de Shapiro-Wilk et de Levène. En cas de différence significative entre les moyennes ($P < 0,05$), le test post-ANOVA LSD (Least Significant Difference) de Fischer, au seuil de 5%, a été appliqué pour identifier les groupes homogènes.

Lorsque les variances n'étaient pas homogènes, malgré l'application de tentatives de transformation, les moyennes ont été comparées à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis. En cas de différence significative entre les moyennes ($P < 0,05$), le test de Dunnett a été utilisé pour déterminer les groupes homogènes. Ces analyses statistiques univariées ont été réalisées avec le logiciel R, version 4.2.1 en utilisant le package et l'interface graphique Rcmdr (R Commander).

Aussi, une analyse en composantes principales (ACP) a-t-elle été réalisée à l'aide du logiciel R pour identifier le traitement test qui aurait induit le plus d'effet positif sur le rendement du coton. Dans ce type de représentation, le rendement est représenté par un vecteur alors que les traitements tests évalués sont représentés par des points distincts. Le type de tests qui s'avèrera plus proche du vecteur des rendements (angle plus faible) est celui qui aura induit plus d'effets positifs sur le rendement, et vice versa.



**TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION**

3.1. RESULTATS

Cette partie présente l'ensemble des résultats obtenus au cours de l'étude. Dans un premier temps, les caractéristiques morphologiques des sols étudiés sont présentées, suivies des caractéristiques chimiques. Enfin, les effets de la fertilisation selon la technique N-NH₄⁺ sur les paramètres agronomiques du cotonnier, notamment le rendement, sont présentés. A ce niveau, tous les résultats de la première année d'expérimentation sont présentés de manière détaillée. Pour les trois années suivantes, l'accent est mis sur l'évolution de la somme des bases échangeables en fonction des taux de N-NH₄⁺ du sol, puis des rendements obtenus.

3.1.1. Caractérisation morphopédologique et chimique des sols sous cotonnier

3.1.1.1. Caractéristiques morphopédologiques et environnement des sols étudiés

Les sols des parcelles étudiées sont soumis à des cultures continues et répétées. Ils se situent sur des terrains dont les pentes sont faibles ($\leq 7\%$). Aucun affleurement rocheux n'a été observé à leur surface.

Parmi l'ensemble des caractéristiques des sols étudiés, la couleur des horizons de surface a permis de les regrouper en deux grands ensembles : les sols dont l'horizon de surface est apparemment humifère, et les sols dont l'horizon de surface est apparemment peu humifère.

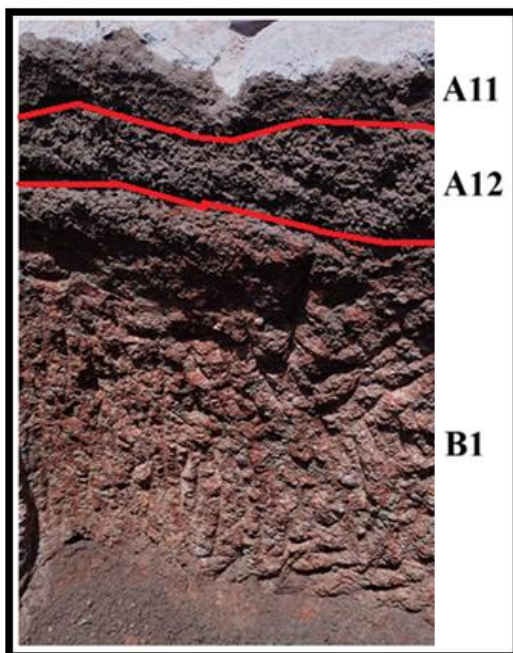
Les profils représentatifs des sols dont l'horizon de surface est apparemment humifère ont été observés dans les sections de Barrovogo, Gnanmandô, Koussanga, Ladjivogo, Pleuhouo et Ouangolodougou, incluant également ceux de Diaratchè. Les horizons de surface, épais de 2 à 25 cm, affichent des teintes allant du gris sombre (10YR4/1) au brun foncé (7YR3/4). Ils sont poreux, meubles et contiennent peu de racines millimétriques. Par ailleurs, ces horizons présentent une forte proportion d'éléments grossiers, comprise entre 45 et 81 %, ainsi qu'une texture sablo-argileuse, associée à une structure grumeleuse et un bon drainage.

Les horizons sous-jacents, de couleur plus claire, variant du brun au brun jaunâtre (10YR4/3 à 10YR5/6), sont poreux et meubles dans la section de Barrovogo, tandis qu'ils apparaissent peu poreux ou compacts dans les sols des sections de Gnanmandô, Koussanga, Ladjivogo, Pleuhouo, Ouangolodougou et Diaratchè. Ces horizons présentent également une texture sablo-argileuse et une structure grumeleuse, notamment à Barrovogo, Ladjivogo, Ouangolodougou, Gnanmandô, Pleuhouo, Koussanga et Diaratchè. Cette partie des sols bénéficie d'un bon drainage et est exempte de racines. La charge en éléments grossiers y est élevée, comme dans les horizons de surface, avec des proportions allant de 62 à 86 %.

Enfin, les horizons de profondeur, caractérisés par une absence d'humus, sont compacts et très chargés en éléments grossiers (65 à 90%). Leur coloration varie du brun rougeâtre (5YR4/4) au rouge jaunâtre (5YR5/8). Ces horizons se distinguent par une absence de racines, un mauvais drainage, une texture argilo-sableuse et une structure polyédrique subangulaire. Les caractéristiques morphologiques des profils représentatifs des sols dont l'horizon de surface est apparemment humifère sont illustrées par les figures 13, 14, 15, 16, 17 et 18.

➤ Sol de Barrovogo

Le profil de sol de Barrovogo illustré par la figure 13, est situé entre 9.9101260 de latitude nord et -5.2393450 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-6 cm), apparemment humifère, frais, couleur gris sombre (10YR4/1), texture sableuse avec 5 % d'élément grossier, structure grumeleuse, poreux, meuble, limite régulière, transition diffuse, peu de racines millimétriques.

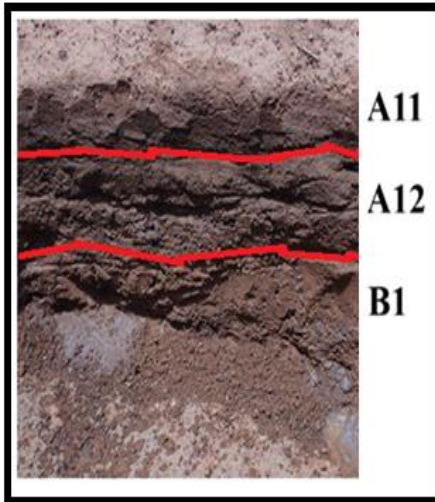
Horizon A12 (6-17 cm), apparemment humifère, frais, limite régulière, transition nette, peu de racine millimétrique, couleur gris sombre (10YR4/1), texture sableuse avec 52% d'éléments grossiers, structure grumeleuse, meuble, poreux.

Horizon B1 (17-102 cm), non humifère, rouge (2,5YR4/8) tacheté jaune ocre (2,5Y7/8), compact non poreux, frais, absence de racine, texture argileuse, structure polyédrique subanguleuse, charge en éléments grossiers 81%.

Figure 13 : profil de Barrovogo

➤ Sol de Gnanmandô

Le profil de sol de Gnanmandô présenté par la figure 14, est situé entre 10.0170500 de latitude nord et -53300800 de longitude ouest. Sa formation végétale associée est une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-19 cm), apparemment humifère, brun jaunâtre foncé (10YR3/4), poreux, meuble, frais, transition diffuse, limite régulière, texture sableuse, structure grumeleuse, 8% d'éléments grossiers, pas de racine.

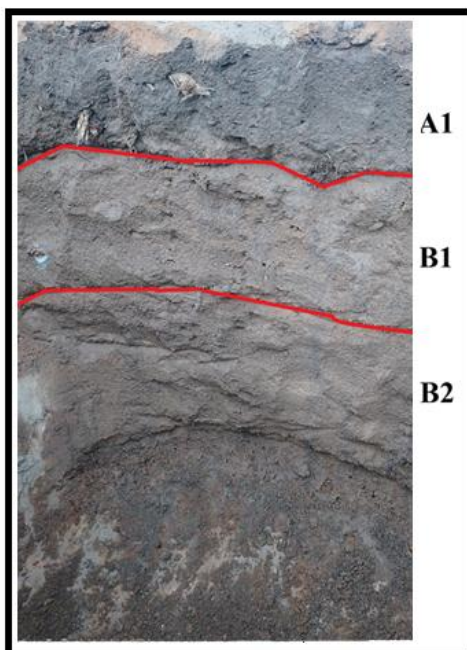
Horizon A12 (19-33 cm), non humifère, brun jaunâtre foncé (10YR4/4), peu poreux, peu compact, frais, limite régulière, transition diffuse, pas de racine, structure grumeleuse, texture sablo-argileuse, charge en éléments grossiers 63%.

Horizon B1 (33-50 cm), non humifère, brun jaunâtre (10YR5/6), peu poreux, compact, frais, pas de racine, texture argilo-sableuse, structure polyédrique subangulaire, 75% d'éléments grossiers.

Figure 14: profil de Gnanmandô

➤ Sol de Ladjivogo

Le profil pédologique de Ladjivogo, représenté par la figure 15, est implanté entre 9.9319750 de latitude nord et -53395610 de longitude ouest au sein d'une savane herbeuse.



Horizon A1 (0-18 cm), apparemment humifère, brun foncé (7,5YR3/2), poreux, frais, meuble, limite régulière, transition nette, quelques racines centimétriques et millimétriques, structure grumeleuse, texture sableuse, 2% d'éléments grossiers.

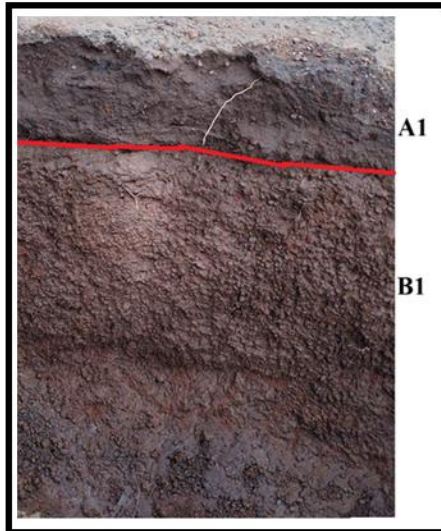
Horizon B1 (18-41 cm), apparemment humifère, poreux, frais, peu compact, brun rougeâtre (5YR4/4), limite régulière, transition diffuse, peu de racine millimétrique, texture sablo-argileuse, structure polyédrique, charge en éléments grossiers 3%.

Horizon B2 (41-77 cm), pas humifère frais, compact, peu poreux, brun fort (7,5YR5/8), pas de racine, structure polyédrique subangulaire, texture argilo sableuse, 1% d'éléments grossiers.

Figure 15: profil de Ladjivogo

➤ Sol de Koussanga

À Koussanga, le profil de sol illustré par la figure 16 se trouve aux coordonnées 9.9325660 de latitude nord et -5.3064870 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



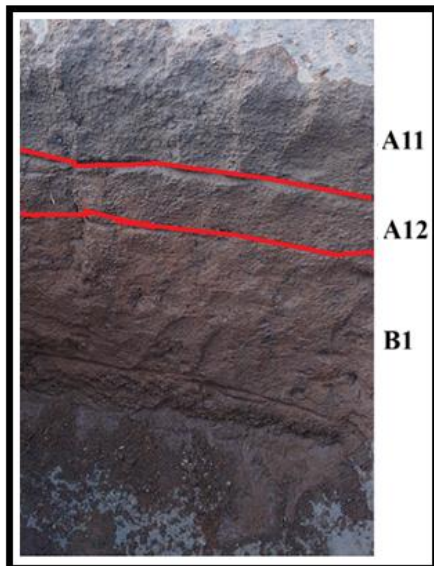
Horizon A1 (0-13 cm), apparemment humifère, poreux, brun rougeâtre foncé (5YR3/2), meuble, frais, limite régulière, transition nette, quelques racines millimétrique et centimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, 30% d'éléments grossiers.

Horizon B1 (13-50 cm), non humifère, peu poreux, rouge jaunâtre (5YR4/6), peu compact, frais quelques racines centimétrique et millimétrique, texture argilo-sableuse, structure polyédrique, charge en éléments grossiers 85%.

Figure 16: profil de Koussanga

➤ Sol de Pleuhouo

Le profil de sol de Pleuhouo illustré par la figure 17 est situé entre 9.971602 de latitude nord et -5.159001 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-25 cm), apparemment humifère, poreux, meuble, frais, limite régulière, transition nette, peu de racine millimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, brun foncé (7,5YR3/4), pas d'élément grossier.

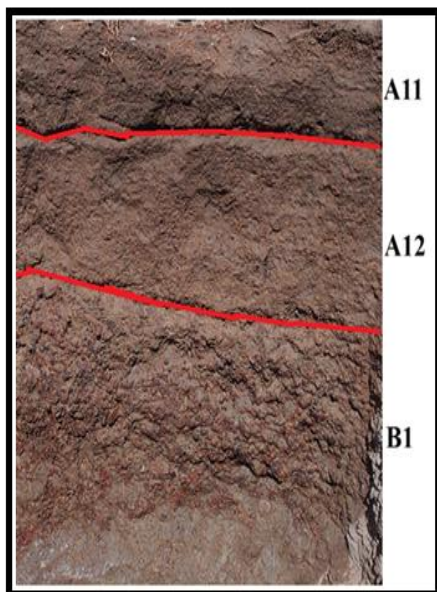
Horizon A12 (25-30 cm), apparemment peu humifère, poreux, meuble, frais, brun foncé (7,5YR4/4), limite régulière, transition diffuse, peu rare racine millimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, 2% d'éléments grossiers.

Horizon B1 (30-82 cm), compact non humifère, non poreux, frais, pas de racine texture sablo-argileuse avec 49% d'argile, rouge jaunâtre (5YR5/8), structure polyédrique subangulaire, 72% d'éléments grossiers.

Figure 17: profil de Pleuhouo

➤ Sol de Ouangolodougou

Le profil pédologique de Ouangolodougou illustré par la figure 18 est situé entre 9.9312930 de latitude nord et -5.0950550 de longitude ouest au sein d'une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-11 cm), apparemment peu humifère, frais, meuble, poreux, peu de racine millimétrique, limite régulière, transition diffuse, gris rougeâtre foncé (5YR4/2), texture sableuse, structure grumeleuse, Charge en éléments grossier 5%.

Horizon A12 (11-33 cm), non humifère, peu poreux, peu compact, frais, limite régulière, transition nette, pas de racine, texture sablo-argileuse, rouge (2,5YR5/6), structure grumeleuse induite par les éléments grossiers, 42% d'éléments grossiers.

Horizon B1 (33-70 cm), non humifère, non poreux, rouge foncé (2,5YR3/6), compact frais, pas de racine, texture sablo-argileuse, structure grumeleuse induite par les éléments grossiers, 90% d'éléments grossiers.

Figure 18: profil de Ouangolodougou

Les profils de sol figurant sur la figure 19, 20, 21, 22, 23 et 24 ont été observés à Benifesso, Dabavogo, Nambigué, Torla, Nioronigué et Soumailavogo. Ils sont représentatifs des sols dont l'horizon de surface est apparemment peu humifère qui incluent aussi les sols des sections de Oumarvogo et de Nambolvogo. Leurs horizons de surface sont colorés gris clair (5YR7/1) à brun rougeâtre (2,5YR4/4) et épais de 2 à 25 cm. Ces couches sont poreuses, meubles et parcourues par peu de racines millimétriques. Ces horizons ont, par ailleurs, une texture sablo-argileuse au toucher, une structure grumeleuse, un bon drainage et une charge en éléments grossiers plus ou moins élevée (32 à 78 %).

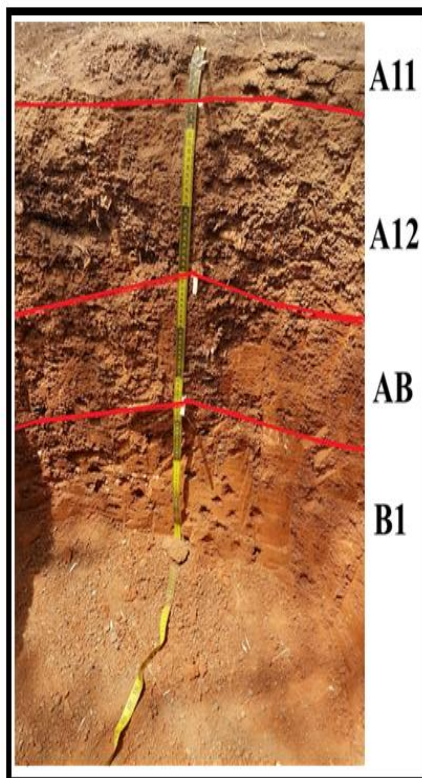
Les horizons sous-jacents ont une couleur brun rougeâtre (2,5YR4/4) ou rouge pâle (2,5YR4/2). Ces horizons sont riches en éléments grossiers (52 à 76 %) et rarement parcourus par des racines. Ils sont, par endroits, poreux et meubles (sections de Benifesso, Dabavogo, Soumailavogo et Torla) ou peu compacts avec une faible porosité dans les sections de Nambigué, Nioronigué, Oumarvogo et Nambolvogo. Leur texture au toucher est sablo-argileuse en général. S'agissant du mode d'organisation ou d'association des particules solides du sol, les sols de Benifesso, Dabavogo, Soumailavogo, Torla, Nioronigué et Nambolvogo ont

présenté une structure grumeleuse alors que ceux observés à Nambigué et Oumarvogo avait une structure polyédrique subangulaire.

Un bon drainage a été observé dans ces horizons sauf dans les sections de Benifesso, Nambigué et Oumarvogo où cette caractéristique a été jugée moyennement bonne. Les horizons de profondeur sont colorés rouges en général (2,5YR4/6), compacts, très chargés en éléments grossiers (65 à 93 %) avec une texture argilo-sableuse et une structure polyédrique. Les racines y sont absentes.

➤ Sol de Benifesso

Le profil de sol de Benifesso présenté par la figure 19 est situé entre 10.063435 de latitude nord et -5.184815 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-2 cm), apparemment peu humifère, frais, couleur gris foncé (2,5YR4/1), quelques racines millimétriques, poreux, texture sablo-argileuse, 20% d'éléments grossiers, transition diffuse, limite régulière, structure grumeleuse, meuble.

Horizon A12 (2-7 cm), apparemment peu humifère, poreux, couleur rouge pâle (2,5YR4/2), frais, meuble, structure polyédrique, texture sablo-argileuse, charge en élément grossiers 16%, transition diffuse, limite régulière, peu de racines millimétriques.

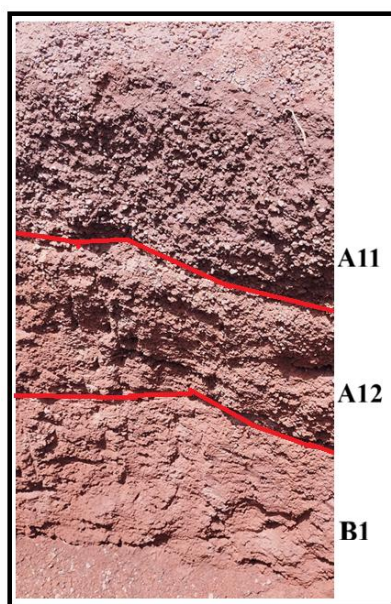
Horizon AB (7-30 cm), apparemment peu humifère, couleur brun rougeâtre (2,5YR4/4), frais, structure grumeleuse, texture argilo-sableuse, poreux, 66% d'éléments grossiers, peu de racines millimétriques, transition progressive, limite régulière, meuble.

Horizon B1 (30-100 cm), non humifère, tacheté jaune (10YR7/8), couleur rouge (2,5YR4/6), frais, peu poreux, structure polyédrique, texture argilo-sableuse, 33% d'éléments grossiers, pas de racine, peu compact.

Figure 19: profil de Benifesso

➤ Sol de Dabavogo

À Dabavogo, le profil de sol présenté par la figure 20 est situé entre 10.2298140 de latitude nord et -5.3103000 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A11 (0-25 cm), apparemment peu humifère, frais, meuble, poreux, couleur brun rougeâtre foncé (5YR3/3), peu de racine millimétrique, transition nette, limite régulière, texture sableuse, structure grumeleuse, 75% d'éléments grossiers.

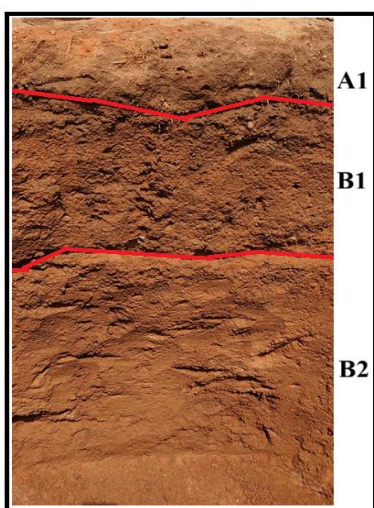
Horizon A12 (25-52 cm), poreux, apparemment peu humifère, peu compact, frais, pas de racine, couleur brun foncé (7,5YR4/6), limite régulière, texture sableuse, structure grumeleuse, 62% d'éléments grossiers.

Horizon B1 (52-100 cm), compact, frais, non poreux, pas humifère, pas de racine, texture argilo-sableuse, couleur rouge jaunâtre (5YR5/8), structure polyédrique, charge en éléments grossiers 40%.

Figure 20: profil de Dabavogo

➤ Sol de Nambigué

La figure 21 présente le profil de sol de Nambigué. Il est situé entre 9.9960220 de latitude nord et -5.3176110 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A1 (0-9 cm), apparemment peu humifère, brun jaunâtre foncé (10YR3/4), frais, poreux, meuble, limite régulière, transition nette, peu de racine millimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, 5% d'éléments grossiers.

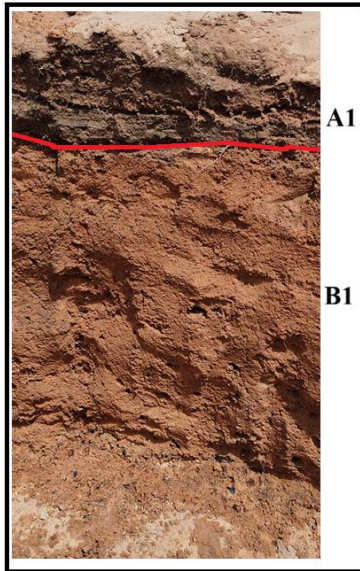
Horizon B1 (9-34 cm), apparemment peu humifère, peu poreux, peu compact, brun jaunâtre (10YR5/8), limite régulière, transition diffuse, pas de racine, texture sablo-argileuse, structure polyédrique subangulaire, 23% d'éléments grossiers.

Horizon B2 (34-100 cm), compact, non humifère, non poreux, frais, brun très foncé (7,5YR5/8), pas de racine, texture argilo-sableuse, structure polyédrique subangulaire, 10% d'éléments grossiers.

Figure 21: profil de Nambigué

➤ Sol de Soumailavogo

Le profil de sol de Soumailavogo illustré par la figure 22 est situé entre 10.2289780 de latitude nord et -5.2882000 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



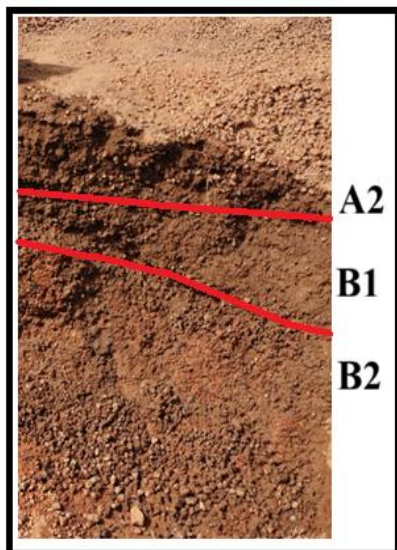
Horizon A1 (0-25), apparemment peu humifère, poreux, meuble, frais, limite régulière, transition nette, gris brunâtre clair (10YR6/2), peu de racine millimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, pas d'élément grossier.

Horizon B1 (11-70 cm), très compact, non poreux, non humifère, rouge (2,5Y5/6), frais, pas de racine, texture argilo-sableuse, texture polyédrique subangulaire, 70% d'éléments grossiers.

Figure 22: profil de Soumailavogo

➤ Sol de Torla (Figure 23)

Le profil pédologique de Torla présenté par la figure 23 est situé entre 9.9191690 de latitude nord et -5.1799660 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A2 (0-13 cm), apparemment peu humifère, poreux, meuble, frais, limite irrégulière, transition nette, peu de racine millimétrique, texture sableuse, structure grumeleuse, 56% d'éléments grossiers, brun foncé (7,5YR3/4).

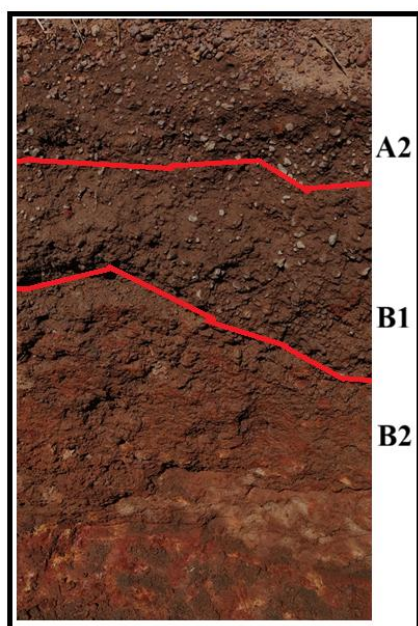
Horizon B1 (13-24 cm), brun grisâtre très foncé (10YR3/2), apparemment peu humifère, poreux, meuble, frais, limite régulière, transition diffuse, pas de racine, texture sableuse, structure grumeleuse, 77% d'éléments grossiers.

Horizon B2 (24-75 cm), tacheté jaune olive (2,5Y6/8), non humifère, compact, non poreux, frais, rouge jaunâtre (5YR5/8), texture sablo-argileuse, structure polyédrique subangulaire, 91% d'éléments grossiers.

Figure 23: profil de Torla

➤ Sol de Nioronigué

À Nioronigué, le profil pédologique illustré par la figure 24 est situé entre 10.0634350 de latitude nord et -5.1848150 de longitude ouest. La formation végétale correspondante de ce profil est une savane herbeuse.



Horizon A2 (0-22 cm), brun foncé (7,5YR3/4), apparemment peu humifère, poreux, meuble, frais, limite irrégulière, transition nette, texture sableuse, structure grumeleuse, 62% d'éléments grossiers, peu de racine millimétrique.

Horizon B1 (22-30 cm), frais, apparemment peu humifère, brun (7,5YR4/4), poreux, peu compact, limite irrégulière, transition diffuse, pas de racine, texture sableuse, structure induite par les éléments grossiers, 75% d'éléments grossiers.

Horizon B2 (30-70 cm), non humifère, non poreux, frais, compact, rouge (2,5YR4/8), tacheté jaune ocre (2,5Y7/8), pas de racine, texture argilo-sableuse, structure polyédrique subangulaire, 86% d'éléments grossiers.

Figure 24: profil de Nioronigué

Globalement, les sols étudiés sont profonds (85 à 102 cm), fortement différenciés en horizons, riches en éléments grossiers (graviers, gravillons, etc.) et dépourvus de minéraux primaires. Leurs horizons humifères sont relativement minces, mesurant entre 5 et 10 cm. De même, la texture sablo-argileuse observée en surface évolue graduellement vers une texture plus argileuse avec une compaction accrue des horizons profonds. Ce sont des sols ferrallitiques. Le drainage, bon en surface, se dégrade progressivement avec la profondeur. Par ailleurs, les sols des 15 sections ont présenté partout une faible activité biologique.

3.1.1.2. Caractéristiques chimiques des sols en première année d'expérimentation

3.1.1.2.1. Acidité, statut organique et phosphore assimilable

Les valeurs du pH, des teneurs en carbone organique (C), matière organique (MO), azote total (Nt) et phosphore assimilable (Pass.) mesurées dans les sols étudiés sont consignées dans le tableau VII, ainsi que le ratio C/N. Chacune de ces variables marque une différence significative ($p < 0,05$) entre les sols. On distingue trois groupes homogènes de sols.

3.1.1.2.1.1. Acidité

Le pH des différents sols varie entre $6,03 \pm 0,23$ et $7,01 \pm 0,88$ (Tableau VII). Le premier groupe de sols est constitué par les seuls sols de la section de Gnanmandô caractérisés par le pH le plus élevé ($7,01 \pm 0,88$). Les sols des sections de Diaratchè et Ladjivogo forment le second groupe, avec des pH les moins relevés varient de $6,03 \pm 0,23$ à $6,08 \pm 0,34$. Enfin, le troisième groupe rassemble les sols des 13 sections restantes. Leurs pH varient de $6,17 \pm 0,19$ à $6,66 \pm 0,46$.

3.1.1.2.1.2. Carbone et matière organiques

Les taux de carbone mesurés sont compris entre $1,14 \pm 0,37$ et $2,44 \pm 0,71$ % (Tableau VII). Pour le premier groupe homogène constitué des seuls sols de la section d'Oumarvogo, les taux sont les plus élevés ($2,44 \pm 0,71$). Les sols des sections de Diaratchè, Torla, Pleuhouo et Gnanmandô, suivent avec des teneurs comprises dans l'intervalle [$1,14 \pm 0,37$; $1,44 \pm 0,47$] ont les taux de carbone organique les plus bas. Les sols des dix sections restantes (Nioronigué, Benifesso, Nambolvogo, Soumailavogo, Ouangolodougou, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Barrovogo, Dabavogo) ont les taux de carbone organique intermédiaires ($1,49 \pm 0,30$ à $2,00 \pm 0,23$ %).

Les teneurs en matière organique (MO) correspondant aux taux de carbone organique (Tableau VII) ainsi décrits se présentent comme suit : $4,22 \pm 1,22$ % pour le premier groupe (Oumarvogo) ; $2,58 \pm 0,52$ à $3,46 \pm 0,39$ pour le deuxième groupe (Nioronigué, Benifesso, Nambolvogo, Soumailavogo, Ouangolodougou, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Barrovogo, Dabavogo) et $1,98 \pm 0,65$ à $2,49 \pm 0,56$ % pour le troisième groupe de sol (Diaratchè, Torla, Pleuhouo, Gnanmandô).

3.1.1.2.1.3. Azote total

Les teneurs en azote total des sols varient dans la fourchette 0,08 % à 0,16 % (Tableau VII). Les trois groupes homogènes de sols distingués sont constitués d'une part par les sols de la section de Oumarvogo caractérisés par la teneur moyenne la plus élevée ($0,16 \pm 0,04$ %).

D'autres part, il s'agit des sols des sections de Diaratchè, Pleuhouo, Nioronigué, Gnanmandô et Torla où les taux ont varié de $0,08 \pm 0,02$ à $0,10 \pm 0,05$ % renfermant les teneurs les plus faibles, puis les sols des sections de Barrovogo, Benifesso, Dabavogo, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Nambolvogo, Ouangolodougou et Soumailavogo, renfermant les teneurs intermédiaires ($0,11 \pm 0,02$ à $0,13 \pm 0,04$ %).

3.1.1.2.1.4. Ratio C/N

Les valeurs moyennes du ratio C/N obtenues sur l'ensemble des sols oscillent entre $14,20 \pm 0,78$ et $15,36 \pm 0,31$ (Tableau VII). Les trois groupes homogènes classés dans l'ordre décroissant des ratios C/N se présentent comme suit : i) le groupe des sols de la section de Oumarvogo, Barrovogo, Dabavogo, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué et Ouangolodougou varie de $15,01 \pm 0,33$ à $15,36 \pm 0,31$; ii) le groupe des sols des sections de Torla, Benifesso, Gnamandô, Nambolvogo, Nioronigué, Pleuhouo et Soumailavogo (C/N situé dans l'intervalle $[14,35 \pm 0,77 ; 14,92 \pm 0,37]$) et iii) le groupe des sols de la section restante (Diaratchè) dont le ratio C/N est de $14,20 \pm 0,78$.

3.1.1.2.1.5. Phosphore assimilable

La teneur moyenne la plus élevée de phosphore assimilable (Pass) ($13,37 \pm 1,98$ mg/kg) a observée dans les sols de la section d'Oumarvogo, quand les teneurs les plus basses, soient $2,13 \pm 0,54$ à $2,40 \pm 0,86$ mg/kg caractérisaient les sections de Ladjivogo, Diaratchè, Ouangolodougou et Pleuhouo. Le plus grand nombre de sections (10 au total : Soumailavogo, Torla, Nioronigué, Gnamandô, Nambigué, Benifesso, Barrovogo, Nambolvogo, Koussanga et Dabavogo) ont des teneurs de Pass ($2,57 \pm 0,28$ à $9,84 \pm 0,38$ mg/kg) intermédiaires à celles des deux premiers groupes décrits (Tableau VII).

Tableau VII : acidité, statut organique et phosphore assimilable des sols étudiés

Section	pH	CO (en %)	MO (en %)	Nt (en %)	Ratio C/N	Pass (mg/kg)
Barrovogo	6,33 ± 0,51 ab	1,87 ± 0,51 ab	3,25 ± 0,88 ab	0,12 ± 0,03 ab	15,05 ± 0,39 a	3,20 ± 0,62 ab
Benifesso	6,61 ± 0,22 ab	1,57 ± 0,67 ab	2,72 ± 1,16 ab	0,11 ± 0,04 ab	14,73 ± 0,54 ab	3,09 ± 0,77 ab
Dabavogo	6,51 ± 0,34 ab	2,00 ± 0,23 ab	3,46 ± 0,39 ab	0,13 ± 0,01 ab	15,20 ± 0,16 a	7,66 ± 0,75 ab
Diaratchè	6,03 ± 0,23 b	1,14 ± 0,37 b	1,98 ± 0,65 b	0,08 ± 0,02 b	14,20 ± 0,78 b	2,17 ± 0,60 b
Gnanmandô	7,01 ± 0,88 a	1,44 ± 0,47 b	2,50 ± 0,81 b	0,10 ± 0,03 b	14,63 ± 0,46 ab	2,57 ± 0,28 ab
Koussanga	6,56 ± 0,41 ab	1,79 ± 0,35 ab	3,10 ± 0,61 ab	0,12 ± 0,02 ab	15,01 ± 0,33 a	9,84 ± 0,38 ab
Ladjivogo	6,08 ± 0,34 ab	1,99 ± 0,58 ab	3,44 ± 1,00 ab	0,13 ± 0,03 ab	15,15 ± 0,30 a	2,13 ± 0,54 b
Nambigué	6,41 ± 0,37 ab	1,97 ± 0,30 ab	3,42 ± 0,52 ab	0,13 ± 0,02 ab	15,20 ± 0,19 a	3,96 ± 0,91 ab
Nambolvogo	6,40 ± 0,26 ab	1,68 ± 0,41 ab	2,91 ± 0,70 ab	0,11 ± 0,02 ab	14,92 ± 0,37 ab	6,50 ± 0,59 ab
Nioronigué	6,17 ± 0,19 ab	1,49 ± 0,30 ab	2,58 ± 0,52 ab	0,10 ± 0,02 b	14,73 ± 0,42 a	4,95 ± 0,89 ab
Ouangolodougou	6,28 ± 0,30 ab	1,96 ± 0,59 ab	3,39 ± 1,02 ab	0,13 ± 0,04 ab	15,08 ± 0,43 a	2,25 ± 0,09 b
Oumarvogo	6,42 ± 0,88 ab	2,44 ± 0,71 a	4,22 ± 1,22 a	0,16 ± 0,04 a	15,36 ± 0,31 a	13,37 ± 1,98 a
Pleuhouo	6,66 ± 0,46 ab	1,44 ± 0,32 b	2,49 ± 0,56 b	0,10 ± 0,02 b	14,66 ± 0,51 ab	2,40 ± 0,86 b
Soumailavogo	6,58 ± 0,55 ab	1,61 ± 0,57 ab	2,79 ± 0,99 ab	0,11 ± 0,03 ab	14,79 ± 0,46 ab	4,28 ± 1,46 ab
Torla	6,49 ± 0,35 ab	1,40 ± 0,87 b	2,42 ± 1,52 b	0,10 ± 0,05 b	14,35 ± 0,77 ab	4,38 ± 1,91 ab
p	0,0116	0,00168	0,00168	0,0017	0,0000288	0,000293

- Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$;
- p : probabilité ; MOS : Matière organique du sol ; CO : Carbone organique ; Nt : Azote total ; Ratio C/N : Rapport Carbone sur Azote total ; Pass : Phosphore assimilable.

3.1.1.2.1.6. Bases échangeables et statut N-NH₄⁺ des sols

Le tableau VIII présente les teneurs moyennes de N-NH₄⁺, bases échangeables (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺) et NO₃⁻ contenues dans les sols. La capacité d'échange cationique (CEC) de ces sols, le taux de saturation en bases échangeables (V), la somme des bases échangeables (SBE), qui a été particulièrement analysée dans la suite de l'étude avec le N-NH₄⁺, figurent dans le tableau IX. Excepté le Na⁺ dont les teneurs moyennes ne varient presque pas ($0,02 \pm 0,00$ cmol/kg) sur l'ensemble des zones d'étude ($p > 0,05$); ces variables différencient significativement les sols des sections ($p < 0,05$).

En effet, en fluctuant de $0,08 \pm 0,03$ à $0,32 \pm 0,09$ g/kg, les teneurs moyennes en N-NH₄⁺ distinguent trois groupes homogènes de sols (Tableau VIII). Les teneurs moyennes les plus élevées constituant le premier groupe ont été observés à Soumailavogo ($0,32 \pm 0,09$ g/kg) et Diaratchè ($0,30 \pm 0,00$ g/kg), tandis que la section de Torla qui constitue le deuxième groupe affiche les plus faibles teneurs ($0,08 \pm 0,04$ g/kg). Le groupe intermédiaire de sols est constitué par les sols des sections de Gnanmandô, Nambolvogo, Oumarvogo, Nambigué, Barrovogo, Benifesso, Dabavogo, Koussanga, Ladjivogo, Nioronigué, Ouangolodougou, et Pleuhouo (N-NH₄⁺ varie de $0,13 \pm 0,03$ à $0,26 \pm 0,09$ g/kg).

Les teneurs moyennes en potassium (K⁺) varient significativement entre $0,09 \pm 0,02$ et $0,28 \pm 0,07$ cmol/kg ($p < 0,05$). Trois groupes homogènes ont été identifiés (Tableau VIII) :

- le premier groupe composé des sols des sections de Barrovogo, Dabavogo et Ouangolodougou ont les teneurs les plus élevées (K⁺ varie de $0,25 \pm 0,10$ à $0,28 \pm 0,07$ cmol/kg) ;
- dans le second groupe, figurent les sols des sections de Diaratchè et Koussanga. Les teneurs respectives de ces sols sont $0,09 \pm 0,02$ et $0,10 \pm 0,04$ cmol/kg ;
- le sol de Benifesso, Gnanmandô, Ladjivogo, Nambigué, Nambolvogo, Nioronigué, Oumarvogo, Soumailavogo, Pleuhouo et Torla avec des taux variant de $0,11 \pm 0,03$ à $0,21 \pm 0,12$ cmol/kg, forme le troisième groupe.

Les teneurs moyennes en calcium (Ca²⁺) varient significativement de $1,30 \pm 0,45$ à $5,98 \pm 1,66$ cmol/kg ($p < 0,05$). Trois groupes homogènes ont été distingués comme précédemment (Tableau VIII). Le premier groupe correspond aux sols des sections de Barrovogo et Dabavogo qui ont affiché les teneurs les plus élevées $5,39 \pm 2,43$ et $5,98 \pm 1,66$ cmol/kg. Le second groupe est constitué des sols de la section de Diaratchè ($1,30 \pm 0,45$ cmol/kg). Les sols des 12 sections restante ont des teneurs de Ca²⁺ variant de $1,72 \pm 0,40$ à $4,99 \pm 3,88$ cmol/kg).

Les teneurs moyennes en magnésium (Mg^{2+}) varient significativement entre $0,33 \pm 0,09$ et $0,78 \pm 0,19$ cmol/kg ($p < 0,05$). Cette fois-ci, seulement trois groupes homogènes de sol se dégagent (Tableau VIII). Le premier groupe est constitué par les sols des sections d'Oumarvogo, Barrovogo, Dabavogo où il a été mesuré les teneurs les plus élevées ($0,74 \pm 0,3$ à $0,78 \pm 0,19$ cmol/kg). Le deuxième groupe rassemble les sols de Dabavogo, Diaratchè, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Nambolvogo, Nioronigué, Ouangolo, Pleuhouo et Soumailavogo. Leurs teneurs varient de $0,39 \pm 0,09$ à $0,78 \pm 0,19$ cmol/kg. Le troisième groupe est constitué du sol de Benifesso qui renfermait la teneur la plus basse ($0,33 \pm 0,09$ cmol/kg).

Les teneurs moyennes en azote nitrique (NO_3^-) distinguent aussi trois groupes en variant de $2,50 \pm 0,52$ à $4,21 \pm 0,95$ cmol/kg (Tableau VIII). Les sols d'Oumarvogo sont caractérisés par la plus grande moyenne ($4,21 \pm 0,95$ cmol/kg). Les sols de Barrovogo, Benifesso, Dabavogo, Koussanga, Ladjivogo, Nambigué, Nambolvogo, Ouangolodougou et Soumailavogo, puis les sols de Diaratchè, Gnanmandô, Pleuhouo, Nioronigué et Torla suivent dans cet ordre avec des moyennes variant entre $3,08 \pm 0,90$ et $3,64 \pm 0,30$ cmol/kg, puis entre $2,50 \pm 0,52$ et $2,98 \pm 0,41$ cmol/kg.

Les valeurs de la somme des bases échangeables (SBE) sont comprises entre $1,77 \pm 0,63$ et $7,04 \pm 1,85$ cmol/kg, distinguant ainsi trois groupes homogènes de sols (Tableau IX). Le premier groupe qui comprend les sols des sections de Barrovogo ($6,38 \pm 2,74$ cmol/kg) et de Dabavogo ($7,04 \pm 1,85$ cmol/kg) est le plus fourni en bases. Les deux autres groupes sont constitués par les sols des sections de Benifesso, Gnanmandô, Nambigué, Nambolvogo, Nioronigué, Ouangolodougou et Torla, avec des SBE variant entre $1,77 \pm 0,63$ et $3,08 \pm 0,97$ cmol/kg, puis les sols de Diaratchè, Koussanga, Ladjivogo, Oumarvogo, Pleuhouo et Soumailavogo où la SBE était relativement la plus faible (SBE varie de $1,94 \pm 0,66$ et $5,96 \pm 4,23$ cmol/kg).

La CEC distingue les mêmes groupes que la SBE (Tableau IX). En effet, ses valeurs les plus élevées ($7,28 \pm 2,74$ et $7,94 \pm 1,85$ cmol/kg) sont caractéristiques des sols de Barrovogo et de Dabavogo. Les sols de Benifesso, Gnanmandô, Nambigué, Nambolvogo, Nioronigué, Ouangolodougou et Torla suivent avec des valeurs comprises entre $3,12 \pm 0,47$ et $5,56 \pm 0,91$ cmol/kg. Les valeurs, soit $2,84 \pm 0,66$ à $6,87 \pm 4,24$ cmol/kg, sont ressorties des sols de Diaratchè, Koussanga, Ladjivogo, Oumarvogo, Pleuhouo et Soumailavogo.

Concernant le taux de saturation en bases, seul le premier groupe (sols de Barrovogo et de Dabavogo) qui a affiché les plus grandes valeurs (V allant de 87,64 à 88,66 %) est identique

aux deux cas précédents (Tableau IX). Deux autres groupes de sols ont été identifiés par cette variables. Ce sont : i) les sols de Benifesso et Torla, avec des taux faibles 47,84 et 48,22 % ; ii) les sols Diaratchè, Gnanmandô, Nambolvogo, Nironigué, Nambigué, Koussanga, Ladjivogo, Ouangolodougou, Oumarvogo, Pleuhouo et Soumailavogo avec des taux variant de 68,31 à 86,75 %.

Tableau VIII : teneurs en N-NH₄⁺ et bases échangeables des sols étudiés

Section	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	K ⁺ (cmol/kg)	Ca ²⁺ (cmol/kg)	Mg ²⁺ (cmol/kg)	Na ⁺ (cmol/kg)	NO ₃ ⁻ (cmol/kg)
Barrovogo	0,13 ± 0,05 ab	0,25 ± 0,18 a	5,39 ± 2,43 ab	0,74 ± 0,34 a	0,02 ± 0,00	3,48 ± 0,68 ab
Benifesso	0,14 ± 0,08 ab	0,14 ± 0,05 ab	2,19 ± 0,81 ab	0,33 ± 0,09 b	0,02 ± 0,00	3,08 ± 0,90 ab
Dabavogo	0,14 ± 0,09 ab	0,28 ± 0,070 a	5,98 ± 1,66 a	0,78 ± 0,19 a	0,02 ± 0,00	3,64 ± 0,30 ab
Diaratchè	0,30 ± 0,00 a	0,09 ± 0,02 b	1,30 ± 0,45 b	0,55 ± 0,52 ab	0,02 ± 0,00	2,50 ± 0,52 b
Gnanmandô	0,24 ± 0,09 ab	0,11 ± 0,05 ab	2,38 ± 1,21 ab	0,36 ± 0,17 b	0,02 ± 0,00	2,90 ± 0,62 b
Koussanga	0,13 ± 0,04 ab	0,10 ± 0,04 b	4,63 ± 3,29 ab	0,45 ± 0,24 ab	0,02 ± 0,00	3,34 ± 0,47 ab
Ladjivogo	0,18 ± 0,08 ab	0,17 ± 0,09 ab	4,13 ± 2,04 ab	0,55 ± 0,20 ab	0,02 ± 0,00	3,61 ± 0,77 ab
Nambigué	0,26 ± 0,09 ab	0,17 ± 0,10 ab	2,04 ± 0,46 ab	0,39 ± 0,09 ab	0,02 ± 0,00	3,60 ± 0,39 ab
Nambolvogo	0,21 ± 0,04 ab	0,12 ± 0,05 ab	1,86 ± 0,64 ab	0,40 ± 0,14 ab	0,02 ± 0,00	3,22 ± 0,54 ab
Nioronigué	0,13 ± 0,03 ab	0,11 ± 0,04 ab	1,72 ± 0,40 ab	0,39 ± 0,10 ab	0,02 ± 0,00	2,98 ± 0,41 b
Ouangolo	0,18 ± 0,07 ab	0,25 ± 0,10 a	2,30 ± 0,75 ab	0,54 ± 0,29 ab	0,02 ± 0,00	3,58 ± 0,80 ab
Oumarvogo	0,21 ± 0,12 ab	0,21 ± 0,12 ab	4,99 ± 3,88 ab	0,77 ± 0,41 a	0,02 ± 0,00	4,21 ± 0,95 a
Pleuhouo	0,18 ± 0,13 ab	0,12 ± 0,06 ab	2,85 ± 1,54 ab	0,44 ± 0,17 ab	0,02 ± 0,00	2,90 ± 0,43 b
Soumailavogo	0,32 ± 0,09 a	0,21 ± 0,03 ab	2,80 ± 1,64 ab	0,66 ± 0,40 ab	0,02 ± 0,00	3,13 ± 0,77 ab
Torla	0,08 ± 0,04 b	0,11 ± 0,03 ab	2,33 ± 1,49 ab	0,34 ± 0,14 b	0,02 ± 0,00	2,84 ± 1,15 b
p	0,001	0,001	0,001	0,001	0,391	0,002

- Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$;

- p : probabilité ; N-NH₄⁺ : Azote minéralisable ; K⁺ : Potassium ; Ca²⁺ : Calcium ; Mg²⁺ : Magnésium ; Na⁺ : Sodium ; NO₃⁻ : Azote nitrique.

Tableau IX : CEC, taux de saturation en bases échangeables (V), somme des bases échangeables (SBE) des sols étudiés

Section	CEC (cmol/kg)	SBE (cmol/kg)	V (en %)
Barrovogo	7,28 ± 2,74 a	6,38 ± 2,74 a	87,64 ± 0,05 a
Benifesso	5,56 ± 0,91 b	2,66 ± 0,91 b	47,84 ± 0,07 b
Dabavogo	7,94 ± 1,85 a	7,04 ± 1,85 a	88,66 ± 0,03 a
Diaratchè	2,84 ± 0,66 ab	1,94 ± 0,66 ab	68,31 ± 0,08 ab
Gnanmandô	3,75 ± 1,39 b	2,85 ± 1,39 b	76,00 ± 0,07 ab
Koussanga	6,08 ± 3,53 ab	5,18 ± 3,53 ab	85,20 ± 0,12 ab
Ladjivogo	5,75 ± 2,25 ab	4,85 ± 2,25 ab	84,35 ± 0,08 ab
Nambigué	3,49 ± 0,64 b	2,59 ± 0,64 b	74,21 ± 0,04 ab
Nambolvogo	3,28 ± 0,79 b	2,38 ± 0,79 b	72,56 ± 0,07 ab
Nioronigué	3,12 ± 0,47 b	2,22 ± 0,47 b	71,15 ± 0,04 ab
Ouangolo	3,98 ± 0,97 b	3,08 ± 0,97 b	77,38 ± 0,06 ab
Oumarvogo	6,87 ± 4,24 ab	5,96 ± 4,23 ab	86,75 ± 0,07 ab
Pleuhouo	4,30 ± 1,59 ab	3,40 ± 1,59 ab	79,07 ± 0,08 ab
Soumailavogo	4,56 ± 2,04 ab	3,66 ± 2,04 ab	80,26 ± 0,07 ab
Torla	3,67 ± 1,63 b	1,77 ± 0,63 b	48,22 ± 0,09 b
p	0,001	0,001	0,001

- Les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$;
- p : probabilité ; ; CEC : Capacité d'Echange Cationique ; SBE : Somme des Bases Echangeable ; V : taux de saturation en bases échangeables.

3.1.2. Détermination des doses d'engrais adaptées aux sols sous cotonnier par la technique N-NH₄⁺

3.1.2.1. Relation entre la somme des bases échangeables et l'azote minéralisable

La courbe d'évolution de la somme des bases échangeables (SBE) en fonction de N-NH₄⁺ est présentée par la figure 15. Selon la figure, deux groupes de sols se dégagent. Le premier groupe renferme les sols des sections de Koussanga, Ladjivogo, Barrovogo, Dabavogo et Oumarvogo et le second est constitué des sols des sections de Pleuhouo, Ouangolodougou, Soumailavogo, Gnamandô, Nambolvogo, Nambigué, Benifesso, Nioronigué et Torla. La SBE des sols du premier groupe ne définit pas une relation précise avec leur N-NH₄⁺ tandis que, les SBE des sols du second dessine une courbe croissante qui, apparemment, commence à former un plateau à partir d'un taux de N-NH₄⁺ = 0,32 g/kg pour une SBE = 3,66 cmol/kg observés à Soumailavogo. Le point de départ de la courbe correspond à un taux de N-NH₄⁺ = 0,08 g/kg pour une SBE = 1,77 cmol/kg observés à Torla. Ce deuxième groupe de sols répond ainsi au critère d'apport de fertilisants minéraux sur lequel cette recherche est fondée. Les équilibres chimiques qui caractérisent ces sols sont l'objet des résultats suivant.

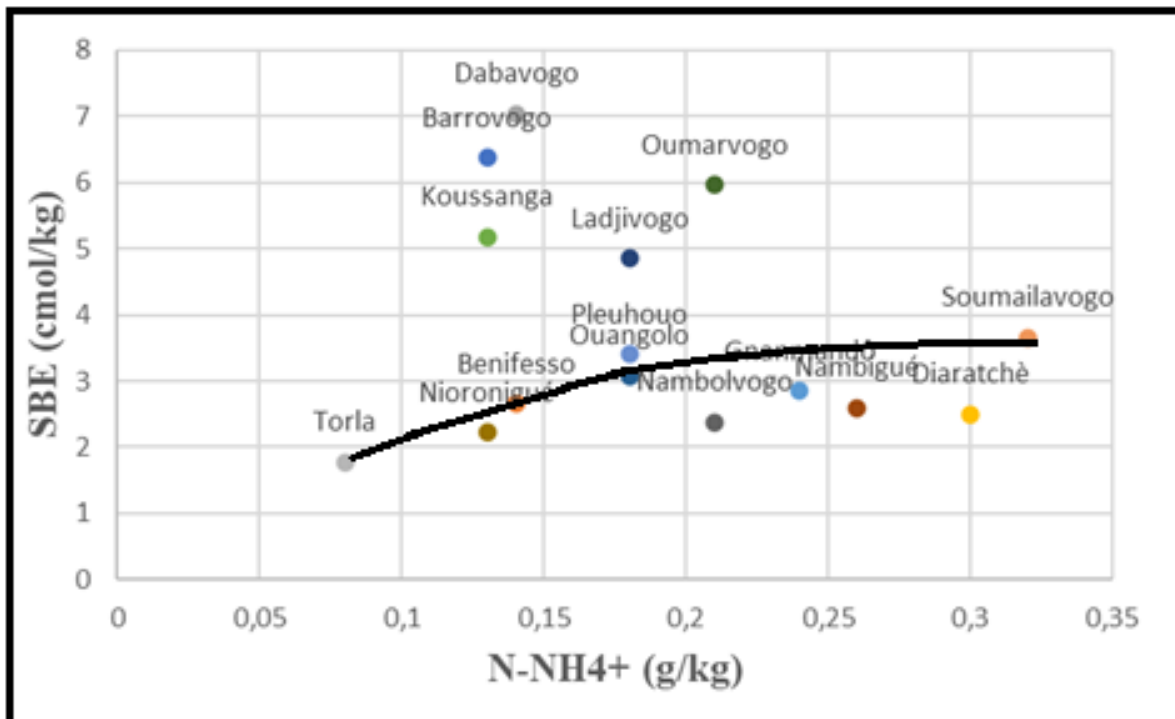


Figure 25 : évolution des SBE des sols en fonction de leurs taux de N-NH₄⁺ pour la première année d'expérimentation

- Ouangolo : Ouangolodougou ; SBE : Somme des bases échangeables.

3.1.2.2. Equilibres chimiques dans les sols

Le tableau X présente les caractéristiques des équilibres chimiques (Mg^{2+}/K^+ ; Ca^{2+}/Mg^{2+} et K^+/CEC) dans les sols qui répondent au critère d'apport de fertilisants minéraux.

Les ratios Mg^{2+}/K^+ des sols calculés sont compris entre 2,48 et 7,05. Cette variation est significative ($p < 0,05$) et répartit les sols dans trois groupes homogènes distincts. Le premier groupe concerne les sols de Diaratchè dont les ratios sont plus élevés (7,05), le second regroupe les sols de Benifesso, Nambigué et Ouangolodougou dont les ratios sont inférieurs à trois. Le dernier renferme les sols de Gnanmandô, Nambolvogo, Nioronigué, Plauhous, Soumailavogo et Torla dont les ratios sont compris entre trois et sept. Toutefois, les sols de Diaratchè, Torla, Soumailavogo, Gnanmandô, Nambolvogo, Nioronigué et Pleuhous dont les rapports fluctuent de 3 à 25, sont équilibrés relativement au Mg^{2+} et au K^+ . Quant aux sols de Ouangolodougou, Benifesso, et Nambigué, dont les rapports sont inférieurs à trois, le K^+ est en déficit par rapport à Mg^{2+} .

Aussi, se référant à leurs seuils, les valeurs du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} qui varient de 3,84 à 7 en distinguant trois groupes de sols ($P < 0,05$), se situent soit dans la plage des valeurs recommandées (trois à cinq) ou soit dans la plage indiquant un déficit de Ca^{2+} par rapport à Mg^{2+} (> 5). Les sols équilibrés sont ceux de Diaratchè, Soumailavogo, Ouangolodougou, Nioronigué et Nambolvogo. Les sols déséquilibrés au contraire concernent les sections de Nambigué, Torla, Benifesso, Gnanmandô et Pleuhous. L'intervalle dans lequel les rapports K^+/CEC varient dans l'ensemble des sols évalués est [0,03 ; 0,06]. Cette variation distingue trois groupes statistiquement homogènes. Selon les seuils de ce rapport ($K^+/CEC = 2$), tous ces sols sont très déficitaires en K^+ au regard de leur CEC.

Les résultats décrits précédemment qui se rapportent aux propriétés chimiques des sols montrent que :

- i) sur l'ensemble des sols des 15 sections explorées, seuls les sols de dix sections suivent la loi de fertilisation adoptée pour l'étude. Ces sols sont situés dans la plage d'apports de fertilisants minéraux N, P et K ;
- ii) parmi les sols des 10 sections retenues, ceux de Nambigué, Torla, Bénifesso, Gnamandô et Pleuhous sont déficitaires en Ca^{2+} au regard du taux de Mg^{2+} ;
- iii) les sols de Ouangolodougou, Bénifesso et Nambigué sont déficitaires en K^+ au regard du taux de Mg^{2+} également ;

- iv) les sols des 10 sections sont déficientes en K^+ au regard de la CEC, faisant de K^+ l'élément le plus déficient.

Tableau X : équilibres chimiques dans les sols des 10 sections retenues

Section	Mg^{2+}/K^+	Ca^{2+}/Mg^{2+}	K^+/CEC
Benifesso	$2,55 \pm 1,00$ b	$6,67 \pm 1,16$ a	$0,04 \pm 0,01$ ab
Diaratchè	$7,05 \pm 8,14$ a	$3,84 \pm 2,49$ b	$0,03 \pm 0,01$ b
Gnanmandô	$3,28 \pm 0,92$ ab	$6,84 \pm 1,88$ a	$0,03 \pm 0,01$ b
Nambigué	$2,70 \pm 0,80$ b	$5,30 \pm 0,34$ ab	$0,05 \pm 0,02$ ab
Nambolvogo	$3,47 \pm 0,97$ ab	$4,70 \pm 0,72$ ab	$0,04 \pm 0,01$ ab
Nioronigué	$3,56 \pm 0,68$ ab	$4,58 \pm 0,95$ ab	$0,04 \pm 0,01$ ab
Ouangolodougou	$2,48 \pm 1,63$ b	$4,80 \pm 1,44$ ab	$0,06 \pm 0,02$ a
Pleuhouo	$4,10 \pm 1,14$ ab	$7,00 \pm 2,98$ a	$0,03 \pm 0,02$ b
Soumailavogo	$3,23 \pm 1,90$ ab	$4,32 \pm 0,67$ ab	$0,05 \pm 0,02$ ab
Torla	$3,21 \pm 1,14$ ab	$6,58 \pm 1,59$ a	$0,03 \pm 0,02$ b
p	0,0411	0,001	0,001

p : probabilité les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$

3.1.2.3. Type de fertilisations adoptées pour les sols des 10 sections retenues

Les fertilisations jugées pertinentes qui découlent de l'état de fertilité des sols décrit dans les parties précédentes sont synthétisées dans le tableau XI. Il ressort que le potassium (K^+) est apporté par le NPK et le KCl, l'azote (N) et le phosphore (P) sont apportés par le NPK, la dolomie quant à elle apporte le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}).

Tableau XI : fertilisants apportés aux sols des 10 sections retenues en fonction des carences

Sections	Etat de fertilité	Engrais	Dose/ha	Nombre de sacs d'engrais/ha
1. Nambigué,	Déficiência en N, P, K ⁺ et Ca ²⁺	NPK (15-15-15)	200 kg	4
2. Torla,		Dolomie	100 kg	2
3. Benifesso,		(CaMg(CO ₃) ₂) à		
4. Gnamandô,		30 % CaO		
5. Pleuhouo				
		Urée (46 % N)	50 kg	1
		KCl (60 % K ₂ O)	50 kg	1
1. Diaratchè,	Déficiência en N, P et K ⁺	NPK (15-15-15)	200 kg	4
2. Soumailavogo,		Urée (46 % N)	50 kg	1
3. Niorronigué,		KCl (60 % K ₂ O)	50 g	1
4. Nambolvogo				
5. Ouangolodougou				

3.1.3. Evaluation des effets de la fertilisation raisonnée sur les paramètres agronomiques du cotonnier

3.1.3.1. Effets de la fertilisation du sol sur le cotonnier à la première année d'expérimentation (2018 à 2019)

Les effets présentés portent sur la hauteur, les nombres de branches végétatives et fructifères, le nombre d'entre-nœud et le rendement de coton.

3.1.3.1.1. Effet sur la hauteur

Les hauteurs moyennes des plants de cotonniers obtenues sont reportées dans le tableau XII. La fertilisation adoptée a apporté une plus-value (un accroissement du cotonnier en hauteur). Dans les sections de Ouangolodougou, Nioronigué, Gnanmandô, Diaratchè, Soumailavogo, Nambolvogo et Nambigué, les hauteurs des plants de cotonnier sur les parcelles test sont plus élevés que sur les parcelles témoin.

- Ouangolodougou : 94,36 (témoin) contre 99,40 (test) soit une augmentation de 5,04 cm, soit un taux d'accroissement de 5,34 % ;

- Nioronigué : 72,50 (témoin) contre 91 (test) soit une augmentation de 19 cm, soit un taux d'accroissement de 26,21 % ;
- Gnanmandô : 93,13 (témoin) contre 99,23 (test) soit une augmentation de 6,1 cm, soit un taux d'accroissement de 6,55 % ;
- Diaratchè : 88,76 (témoin) contre 89,53 (test) soit une augmentation de 0,77 cm, soit un taux d'accroissement de 0,87 % ;
- Soumailavogo : 105,90 (témoin) contre 122,66 (test) soit une augmentation de 16,75 cm soit 15,32 % ;
- Nambolvogo : 85,86 (témoin) contre 88,93 (test) soit une augmentation de 3,07 cm, soit 3,58 % ;
- Nambigué : 80,36 (témoin) contre 108,33 (test) soit une augmentation de 27,9 cm, soit un taux d'accroissement de 34,72 %.

Par contre, la taille obtenue sur la parcelle test de Torla, Pleuhouo et Benifesso sont plus faible que celle des témoins.

- Torla : 85,03 (témoin) contre 81,30 (test) ;
- Pleuhouo : 102,96 (témoin) contre 101,6 (test) ;
- Benifesso : 92,63 (témoin) contre 90,56 (test).

Tableau XII : hauteur du cotonnier en fonction des traitements

Sections	Hauteur (cm)		P
	Témoin	Test	
	NPK	NPK+dolomie+urée+KCl	
Nambigué	80,36 ± 14,92 b	108,33 ± 12,72 a	0,01
Torla	83,03 ± 10,05 a	81,30 ± 5,73 a	0,57
Benifesso	92,63 ± 8,40 a	90,56 ± 8,59 a	0,51
Gnanmandô	93,13 ± 10,05 a	99,23 ± 9,01 a	0,09
Pleuhouo	102,96 ± 10,21 a	101,6 ± 8,52 a	0,70
	NPK	NPK+urée+KCl	
Diaratchè	88,76 ± 7,65 a	89,53 ± 14,51 a	0,86
Soumailavogo	105,90 ± 6,41 b	122,66 ± 7,35 a	0,01
Nioronigué	72,50 ± 11,17 b	91,00 ± 12,73 a	0,01
Nambolvogo	85,86 ± 7,53 a	88,93 ± 8,67 a	0,31
Ouangolodougou	94,36 ± 5,62	99,40 ± 10,66	0,12

Les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$; p : probabilité.

3.1.3.1.2. Effet sur le nombre de branches végétatives et fructifères

Comme cela transparait dans le tableau XIII, les nombres de branches végétatives chez les cotonniers cultivés sur les parcelles tests sont nettement inférieurs à ceux cultivés sur les parcelles témoins ($p < 0,05$). Chez les premiers (parcelle test), on a compté en moyenne deux branches contre huit chez les seconds (parcelle témoin). Un résultat contraire a été obtenu au niveau des branches fructifères. En effet, pendant qu'on dénombrait en moyenne 13 branches fructifères par plante dans les parcelles tests, le cotonnier en parcelles témoins en offrait en moyenne deux. Cette variation est ainsi significative ($p < 0,05$).

3.1.3.1.3. Effet sur les nombres d'entre-nœuds et de capsules

Les cotonniers ont développé approximativement quatre (4) fois plus d'entre-nœuds en parcelles tests (12 à 14 en moyenne) qu'en parcelles témoins trois à quatre (Tableau XIV). Cette tendance est identique au résultat obtenu avec le comptage des capsules (12 à 19 en parcelles tests contre trois à quatre en parcelles témoins). Ces différences sont avérées statistiquement significatives ($p < 0,05$).

Tableau XIII : nombres de branches végétatives et fructifères du cotonnier en fonction des traitements

Sections	Branches végétatives			Branches fructifères			Gain	P
	Témoin	Test	P	Témoin	Test	P		
	NPK	NPK+dolomie+ urée+KCl	P	NPK	NPK+dolomie+ urée+KCl	P		
Nambigué	8,27 ± 1,91 a	1,87 ± 0,55 b	0,01	2,30 ± 0,77 b	13,10 ± 1,33 a	0,01	10,8	0,01
Torla	8,53 ± 1,46 a	1,87 ± 0,55 b	0,01	2,63 ± 0,72 b	11,47 ± 2,11 a	0,01	8,84	0,01
Benifesso	7,80 ± 2,11 a	1,70 ± 0,49 b	0,01	2,33 ± 0,75 b	11,70 ± 0,49 a	0,01	9,37	0,01
Gnanmandô	8,53 ± 1,64 a	1,83 ± 0,62 b	0,01	2,53 ± 0,48 b	11,20 ± 1,88 a	0,01	8,67	0,01
Pleuhouo	8,20 ± 1,93 a	1,70 ± 0,46 b	0,01	2,17 ± 0,67 b	10,90 ± 1,42 a	0,01	8,73	0,01
	NPK	NPK+urée+KCl	P	NPK	NPK+urée+KCl	P		
Diaratchè	8,27 ± 2,25 a	1,83 ± 0,59 b	0,01	2,07 ± 0,80 b	11,77 ± 1,35 a	0,01	9,7	0,01
Soumailavogo	8,13 ± 1,85 a	1,87 ± 0,48 b	0,01	2,43 ± 0,78 b	12,93 ± 1,40 a	0,01	10,5	0,01
Nioronigué	7,80 ± 1,52 a	1,80 ± 0,56 b	0,01	2,57 ± 0,70 b	10,93 ± 1,78 a	0,01	8,36	0,01
Nambolvogo	8,27 ± 2,20 a	1,93 ± 0,50 b	0,01	2,50 ± 0,82 b	11,17 ± 1,25 a	0,01	8,67	0,01
Ouangolodougou	8,67 ± 1,23 a	2,00 ± 0,71 b	0,01	2,80 ± 0,75 b	12,23 ± 2,03 a	0,01	9,43	0,01

Les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$; p : probabilité.

Tableau XIV : nombres d'entre-nœuds et de capsules en fonction des traitements

Sections	Entre-nœuds		Gain	P	Capsules		Gain	P
	Témoin	Test			Témoin	Test		
	NPK	NPK+dolomie+ urée+KCl			NPK	NPK+dolomie +urée+KCl		
Nambigué	3,23 ± 1,15 b	13,57 ± 0,90 a	10,34	0,01	2,80 ± 0,65 b	16,33 ± 3,48 a	15,53	0,01
Torla	2,83 ± 1,14 b	11,30 ± 1,51 a	8,47	0,01	3,17 ± 1,20 b	13,10 ± 2,90 a	9,93	0,01
Benifesso	3,10 ± 1,02 b	12,13 ± 1,32 a	9,03	0,01	2,87 ± 0,69 b	16,10 ± 2,71 a	13,23	0,01
Gnanmandô	3,03 ± 1,27 b	12,77 ± 2,08 a	9,74	0,01	3,73 ± 1,81 b	18,33 ± 4,09 a	14,60	0,01
Pleuhouo	2,67 ± 0,98 b	11,27 ± 1,32 a	8,60	0,01	3,13 ± 0,95 b	13,63 ± 2,55 a	10,50	0,01
	NPK	NPK+urée+KCl			NPK	NPK+urée+KCl		
Diaratchè	2,53 ± 1,13 b	12,97 ± 0,99 a	10,44	0,01	8,77 ± 2,66 b	11,27 ± 3,08 a	2,5	0,01
Soumailavogo	3,23 ± 0,96 b	12,93 ± 1,47 a	9,97	0,01	3,13 ± 0,69 b	19,17 ± 2,59 a	16,06	0,01
Nioronigué	3,13 ± 1,37 b	12,00 ± 1,04 a	8,87	0,01	3,33 ± 0,98 b	14,27 ± 3,58 a	10,97	0,01
Nambolvogo	3,03 ± 1,71 b	11,70 ± 1,47 a	8,67	0,01	2,97 ± 0,48 b	14,53 ± 3,97 a	11,56	0,01
Ouangolodougou	2,83 ± 1,22 b	13,00 ± 1,76 a	10,17	0,01	3,90 ± 1,30 b	17,87 ± 2,50 a	13,97	0,01

Les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$; p : probabilité.

3.1.3.1.4. Effet sur le rendement du cotonnier

Les rendements du cotonnier calculés selon les cas (témoins et tests) sont reportés dans le tableau XV. Il en ressort que les parcelles tests ont produit 8 à 12 fois plus abondamment que les parcelles témoins. En effet, les rendements ont varié de $2009,93 \pm 1123,37$ à $2439,60 \pm 1006,54$ kg/ha en parcelles tests, tandis qu'en parcelles témoins, ces résultats ont oscillé entre $172,53 \pm 52,32$ et $289,27 \pm 228,06$ kg/ha. Cette variation est *a priori*, significative.

Tableau XV : rendements du cotonnier en fonction des traitements

Sections	Rendements (kg/ha)		Gain	P
	Témoin	Test		
	NPK	NPK+dolomie+urée+KCl		
Nambigué	$172,53 \pm 52,32$ b	$2149,60 \pm 1002,66$ a	1977,07	0,01
Torla	$218,86 \pm 81,88$ b	$2051,65 \pm 830,25$ a	1832,79	0,01
Benifesso	$247,93 \pm 147,37$ b	$2162,93 \pm 1440,68$ a	1915	0,01
Gnanmandô	$289,27 \pm 228,06$ b	$2404,87 \pm 1944,67$ a	2115,6	0,01
Pleuhouo	$270,33 \pm 193,71$ b	$2228,93 \pm 860,49$ a	1958,6	0,01
	NPK	NPK+urée+KCl		
Diaratchè	$265,87 \pm 208,52$ b	$2233,13 \pm 1077,31$ a	1967,26	0,01
Soumailavogo	$181,27 \pm 104,35$ b	$2009,93 \pm 1123,37$ a	1828,66	0,01
Nioronigué	$253,47 \pm 217,13$ b	$2439,60 \pm 1006,54$ a	2186,13	0,01
Nambolvogo	$263,33 \pm 150,59$ b	$2260,93 \pm 1179,57$ a	1997,6	0,01
Ouangolodougou	$229,60 \pm 113,29$ b	$2181,69 \pm 936,03$ a	1952,09	0,01

Les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$; p : probabilité.

Un aperçu de deux parcelles de cotonniers au stade de la récolte est présenté par la figure 16. L'une est la parcelle témoin de la section de Torla (Figure 16.A) et l'autre, la parcelle test de la même section (Figure 16.B). Elle permet de mieux percevoir les différences importantes de rendements apparues entre les deux traitements de l'étude. En effet, en parcelle test, les capsules sont nettement plus ouvertes qu'en parcelles témoin.



← Champ de coton avec plus de feuillage et moins de capsules ouvertes

A. Champ de coton en parcelle témoin



← Champ de coton avec moins de feuillage et plus de capsules ouvertes

B. Champ de coton en parcelle test

Figure 26 : vues de parcelles témoin et test de la section de Torla

3.1.3.1.5. Effets spécifiques des traitements tests sur le rendement

Le résultat de l'ACP réalisé pour comparer les effets des deux raisonnements de fertilisation appliqués est présenté sur la Figure 17. En fait, la figure montre les relations entre certaines propriétés du sol entre elles (pH, MO, Pass, Nt, C/N, CEC, SBE, V, N-NH₄⁺ et NO₃⁻), mais aussi les relations entre ces propriétés du sol et le rendement du coton. De même, on peut apprécier sur la figure le degré de corrélation entre les fertilisations raisonnées (T1 et T2) et le rendement du coton. C'est cette dernière relation qui est analysée particulièrement à ce niveau de présentation des résultats comme cela a été prévu dans les méthodes (paragraphe 2.2.7). Il ressort qu'aucun traitement test n'est mieux corrélé au rendement que l'autre.

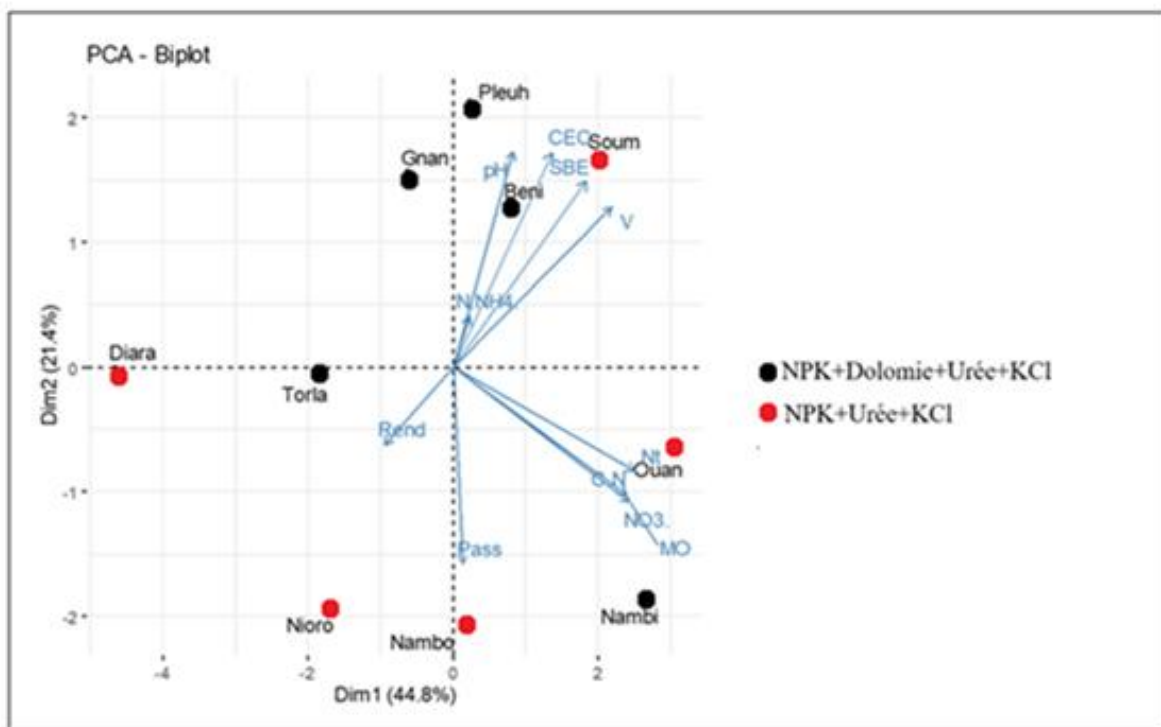


Figure 27 : relation entre les traitements tests et le rendement du coton

Pleuh : Pleuhouo ; Gnan : Gnanmandô ; Soum : Soumailavogo ; Beni : Benifesso ; Diara : Diaratchè ; Nioro : Nioronigué ; Nambo : Nambolvogo ; Nambi : Nambigué ; Ouan : Ouangolodougou

3.1.3.2. Somme des bases échangeables, facteur N-NH₄⁺ et rendements obtenus lors des trois expérimentations suivantes (2019 à 2022)

Le tableau XVI présente les sommes des bases échangeables ainsi que les taux de N-NH₄⁺ ressortis des sols évalués lors des trois dernières expérimentations qui ont suivi celle dont les résultats ont été présentés antérieurement. Quels que soient le facteur mesuré et la période de mesure, les résultats diffèrent significativement d'un site à un autre ($p < 0,05$).

La figure 18 montre l'évolution du taux de N-NH₄⁺ et les SBE des sols étudiés lors des trois dernières années d'expérimentation. Il apparaît qu'au fil des années le taux de N-NH₄⁺ ainsi que les SBE diminuent dans toutes les sections. Malgré cette diminution du taux de N-NH₄⁺ ainsi que les SBE, il n'existe pas de relation entre les SBE et les N-NH₄⁺ contrairement à ceux qui ont été observés avant la première fertilisation raisonnée des sols (Figure 19). Comme dans la première d'expérimentation, les rendements mesurés durant les trois dernières années sur les parcelles tests sont demeurés largement supérieurs aux rendements obtenus sur les parcelles témoins. Ces rendements se sont amenuisés progressivement avec le temps. Ce résultat est illustré par la figure 20.

Tableau XVI : somme des bases échangeables et taux de N-NH₄⁺

Sections	Année 2 (2019 à 2020)		Année 3 (2020 à 2021)		Année 4 (2021 à 2022)	
	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	SBE (cmol/kg)	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	SBE (cmol/kg)	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	SBE (cmol/kg)
Benifesso	0,51 ± 0,82 a	2,80 ± 1,30 ab	0,26 ± 0,05	2,38 ± 0,79 ab	0,15 ± 0,08	1,71 ± 0,50 b
Diarratchè	0,21 ± 0,15 b	2,01 ± 0,59 b	0,18 ± 0,04	1,71 ± 0,53 b	0,15 ± 0,04	1,5 ± 0,21 b
Gnanmandô	0,32±0,13 ab	2,80 ± 1,34 ab	0,27 ± 0,08	1,96 ± 0,67 ab	0,16 ± 0,06	1,5 ± 0,21 b
Nambigué	0,36 ± 0,20 ab	3,25 ± 1,38 a	0,29 ± 0,01	2,24 ± 0,71 ab	0,17 ± 0,04	1,53 ± 0,33 b
Nambolvogo	0,23 ± 0,23 ab	2,45 ± 0,65 ab	0,20 ± 0,09	1,95 ± 0,61 ab	0,15 ± 0,04	1,33 ± 0,30 b
Niorornigue	0,38 ± 0,12 ab	2,63 ± 0,49 ab	0,25 ± 0,11	2,07 ± 0,90 ab	0,19 ± 0,10	1,23 ± 0,12 b
Ouangolodougou	0,33 ± 0,14 ab	3,00 ± 0,70 ab	0,29 ± 0,03	2,45 ± 0,78 ab	0,19 ± 0,07	2,16 ± 0,71 a
Pleuhouo	0,40 ± 0,24 ab	3,17 ± 1,66 ab	0,34 ± 0,11	2,88 ± 0,69 a	0,16 ± 0,04	1,53 ± 0,33 b
Soumailavogo	0,32 ± 0,12 ab	2,17 ± 0,58 ab	0,25 ± 0,07	1,79 ± 0,23 ab	0,14 ± 0,09	1,3 ± 0,16 b
Torla	0,28 ± 0,08 ab	2,49 ± 0,48 ab	0,22 ± 0,04	2,19 ± 0,66 ab	0,17 ± 0,04	1,78 ± 0,60 b
p	0,02	0,02	0,001	0,001	0,07	0,001

p : probabilité ; les moyennes affectées d'une même lettre dans une même colonne sont similaires au seuil $\alpha < 0,05$; N-NH₄⁺ : Azote minéralisable ; SBE Somme des Bases Echangeables.

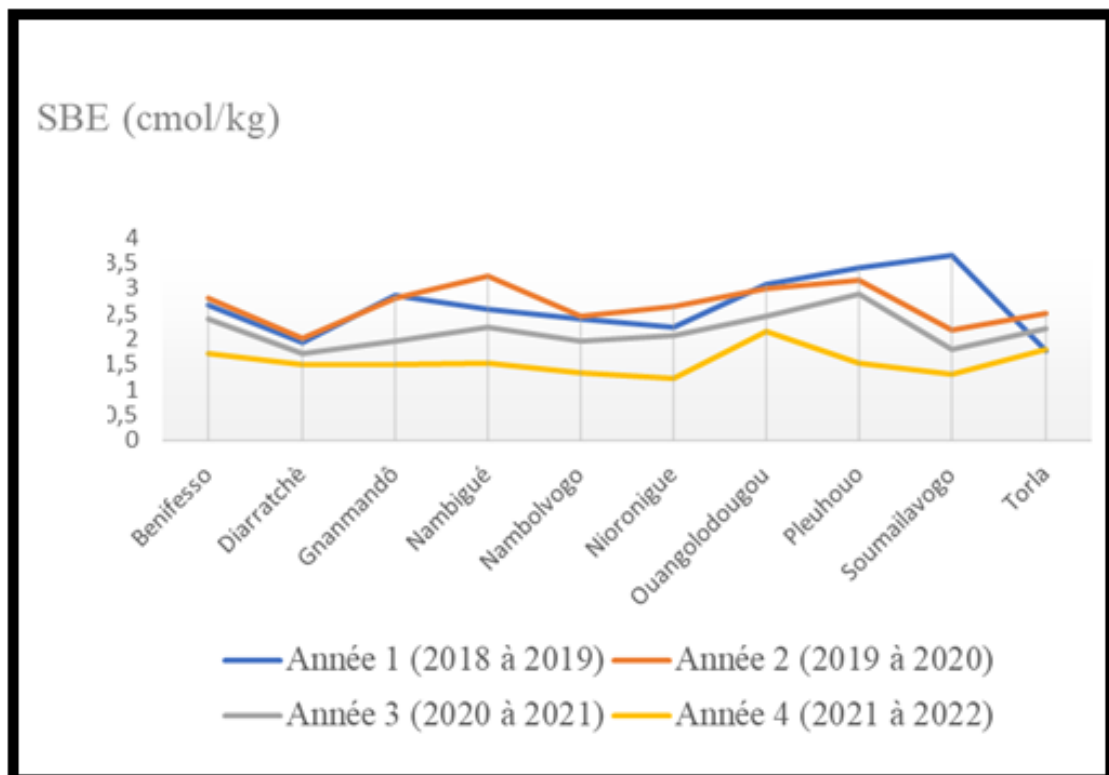
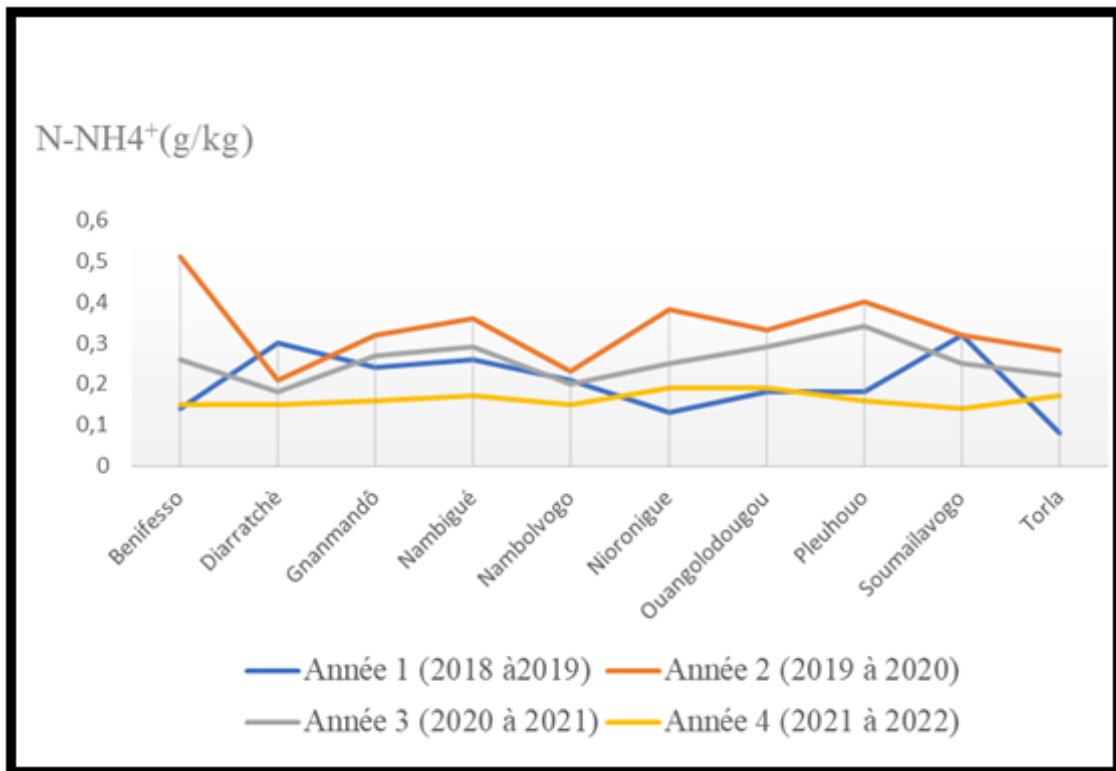


Figure 28 : évolution du taux de N-NH₄⁺ et les SBE des trois dernières années d'expérimentation

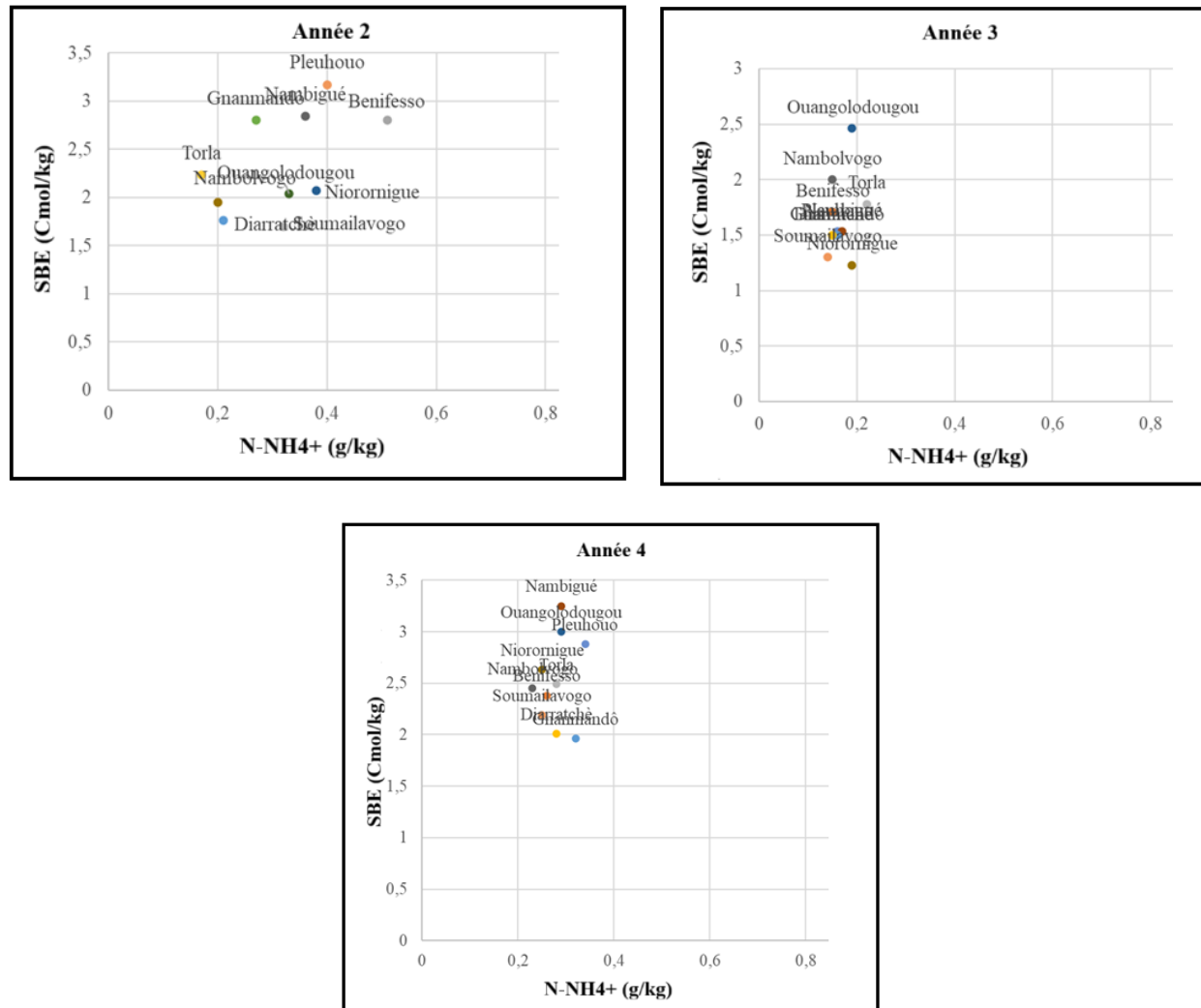


Figure 29 : évolution des SBE des sols en fonction de leurs taux de N-NH₄⁺ pour le deuxième, troisième et quatrième année d'expérimentation

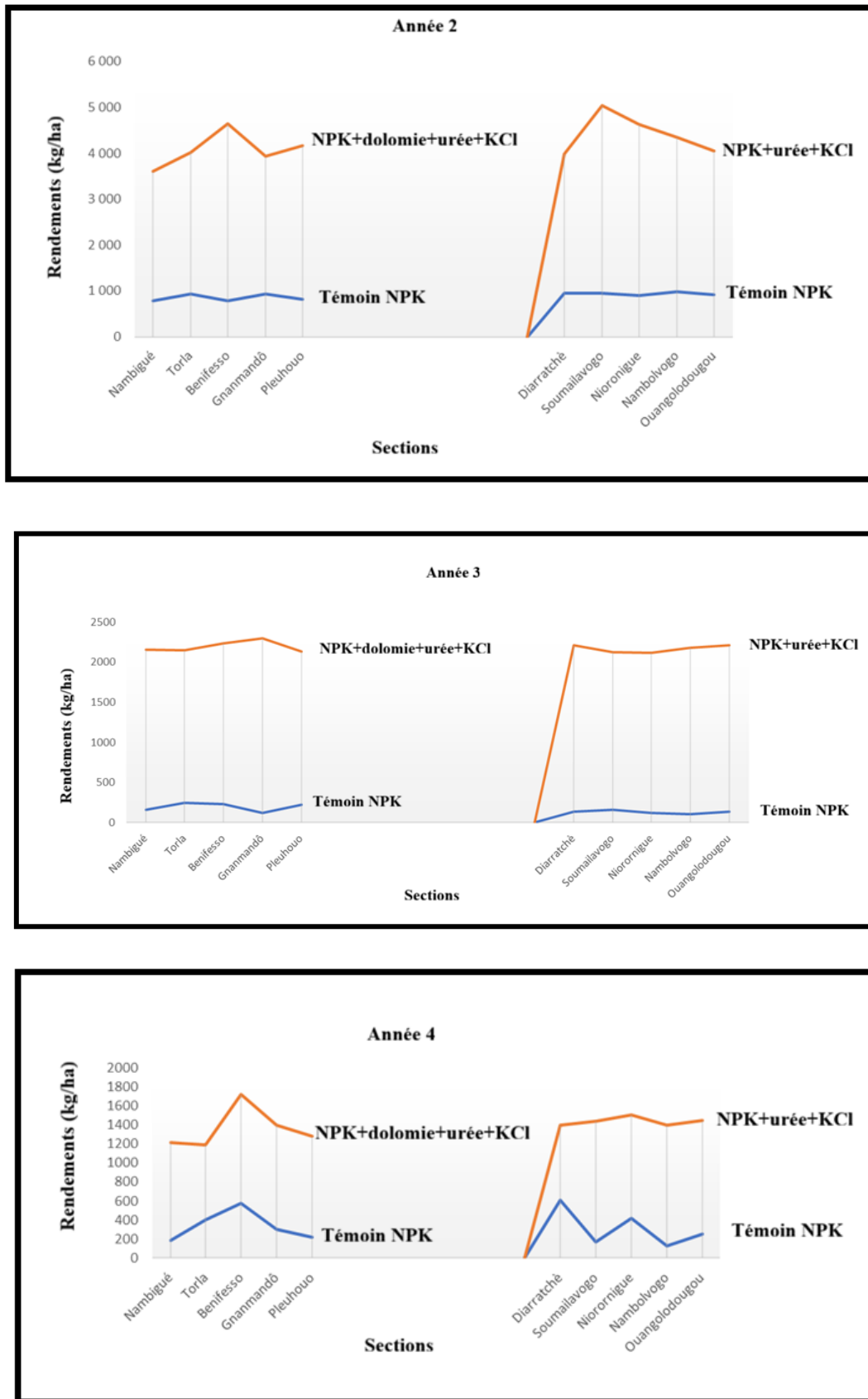


Figure 30 : évolution des rendements de coton en fonction des années obtenus au cours des deuxième, troisième et quatrième année d'expérimentation

3.2. DISCUSSION

L'étude a abouti à plusieurs résultats qui sont en lien principalement avec : i) les propriétés morphologiques des sols ; ii) les caractéristiques chimiques et la fertilité minérale des sols et iii) l'effet de la fertilisation raisonnée sur le cotonnier.

3.2.1. Caractéristiques morphologiques et qualité des sols étudiés

Les sols analysés sont généralement profonds (85 à 102 cm), bien différenciés en horizons et riches en éléments grossiers (graviers, gravillons, concrétions), mais dépourvus de minéraux primaires. Leurs horizons humifères sont relativement minces (5 à 10 cm). Bien que le drainage soit satisfaisant en surface, il se détériore avec la profondeur. De même, la texture sablo-argileuse observée en surface devient progressivement plus argileuse en profondeur, où une compaction (induration) des horizons apparaît entre 85 et 102 cm.

Vu leurs caractéristiques morphologiques, les sols étudiés sont des sols ferrallitiques. En effet, selon Duchaufour (1977), la ferrallitisation, principalement due au climat chaud et humide comme c'est le cas dans la zone d'étude, représente le stade ultime de l'évolution et de l'altération des sols. Ce processus implique une dissolution, une hydrolyse (en milieu neutre ou légèrement acide) et une oxydation, conduisant à la transformation complète des minéraux primaires (excepté le quartz) et à la libération d'oxydes de fer et d'aluminium. Ces oxydes seraient responsables de la coloration brun rougeâtre (2,5YR4/4) des horizons observés à Benifesso, Dabavogo, Nambigué, Torla, Nioronigué et Soumailavogo.

L'enrichissement en éléments grossiers, souvent sous forme de concrétions ferromanganiques, est un phénomène secondaire fréquent dans les sols ferrallitiques, résultant d'un remaniement pédologique (Kervazo & Texier, 2011 ; Ouali, 2016). Selon Schwartz et Lanfranchi (1990), ce remaniement peut provenir des transports latéraux (colluvionnement), de l'ablation, d'apports éoliens, d'activités anthropiques ou du brassage biologique. Bien que ces éléments grossiers améliorent la portance, l'aération et l'infiltration du sol, ils ont un impact négatif sur sa fertilité agronomique : réduction de la réserve en eau, difficultés de travail du sol et lessivage accru des nutriments (Delaunois, 2013). De plus, leur présence excessive (au-delà de 50 % en poids ou 75 % en volume) entrave la pénétration et le développement des racines (Boyer, 1982).

L'induration du sol qui a été aussi observée fait partie également des phénomènes secondaires actifs qui affectent en général les sols ferrallitiques. Elle est causée soit par une concentration de sesquioxydes de fer, soit par une accumulation d'argile dans l'horizon

(Perraud, 1971). Dans ce dernier cas, la structure compacte des horizons profonds ralentit l'évacuation de l'eau, provoquant une stagnation et une hypoxie néfaste à l'enracinement des cultures (Concaret, 1981).

Dans cette étude, les parcelles sélectionnées présentaient des horizons humifères réduits (5 à 10 cm), probablement en raison d'une surexploitation agricole, de l'absence de jachères prolongées et de la consommation des résidus de culture par le bétail (Hinimbo *et al.*, 2019). Les jachères favorisent pourtant la régénération du sol en stimulant l'humification et l'apport de matière organique (Muller, 1980). À l'inverse, la disparition des jachères limite la fertilité et la biorestauration des sols. Comme le souligne Duchaufour (1991), la décomposition de la matière organique joue un rôle clé dans les processus pédogénétiques et influence directement la morphologie des sols.

En somme, les contraintes agronomiques (forte charge en éléments grossiers, induration, mauvais drainage) apparaissent entre 85 et 102 cm de profondeur, bien en dessous des 15 cm superficiels explorés par les racines du cotonnier. Ainsi, d'un point de vue morphologique, ces sols sont adaptés à cette culture, sous réserve que leurs propriétés chimiques soient également favorables.

3.2.2. Caractéristiques chimiques et qualité des sols étudiés

Les résultats relatifs aux propriétés chimiques des sols révèlent que les sols des 10 secteurs retenus pour les premiers essais agronomiques présentent tous une carence en N, P et K. Toutefois, plusieurs sols présentent des carences spécifiques. En effet, les sols de Nambigué, Torla, Bénifesso, Gnamandô et Pleuhouo sont déficients en calcium (Ca) lorsqu'on les compare au taux de magnésium (Mg). Les sols de Ouangolodougou, Bénifesso et Nambigué affichent, quant à eux, une insuffisance en potassium (K) au regard du taux de Mg. Par ailleurs, l'ensemble des sols de ces dix sections présente un déficit en potassium (K) au regard la capacité d'échange cationique (CEC), ce qui désigne le potassium comme l'élément le plus limitant dans la première expérimentation.

La carence en K, fréquente dans les sols cotonniers des zones tropicales a été également observée par Koulibaly *et al.*, 2009. Cela s'explique par sa forte lixiviation, notamment dans les sols sableux. Ce déficit, qu'on l'évalue par rapport au magnésium (Mg) ou à la capacité d'échange cationique (CEC), indique une faible rétention de cet élément essentiel. Selon Bel (2021), les réservoirs de Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ dans les sols conditionnent leur biodisponibilité pour les plantes. Contrairement au Ca et au Mg, le K est moins retenu dans l'humus, car il n'entre

pas directement dans la structure végétale. Il se libère donc plus rapidement dans la solution du sol, augmentant son risque de lessivage. De plus, une partie du K est stockée dans la biomasse microbienne (Lorenz *et al.*, 2010 ; Kohei *et al.*, 2014 ; Meena *et al.*, 2014 ; Van der Heijden *et al.*, 2014 ; Yaghoubi *et al.*, 2019). Or, dans les sols étudiés, l'activité microbienne semble réduite, comme en témoignent les ratios C/N élevés ($14,20 \pm 0,78$ à $15,36 \pm 0,31$), dépassant la plage optimale (9 à 12).

Enfin, bien que le K soit abondant dans la croûte terrestre (7^{ème} ou 8^{ème} élément le plus présent selon Wedepohl, 1995), il est majoritairement piégé dans la structure cristalline des minéraux (90 à 98 %), ce qui le rend peu disponible pour les plantes. Cette carence généralisée en K est d'ailleurs typique des sols tropicaux (Sparks & Huang, 1985). Dans les sols tempérés par contre, l'abondance de K et sa présence dans de nombreux minéraux font que ses flux qui proviennent de l'altération des roches est plus importante que ceux de Ca et de Mg dans les sols en général (Legout *et al.* 2020).

Le calcium (Ca) est plus abondant que le magnésium (Mg) dans les sols. En effet, c'est l'un des cations les plus abondants dans la croûte terrestre. Le magnésium est également présent en quantités significatives, mais en moindre proportion. Cependant, l'abondance relative de ces deux éléments est influencée par de nombreux facteurs et peut varier considérablement selon les types de sols et les conditions locales (Mihoub, 2017 ; Oursin, 2021). La présente étude ayant été réalisée dans le même milieu local (mêmes conditions environnementales) où les sols sont en plus tous ferrallitiques, les déficits en Ca constatés dans les sols de plusieurs sections (Nambigué, Torla, Bénifesso, Gnamandô et pleuhouo) par rapport aux taux de Mg pourraient s'expliquer par une préférence accrue du Ca par le cotonnier ou par les pratiques culturales adoptées par les utilisateurs de ces sols (le labour profond ou superficiel) (Bassala *et al.*, 2008 ; Gérardaux, 2009 ; Hinimbio, 2019).

L'azote (N), élément important pour soutenir la croissance végétative et assurer des rendements élevés, doit être facilement disponible, mais pas en excès, de la floraison à la formation des capsules (Ribeiro *et al.*, 2008). En l'absence de fertilisation, les plantes le puisent via la minéralisation de l'humus ou des résidus cultureux, un processus microbien transformant l'azote organique en ammonium (NH_4^+), puis en nitrates (NO_3^-). La disponibilité de l'azote dans le sol dans le contexte de cette étude dépend fortement du niveau de matière organique ou de carbone organique du sol.

La carence en N constatée est, selon Emmanuel *et al.* (2018), une caractéristique commune aux sols dans les bassins cotonniers ivoiriens. C'est vraisemblablement le résultat d'une minéralisation lente de la matière organique, évoquée déjà lors de la discussion des faibles taux de K. Cette minéralisation lente traduite par le ratio C/N élevé des sols ($C/N > 12$), s'accompagne effectivement par une faible libération de l'azote minéral. Ce fait peut être imputé à beaucoup de facteurs, notamment la présence dans le sol de fractions organiques peu dégradables qui proviendraient des résidus de coton non consommés par le bétail et les animaux transhumants (Bérubé-Girouard *et al.*, 2024). Ces résidus sont en effet riches en lignine, un polymère complexe et résistant à la dégradation microbienne (La Salle, 2004 ; Maron *et al.*, 2009 ; Toundou, 2016). Cette complexité chimique requiert plus de temps aux microorganismes du sol pour décomposer ces matières et libérer l'azote.

Les teneurs en phosphore assimilable (Pass) des sols étudiés (2,13 à 13,37 mg/kg) sont inférieures au seuil critique de 15 mg/kg défini par Landon (1991). De ce fait, ces sols sont classés comme déficients en phosphore. Cet état de déficience résulterait des caractéristiques physico-chimiques spécifiques comme la texture sableuse qui limite la capacité du sol en général à retenir les éléments fertilisants (Toundou, 2016 ; Tahraoui, 2024). De plus, une concentration élevée d'oxydes de fer (FeO) et d'aluminium (Al_2O_3) dans le sol, caractéristique propre aux sols ferrallitiques, induit une fixation chimique forte et souvent irréversible du phosphore. Le phosphore fixé forme des complexes insolubles avec ces oxydes, ce qui le rend indisponible pour plusieurs cultures dont le cotonnier (Azzi, 2016 ; Pirlot, 2019). Par ailleurs, la surexploitation agricole, le recours à des pratiques culturales non adaptées et la dégradation progressive de la fertilité des sols contribuent à accentuer la carence en phosphore (Assemien, 2018 ; Ferd, 2022). En somme, la déficience en P observée dans les sols étudiés est particulièrement préoccupante dans la mesure où le cotonnier est une plante exigeante en phosphore, pour assurer sa croissance optimale, sa floraison abondante et une bonne qualité de fibre (Sanogo, 2017). Il intervient aussi dans les processus de transfert d'énergie (ATP, ADP), dans la constitution des acides nucléiques (ADN, ARN) et dans la stimulation du développement racinaire (Fageria *et al.*, 2010). Il était donc important que la fertilisation raisonnée appliquée prenne en compte cet élément.

3.2.3. Pertinence et effet de la fertilisation appliquée

Deux groupes de fertilisants minéraux ont été appliqués lors de la première expérimentation : le NPK (15-15-15), la dolomie ($CaMg(CO_3)_2$) à 30 % CaO, l'urée (46 % N) et le KCl (60 % K_2O) d'une part et, d'autre part, le NPK (15-15-15), l'urée (46 % N) et le KCl

(60 % K₂O). Le premier groupe a été appliqué aux sols déficients en N, P, K⁺ et Ca²⁺ et le second groupe aux sols déficients en N, P et K⁺.

Les sources de K⁺ sont diversifiées (NPK, KCl) car cet élément est avéré comme l'élément le plus déficient. Les sources de N sont également diversifiées (NPK et urée) pour diverses raisons très importantes : c'est en effet un élément essentiel pour la croissance végétative. Aussi, commande-t-il l'assimilation chlorophyllienne, ce qui fait de lui le principal facteur qui augmente quantitativement la production agricole (Mosier *et al.*, 2004). La démarche ainsi adoptée s'apparente effectivement à une fertilisation raisonnée car elle apporte au cotonnier juste les éléments minéraux qui lui manque et cela, dans les proportions qu'il faut (Bayala *et al.*, 2007). Ce faisant, on peut aboutir à une optimisation de la production tout en minimisant l'impact environnemental.

Cette première expérimentation a montré une différence hautement significative au niveau des rendements, vu que les parcelles où la fertilisation a été raisonnée ont produit 8 à 12 fois plus abondamment que les parcelles témoins. Ce résultat s'est construit progressivement par l'amélioration du développement de la plante, principalement, la taille, les nombres de branches fructifères et des entre-nœuds ainsi que le nombre de capsules du cotonnier par pied. Ce résultat rejoint ceux de Bellaloui *et al.* (2021) qui ont attesté qu'une architecture de la plante qui maximise le développement des branches fructifères est essentielle pour un rendement élevé. Le raisonnement de la fertilisation a manifestement réussi à orienter la physiologie de la plante en augmentant le nombre d'entre-nœuds et, par conséquent, les sites de fructification potentiels. Toutefois, les rendements de coton obtenus n'ayant pas permis de différencier significativement les deux types de fertilisations raisonnées appliqués, dénotent ainsi la pertinence du mode de raisonnement de la fertilisation appliqué qui découle des travaux de Tié (1995).

En revanche quand la fertilisation n'est pas raisonnée, elle peut conduire à un apport excessif d'engrais, qu'ils soient chimiques ou organiques, qui, dès lors, peut avoir des effets négatifs sur la nutrition végétale (Ferd, 2022). Au-delà de la simple "brûlure" des racines, ces effets négatifs incluent, entre autres, un déséquilibre nutritionnel, une altération de la qualité du sol et des problèmes de santé pour les plantes et l'environnement.

La "brûlure" des racines est causée effectivement par un excès d'engrais, notamment d'azote, ce qui entraîne une croissance excessive et déséquilibrée des plantes, au détriment de la formation de fleurs et de fruits. La croissance trop rapide et déséquilibrée rend les plantes

plus vulnérables aux attaques de maladies et de ravageurs. Par ailleurs, un système racinaire affaibli par l'excès d'engrais rend les plantes plus sensibles au manque d'eau. La surfertilisation a pour effet aussi d'affecter la qualité des capsules, réduisant la production du cotonnier (Cretenet & Gourlot, 2016).

D'autre part, le bon résultat obtenu a été atteint car les fertilisants ayant été apportés à la quantité qu'il faut, ont amélioré sensiblement les propriétés du sol (Pernes & Tessier, 2002). L'excès d'engrais NPK, par exemple, peut avoir des effets négatifs sur la structure du sol en perturbant son équilibre biologique et chimique (Diallo, 2019). Il s'ensuit une diminution de la décomposition de la matière organique qui est essentielle pour la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau (Hinimbio, 2019).

En ce qui concerne la dolomie utilisée, son excès dans le sol peut entraîner une modification de la structure physique du sol en le rendant plus compact, diminuant ainsi sa porosité et sa capacité à bien drainer l'eau (Boumzaout, 2019 ; Abdennour, 2021). Si le sol est déjà riche en calcium, on pourrait assister à une insolubilisation de certains éléments nutritifs comme le phosphore et le fer, rendant leur absorption par les plantes plus difficile (Mohamed, 2014 ; Plassard *et al.*, 2015). En raison des effets combinés sur la structure, la rétention d'eau et l'absorption des nutriments, l'excès de dolomie entraîne une diminution des rendements agricoles (Jourdain, 2023)

L'excès d'urée dans le sol, souvent lié à une utilisation excessive d'engrais azotés, peut avoir des effets négatifs sur la structure du sol. Bien que l'urée soit une source d'azote importante pour les plantes, son hydrolyse (transformation en ammoniac) excessive entraîne une acidification locale du sol, affecte les propriétés physiques et chimiques, et nuit potentiellement à la vie microbienne (Djouider, 2023).

Un excès de chlorure de potassium (KCl) dans le sol est susceptible d'affecter aussi la structure du sol en modifiant l'agrégation des particules (Mouas, 2014). Aussi, le potassium, en tant que cation, peut déplacer d'autres cations (Ca, Mg) du complexe argilo-humique, ce qui conduit à une acidification du sol et une perte de ces éléments essentiels par lessivage (Widad, 2020).

Toutefois, il est judicieux de préciser que le raisonnement de la fertilisation ne permet pas d'éviter que la sur-fertilisation. La sous-fertilisation, c'est-à-dire, un apport insuffisant d'éléments nutritifs aux plantes, a été aussi évitée, et avec elle, ses conséquences négatives sur la croissance et le développement des plantes, ainsi que sur la qualité et le rendement des

productions agricoles (Dalmas *et al.*, 2010). En effet, ces constats sont faits en général quand les besoins des cultures ne sont pas couverts du fait que beaucoup d'auteurs promeuvent une réduction de l'usage des engrais minéraux dans les systèmes agricoles pour limiter certains impacts environnementaux négatifs. Il peut s'ensuivre une aggravation de l'épuisement des nutriments dans les sols cultivés car le recours à des pratiques alternatives, telles que la culture intercalaire de légumineuses et l'utilisation de fumier organique, ne permet pas toujours de couvrir de manière satisfaisante les besoins élevés en azote des cultures (Risède *et al.*, 2020). Autrement dit, la fixation biologique de l'azote par les légumineuses et le recyclage du fumier, bien qu'indispensables, demeurent insuffisants pour répondre aux exigences nutritionnelles des cultures (Vertès *et al.*, 2010). Ainsi, l'intégration raisonnée des engrais minéraux, combinée à des pratiques agroécologiques, apparaît comme une stratégie pertinente pour stimuler durablement la production agricole (Salembier, 2019).

En effet, les confusions observées relativement à l'évolution de la SBE en fonction du facteur $N-NH_4^+$ durant les trois années qui ont précédé la fertilisation appliquée sont vraisemblablement les signes d'une impasse de fertilisation due à l'arrière effet de cette première fertilisation. Cette analyse est d'autant vraie que les rendements de coton mesurés sur les parcelles tests n'ont cessé d'être largement plus importants que ceux obtenus sur les parcelles témoins. C'est la preuve que l'arrière-effet d'une fertilisation raisonnée du sol correspond effectivement à l'impact résiduel ou différé des apports d'engrais ou d'amendements sur la fertilité du sol et la croissance des cultures au-delà de la saison culturale immédiate (Dutordoir, 2006). Cet effet est souvent difficile à mesurer car il est masqué par d'autres apports, mais il résulte essentiellement de l'amélioration progressive des caractéristiques chimiques, physiques et biologiques du sol (Maha, 2010 ; Zomboudre, 2009 ; Mjejra, 2015 ; Merabti, 2015). Il peut aussi s'amenuiser progressivement et s'éteindre, pour permettre une reprise de la fertilisation. C'est ce qui a semblé se dessiner dans cette recherche à la récolte de la quatrième expérimentation, la différence entre les rendements témoin et test s'étant avérée la plus basse de toute l'étude.

L'extinction de l'arrière-effet d'une fertilisation du sol correspond à la diminution progressive et finalement à la disparition de l'impact résiduel des apports d'engrais ou d'amendements sur la fertilité du sol et la croissance des cultures. Plusieurs causes expliquent cette extinction. Elles peuvent s'expliquer par des processus de transformation, de consommation et de dynamique du sol (Taïbi, 2015) :

- la minéralisation et la minéralisation progressive des éléments fertilisants apportés. Une fois que les nutriments accumulés dans le sol sont consommés par les plantes ou lessivés, leur effet résiduel s'atténue ;
- la transformation biologique et chimique des résidus, qui peut conduire à des pertes par volatilisation, lessivage ou fixation dans des formes non disponibles pour les plantes ;
- la disparition progressive des améliorations physiques et biologiques induites, telles que la biomasse microbienne ou la structure du sol, lorsque les apports cessent, réduisant le support de fertilité ;
- des apports insuffisants ou l'absence de renouvellement des apports fertilisants, laissant le sol revenir à un état moins fertile ;
- l'impact d'autres facteurs négatifs comme l'érosion, la surexploitation, ou une mauvaise gestion culturale, pouvant accélérer l'extinction de cet effet.

En somme, l'arrière-effet s'atténue naturellement avec le temps après l'arrêt ou la diminution des apports, car le sol et son écosystème retournent progressivement à leur état d'équilibre initial, sans apport externe de nutriments. La fertilisation doit donc être poursuivie de manière raisonnée pour maintenir ces bénéfices à long terme. Cette extinction est donc le reflet d'un cycle naturel de consommation et de renouvellement des ressources fertilisantes dans le sol (Taïbi, 2015).



**CONCLUSION ET
PERSPECTIVES**

La présente étude, centrée sur la fertilisation raisonnée des sols suivant la technique N-NH₄⁺ dans le cadre de la production cotonnière en Côte d'Ivoire, met en évidence l'importance cruciale de la gestion adaptée des ressources édaphiques pour assurer la durabilité de cette culture stratégique. Les investigations réalisées en milieu paysan dans la région de Ouangolodougou ont permis d'identifier les contraintes majeures liées à la fertilité des sols, de proposer une formulation d'engrais ajustée aux caractéristiques physico-chimiques locales et d'évaluer leur impact agronomique.

Sur le plan diagnostic, les analyses morphopédologiques des sols étudiés ont révélé que ceux-ci sont adaptés à la culture du cotonnier. Cependant leurs propriétés chimiques sont défavorables. Le déficit en potassium dans tous les sols étudiés, ainsi que les carences ponctuelles en calcium et magnésium, constituent des facteurs limitants majeurs pour la croissance et la productivité du cotonnier. Ce constat met en lumière que les formulations des engrais minéraux ne conviennent plus pour une production optimale du coton.

La mise en œuvre de la technique N-NH₄⁺, associée à un ajustement précis des apports minéraux, a permis d'améliorer significativement les paramètres de croissance et de rendement du cotonnier. En comparaison avec les pratiques usuelles, la technique N-NH₄⁺ a non seulement optimisé la performance des engrais, mais également contribué à une meilleure résilience des plantes face aux contraintes édaphiques. On en a déduit que la deuxième hypothèse formulée pour l'étude n'a pas été vérifiées, quand la troisième l'a été. En effet, ces hypothèses stipulaient, dans l'ordre, que : 1) les doses d'engrais minéraux apportés aux sols sous cotonnier conviennent à la production optimale du coton ; 2) une fertilisation raisonnée accroît le rendement du cotonnier.

Cette technique ayant favorisé une optimisation de la performance des intrants, est susceptible de contribuer à réduire sensiblement sur le moyen terme les dépenses engagées habituellement par les cultivateurs pour l'achat des fertilisants tout en maximisant les rendements. Ce faisant, c'est la rentabilité des exploitations agricoles des paysans en limitant les gaspillages d'engrais et en assurant une meilleure efficacité fertilisante adaptée aux besoins réels du sol que cette recherche promet. Elle est donc essentielle pour la durabilité financière et la sécurité alimentaire des producteurs locaux, et, par extension, pour un renforcement de la compétitivité de la filière coton en Côte d'Ivoire.

Ainsi, il apparaît clairement que l'intégration d'un diagnostic fin de la fertilité des sols, couplé à une formulation spécifique des engrais, constitue un levier déterminant pour concilier

productivité agricole, préservation des ressources naturelles et durabilité socio-économique. Ce modèle de gestion raisonnée des intrants s'inscrit pleinement dans les objectifs de l'agriculture durable, en limitant les pertes d'éléments nutritifs et en réduisant les risques de dégradation environnementale.

Cette étude a montré qu'elle constitue une voie prometteuse pour relever les défis actuels de la production cotonnière en Côte d'Ivoire. En alliant performance agronomique, viabilité économique et durabilité environnementale, elle offre des perspectives concrètes pour renforcer la résilience de la filière et contribuer à la sécurité alimentaire et aux objectifs de développement durable.

Toutefois, plusieurs points méritent encore des investigations approfondies afin d'optimiser et de pérenniser cette approche :

- 1) en premier lieu, il conviendrait d'évaluer l'effet de la technique N-NH₄⁺ sur la dynamique à long terme des éléments nutritifs dans le sol, notamment en ce qui concerne la disponibilité du phosphore et des oligo-éléments essentiels. Par ailleurs, l'étude des interactions entre la fertilisation ammoniacale et l'activité microbienne pourrait fournir des indications précieuses sur les mécanismes biologiques impliqués dans la minéralisation et la rétention des nutriments ;
- 2) en second lieu, l'impact de cette technique sur la qualité des fibres de coton, paramètre clé pour la valorisation commerciale, demeure à documenter. Une analyse corrélant les pratiques de fertilisation, les propriétés technologiques des fibres et les conditions agro-climatiques locales permettrait de consolider les recommandations agronomiques. De plus, l'intégration de matières organiques locales (composts, résidus de cultures, fumures animales) en combinaison avec la fertilisation minérale raisonnée pourrait améliorer la structure du sol, stimuler l'activité biologique et renforcer la durabilité du système ;
- 3) tertio, une étude approfondie de l'impact économique de la pratique sur les revenus des paysans devrait permettre de renforcer les connaissances sur le bien-fondé de la fertilisation raisonnée et/ou encourager la valorisation de cette recherche ;
- 4) enfin, il serait pertinent d'élargir l'expérimentation à d'autres zones agroécologiques du pays afin de valider la transférabilité des résultats et d'adapter les recommandations aux divers contextes pédo-climatiques. L'appui à la formation des producteurs, ainsi que la mise en place de dispositifs participatifs de suivi et d'évaluation, seront essentiels pour assurer l'adoption et la diffusion à grande échelle de ces pratiques innovantes.



REFERENCES

- Abdenmour M. A. (2021). Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra)-Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Science de la Nature et de la Vie, Université Mohamed Khider de Biskra (Algérie) 161 p.
- Agricultural Research Reports, 916. Centre for Agricultural Publishing and documentation, Wageningen, 46 p.
- AGRIMET. (1991). Sols. Mémento de l'Agronome, Collections techniques rurales en Afrique. Paris (France) : 134-252.
- Ahouangninou C. (2013). Durabilité de la production maraîchère au sud-Bénin : un essai de l'approche écosystémique. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 333 p.
- Akanbi O.S.O., Ojeniyi S.O., Famaye A.O., Ipinmoroti R. R., Oloyede A. A., Oyewumi I. K., Ayegbonyin K., Adejobi K. B. & Idrisu M. (2014). Soil nutrients and cocoa seedling performance as influenced by plant residue ash and NPK fertilizer addition on a depleted soil in Ibadan, South Western, Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil science*, 4(1) : 1-4.
- Akédrin T. N., N'Guessan K., Aké A. E. & Aké S. (2010). Effet de Légumineuses herbacées ou subligneuses sur la productivité du maïs. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 8(2) : 953-963.
- Alaoui S. B. & Ajiro Y. (2005). Ministère de l'Agriculture du Développement Rural et de la Pêche. Guide Pratique pour la Fertilisation Raisonnée des Principales Cultures au Maroc. *Japan International Cooperation Agency*, 44 p.
- Angers D. A., Peasant A. & Vigneux J. (1992). Early cropping induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. *Soil Science Society of America Journal*, 56 : 115-119.
- Annabi M. (2005). Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris), 281 p.
- Annabi M., Fardeau J. C. & Bonzi M. (2009). Importance de la matière organique dans la fertilité des sols tropicaux. *Revue d'Agronomie Tropicale*, 58(3) : 295-307.

- Anselme H. M. K. (2016). Evaluation de l'efficacité de nouvelles formules d'engrais minéraux sur la nutrition minérale et le rendement du cotonnier sur des sols ferrallitique, ferrugineux et brun eutrophe. Mémoire de fin de cycle, URF Agronomie, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), 56 p.
- Araya T., Gebremedhin A., Baudron F., Hailemariam M., Birhane E., Nyssen J., Govaerts B. & Cornelis W. (2021). Influence of 9 years of permanent raised beds and contour furrowing on soil health in conservation agriculture based systems in Tigray region. Ethiopia. *Land Degradation and Development*, 32(3) : 1525-1539.
- Ardouin A. (2014). Guide pratique pour la description des sols de France. Conservatoire d'Espaces Naturels de Bourgogne, 24 p.
- Arguita D. A. O., Bationo B. A., Traore S., Cissé M. & Thiombiano A. (2022). Déterminants biophysiques et socioéconomiques de la gestion des parcs à anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) et à manguiers (*Mangifera indica* L.) en zone sud soudanienne du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). *Sciences Naturelles et Appliquées*, 41(2) : 137-159.
- Armel J. L. (2008). Effet de différentes pratiques de tailles sur l'amélioration des performances agronomiques du cotonnier *Gossypium hirsutum* L. Mémoire de master d'agronomie (Option Sciences et Techniques de Production Végétale), Département de Production Végétale, Université de Parakou, Bénin, 57 p.
- Assemien E. F. L. (2018). Impact de pratiques agricoles conventionnelles et innovantes sur la fertilité des sols et les acteurs microbiens impliqués dans la zone de savanes humides de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Lyon (France) et Université Nangui Abrogoua Abidjan (Côte d'Ivoire), 248 p.
- Assogba S. C. G. (2014). Représentations de l'environnement et adoption des pratiques durables de production par les cotonculteurs du Bénin. Thèse de Doctorat, Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique, Université de Liege (Belgique), 222 p.
- Aubert G. (1965). Classification des sols : Tableaux des classes, sous classes, groupes et sousgroupes des sols utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM. *Cahiers ORSTOM, Série pédologie*, 3(3) : 269-288.
- Aubreville A. (1949). Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Société d'édition de géographie maritime et coloniale*, 1 : 345-351.

- Aude L. (2013). Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effet des facteurs pédoclimatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols. Thèse de Doctorat, École Doctorale Environnements - Santé, Université de Bourgogne (Bourgogne, France), 187 p.
- Avenard J.M. (1971). Aspect de la géomorphologie. Centre ORSTOM Adiopodoumé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 64 p.
- Azzi V. (2016). Les apports des métaux traces par les fertilisants chimiques phosphatés dans les sols Libanais : Investigation sur leur devenir et leur transfert. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III (France), 265 p.
- Bachelier B. (1999). La graine de cotonnier : une source potentielle de nouveaux produits alimentaires ou industriels. *Agriculture et Développement*, 22 : 107-112.
- Badiane D., Gueye M. T., Coly E. V. & Faye O. (2015). Gestion intégrée des principaux ravageurs du cotonnier au Sénégal et en Afrique occidentale. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5) : 2654-2667.
- Badji A. S. M. (2020). Impact de la fertilisation chimique et biologique sur la productivité et la santé des plantes Mémoire de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences Agronomiques, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A (Algérie), 54 p.
- Bado B. V. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval Québec, 197 p.
- Baize D. & Girard M. C. (2008). Référentiel pédologique. Editions Quae, Paris (France), 200 p.
- Baize D. (1988). Guide des analyses courantes en pédologie. Editions INRA, Paris (France), 172 p.
- Baize D. (2000). Guide des analyses en pédologie. 2ème Edition INRA revue et augmenté, Paris (France), 100 p.
- Baize D. (2016). Petit lexique de pédologie. Éditions Quæ, Versailles Cedex (France), 28 p.

- Balbino L. C., Brossard M., Leprun J. C. & Bruand A. (2002). Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques : une étude bibliographique. *Etude et Gestion des sols*, 9(2) : 84-104.
- Barthès B., Kouakoua E., Sala G. H., Hartmann C. & Nyeté B. (1996). Effet à court terme de la mise en culture sur le statu organique et l'agrégation d'un sol ferrallitique argileux du congo. *Canadian Journal of Soil Science*, 76 : 493-499.
- Bassala J. P. O., M'Biandoun M., Ekorong J. A. & Asfom P. (2008). Evolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier-céréales au Nord Cameroun : diagnostic et perspectives. *Sommaire/inhoud/sumario*, 26(4) : 240-245.
- Bationo A., Kaola S. & Ayuk E. (1998). Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones*, 7(5) : 365-371.
- Bayala J., Ky-Dembele C., Tigabu M., Ouédraogo S. J. & Odén P. C. (2007). The relative importance of different regeneration mechanisms in a selectively cut savanna-woodland in Burkina Faso, West Africa. *Forest Ecology and Management*, 243(1) : 28-38.
- Beerah N. (2019). Le suivi du taux de matière organique, d'acides humiques et d'acides fulviques en cours du processus de co-compostage des boues résiduaire urbaines. Mémoire de Master en sciences agronomique, Université Mouloud Mammeri (Algérie), 55 p.
- Bel J. (2021). Biodisponibilité du calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers – Quantification, traçage et caractérisation des sources biodisponibles par dilution isotopique stable (^{44}Ca , ^{26}Mg et ^{41}K). Thèse de Doctorat, Université de Lorraine (France), 272 p.
- Bellaloui N., Smith J. R., Gillen A. M. & Mengistu A. (2021). Pod and branch number, and yield components relationships in soybean: Implications for nutrient management. *Journal of Plant Nutrition*, 44(2) : 221-236.
- Ben Haddadi S. (2021). Contribution à l'analyse de l'utilisation des engrais minéraux dans le secteur agricole de la wilaya de Tizi-Ouzou durant les campagnes de 2015 à 2020. Mémoire de Master, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri (Algérie), 84 p.

- Benahmed M. (2017). Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol : Cas de la fonderie de Tiaret (ALFET). Thèse de Doctorat, Sciences du sol, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes (Algérie), 174 p.
- Bencheikh D. M. A. (2021). Etude comparative de la litière forestière dans la région de Mahouna (Guelma) et dans la forêt du Lac Tonga (El-Kala) : Cas du chêne zeen et de chêne liège Mémoire de MASTER. Microbiologie appliquée. Université de 08 Mai 1945 Guelma (Algérie), 65 p.
- Benedict C. R. (1984). Cotton physiology. *Cotton, agronomy monograph*, 24 : 6-24.
- Benjamin T. (2023). Etude de l'hydrologie des sols argilo-calcaires pour la spatialisation de l'engorgement, des fentes de retrait et des flux d'azote dans l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 312 p.
- Benoit G. (2020). L'agriculture, la terre, l'eau et le climat. *Futuribles*, 438(5) : 5-27.
- Berti F., Hofs J. L., Zagbaï H. S. & Lebailly P. (2006). Le coton dans le monde, place du coton africain et principaux enjeux. *Biotechnology Agronomy Society and Environment*, 10(4) : 271-280.
- Bérubé-Girouard V., Bonneville G., Olivier A. & Richard C. (2024). Bilan et analyse des interventions et expérimentations agroforestières au regard de leur potentiel à contribuer à l'adaptation aux changements climatiques au Sénégal: Rapport produit dans le cadre du projet Sécurité alimentaire: une agriculture adaptée (SAGA), Université Laval Québec Canada, 75 p.
- Bigot S., Brou Y., Oszwaid J. & Diedhiou A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16 : 5-13.
- Bikié H., Ndoye O. & Sunderlin W. D. (2000). Impact de la crise sur les systèmes agricoles et le changement du couvert forestier dans la zone forestière humide du Cameroun. *Center for International Forestry Research*, 21 p.
- Blanchard M. (2010). Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud, savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement, Université Paris-Est, Creteil Val de Marne (France), 301 p.

- Bliefert C. & Perraud R. (2001). Chimie de l'environnement Air-Eau-Sols, déchets. Edition Paris, Paris (France), 360 p.
- Boli Z. & Roose E. (2000). Rôle de la jachère de courte durée dans la restauration de la productivité des sols dégradés par la culture continue en savane soudanienne humide du Nord-Cameroun. Edition : Institut de la recherche agricole pour le développement (Irad), Yaoundé (Cameroun), 149-154.
- Boquet D. J. & Moser E. B. (2003). Boll retention and boll size among intrasymphodial fruiting sites in cotton. *Crop Science*, 43 :195-201.
- Boris M. D. K. (2017). Production et utilisation du biochar pour l'amendement des sols rouges lessivés tropicaux. Thèse de Doctorat, Sciences forestières, Université Laval, Canada, 118 p.
- Bouchy C. (1971). Contribution à l'étude des déficiences minérales en culture cotonnière en Côte d'Ivoire. *Coton et Fibres Tropicales*, 25(2) : 235-251.
- Boumzaout N. (2019). Amélioration d'un sol argileux par le laitier de haut fourneau activé par la poudre de dolomie. Mémoire de Master, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université 8 Mai 1945 Guelma (Algérie), 142 p.
- Bourrié G. (2018). Les sols au coeur de la zone critique 4 : Qualité de l'eau. *British Library Cataloguing*, 978(1) : 78405-4410.
- Boyer J. (1982). Facteurs de Fertilité et utilisation des sols. In : Les sols ferrallitiques. Tome X. Initiations - documentations techniques, *Mémoire ORSTOM*, 52, Paris (France) : 274-302.
- Boyer J. (1983). Conservation et amélioration de la fertilité. In *Bulletin technique d'information des ingénieurs des sciences agricoles* 379/381, 357-366.
- Brady N. C., Weil R. R. & Weil R. R. (2008). The nature and properties of soils. Upper Saddle River, NJ : *Prentice Hall*, 13 : 662-710.
- Bressoud F., Navarrete M. & Mazollier C. (2009). Le maraîchage et la production de légumes biologiques : ajuster la production et la commercialisation. Transitions vers l'agriculture biologique. Editions Quae, Paris (France), 101 p.
- Briones M. J. I. (2014). Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. *Frontiers in Environmental Science*, 2 : 1-22.

- Bronick C. J. & Lal R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124 : 3-22.
- Calvet R. (2003). Le sol : propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Editions France Agricole, Dunod (France), 456 p.
- Camara B. A. (2024). La pratique de la régénération naturelle assistée dans le Bassin arachidier du Sénégal : adoption, conséquences agroécologiques et stratégies d'optimisation face au changement climatique. Thèse de Doctorat, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), 124 p.
- Carmi A. & Shalhevet J. (1982). Root effects on cotton growth and yield. *Crop Science*, 43 : 875-878.
- Celik I., Ortas I. & Kilic S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil & Tillage Research*, 78 : 59-67.
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A. & Joseph S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*, 46 : 437-444.
- Cheng C. H., Lehmann J., Thies J. E., Burton S. D. & Engelhard M. H. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic geochemistry*, 37 : 1477-1488.
- Christine C., Alterre B., Hélène T. & Alterre B. (2012). Guide pédagogique (Les sols terreux fertiles) Volet 1-Apport de connaissances, 32 p.
- Cirad-gret. (2002). Memento de l'agronome, Ministère des affaires étrangères, Editions Quae, France, 1691 p.
- Claire G. (2008). Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Thèse de doctorat, Université d'Angers, France, 237 p.
- Claude M. M. L. (2017). Effet fertilisant de la poudre de phonolites sur la croissance et le développement de (*Vigna subterranea* L.) cultivé en pot, dans la ville de Ngaoundéré-Cameroun. Mémoire de Master, Faculté des Sciences, Université de Ngaoundere (Cameroun), 74 p.
- CNTIG. (2024). Carte administrative, Département de Ouangolodougou. <https://cartotheque-cntig.com>. Consulté le 3 juin 2024 à 11 h 12 min.
- Concaret J. (1981). Drainage agricole : Théorie et pratique. Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, Dijon (France), 509 p.

- Cortet J. (2010). Biodiversité des microarthropodes du sol Biodiversité des microarthropodes du sol en agroécosystèmes en agroécosystèmes. Thèse de Doctorat, Université Paris VI (Paris), 142 p.
- Cosentino D., Chenu C. & Le Bissonnais Y. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (8) : 2053-2062.
- Coulibaly K., Vall E., Autfray P. & Sedogo P. M. (2012). Performance technico-économique des associations maïs/niébé et maïs/mucuna en situation réelle de culture au Burkina Faso : potentiels et contraintes. *Tropicultura*, 30(3) : 147-154.
- Coulibaly L., Kouassi K. H., Emile S. G. E. & Savane I. (2016). Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection : Cas du département de Ferkessédougou. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17(1) : 136-143.
- Crétenet M. & Gourlot J. P. (2016). Le cotonnier. Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 216 p.
- Crusciol C. A. C., Artigiani A. C. C. A., Arf O., Carmeis F. A. C. A., Soratto R. P., Nascente A. S. & Alvarez R. C. F. (2016). Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phospho-gypsum in a tropical no-till system. *Catena*, 137 : 87-99.
- CSAO-SWAC, FAO, CILSS & CEDEAO-ECOWAS (2008). Le Climat et les Changement Climatiques. Atlas de l'intégration Régionale en Afrique de l'Ouest. Série environnement. www.fao.org/nr/clim/docs/clim-080502-fr.pdf d'agroforesterie dans la région du Centre Ouest. UICN, Ouagadougou, 44 p.
- Dabin B & Maigien R. (1979). Les principaux sols d'Afrique de l'Ouest et leurs potentialités agrocoles. *Cahier ORSTM Série Pédologie*, 17(4) : 235-237.
- Dabin B. (1970). Les facteurs chimiques de la fertilité des sols (bases échangeables ; sels ; Utilisation des échelles de fertilité) chapitre XI. ORSTOM France, 221-237.
- Dabin B. (1985). Les sols tropicaux acides. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 21 (1) : 7-19.
- Mazzucato V. & Niemeijer D. (2000). The Cultural Economy of Soil and Water Conservation: Market Principles and Social Networks in Eastern Burkina Faso. *Development and change*, 31 (4) : 831-855.

- Dabin B., Leneuf N. & Riou G. (1960). Carte pédologique de la Côte d'Ivoire à 1/2.000.000. Pédologie de l'ORSTOM, Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), 39 p.
- Dakouo D. (1994). Les carences en potassium sur cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) dans les systèmes de culture : cas de la zone cotonnière ouest du Burkina. Thèse de Doctorat, option sciences agronomiques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, Abidjan, 141 p.
- Dakouo D. (1998). Dégradation de la fertilité dans la zone cotonnière d'Afrique au sud du Sahara. In, l'utilisation des intrants en culture cotonnière et maraîchère. *Colloque organisé par le Conseil Ouest et Centre Africain pour la Recherche et le Développement Agricoles (CORAF)*, 25-28 janvier 1998, Dakar, Sénégal, pp 343-349.
- Dalmas D., Moreau R., Quévremont P. & Frey V. (2010). Élaboration d'un plan de lutte contre les algues vertes. Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche (France), 154 p.
- Davidonis G. H., Johnson A. S., Landivar J. A. & Fernandez C. J. (2004). Cotton fiber quality is related to boll location and planting date. *Agronomy Journal*, 96 : 42-47.
- De Rouw A. & Jean-Louis Rajot J- L. (2004). Nutrient availability and pearl millet production in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104 : 249-262.
- Delaunois A. (2013). Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols. Document technique, Chambre d'agriculture du Tarn et INRA de Montpellier, France, 39 p.
- Delaunois A., Ferrie Y., Bouche M., Colin C. & Rionde C. (2013). Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols. Chambre d'agriculture du Tarn et INRA de Montpellier (France), 37 p.
- Demol J., Mergeai G., Hofs J. L. & N'dungu V. (1992). L'amélioration du cotonnier. In *Le cotonnier au Zaïre*, 29 : 93-123.
- Denis E. (2024). Étude des effets de trois amendements organiques innovants sur la production de légumes ainsi que sur la fertilité du sol au sein des parcelles de SPIN farming des jardins TERRA-Terre de la plateforme WASABI (Gembloux Agro-Bio Tech). Mémoire de Master Bioingénieur en Sciences Agronomiques, Université de Liège (Belgique), 108 p.
- Diack M. & Loum M. (2014). Caractérisation par approche géostatistique de la variabilité des propriétés du sol de la ferme agropastorale de l'Université Gaston Berger (UGB) de

- Saint Louis, dans le bas delta du fleuve Sénégal. *Revue de géographie du laboratoire Leïdi*, 12 : 1-25.
- Diacono M. & Montemurro F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review *Agronomy for Sustainable Development*, 30 : 401-422.
- Diallo B. A. (2019). Fractions chimiques du plomb dans le sol et phyto-extraction du plomb par le saule (*Salix miyabeana*) cultivé dans un sol calcaire riche en éléments traces métalliques traité avec des amendements acides. Thèse de Doctorat en sols et environnement, Université Laval, Québec (Canada), 175 p.
- Diallo D. (1995). Érosion des sols en zone soudanienne du Mali : Transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger). Mémoire de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I (France), 212 p.
- Diarra B. (2021). Modeling of soil erosion by water in the provinces of Sikasso and Koulikoro (Republic of Mali). *Антропогенная трансформация природной среды*, (2) : 36-48.
- Djouider S. I. (2023). Interaction des légumineuses avec des microorganismes du sol sous contraintes abiotiques. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT (France), 171 p.
- Doffou N.M. (2013). Impact de la gestion de la résistance aux pyréthriinoïdes sur les populations de *Cryptophlebia leucotreta* (Meyrick, 1913) (Lepidoptera : Tortricidae) et de *Pectinophora gossypiella* Saunders, 1843 (Lepidoptera : Gelechiidae) en culture cotonnière en Côte d'Ivoire : de la sensibilité au mécanisme de résistance. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan (Côte d'Ivoire), 175 p.
- Doran J. W. & Parkin T. B. (1994). Defining and assessing soil quality, in: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication Number 35, Madison, WI, USA : 3-21.
- Duchaufour P. (1977). Pédogénèse et Classification. Tome I. Masson Paris (France), 496 p.
- Duchaufour P. (1991). Pédologie : sols, végétation, environnement (2e éd.). Paris, Masson, 178 p.
- Duchaufour P. (2004). Introduction à la science du sol-6ème. Edition de l'abrégé de pédologie Dunod, 42(63) : 69-109.

- Dugue P. & Rawski C. (2024). Gestion de la fertilité des sols en Afrique subsaharienne. Recueil d'articles publiés de 1998 à 2024. *Agricultural*, 33(6) : 1166-7699.
- Dugué P. (2009). Étude d'évaluation environnementale et du développement de systèmes de production durables dans le cadre des projets de soutien à la production vivrière au Mali et au Burkina Faso. FARM, CIRAD, Paris, (France), 98 p.
- Dutoroir C. D. (2006). Impact de pratiques de gestion de la fertilité sur les rendements en mil dans le Fakara (Niger). Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du grade de Bio-ingénieur, Faculté d'ingénierie biologique, Agronomique et Environnementale, Université Catholique de Louvain (Belgique), 214 p.
- Edbo M.S. (2021). Effets des amendements organiques sur les traits fonctionnels de l'aubergine douce (*Solanum melongena* L.) Haute Casamance, Sénégal. Mémoire de Master, Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, 51 p.
- Edmond A. A. (2015). L'impact de la culture du coton sur le développement socio-économique : étude de cas de la région de Korhogo, au nord de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 11(31) : 253-271.
- Edwards L., Burney J.R., Richter G. & MacRae A.H. (2000). Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81 : 217-222.
- El Alami I. N. (2013). La faune du sol : reconnaissance et biologie des principaux groupes. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 3 : 60-65.
- Emmanuel N. K., Emmanuel K. K., Kouakou B. J., Gustave F. M., Kouamé B. & Dominique B. N. (2018). Diagnostic de l'Etat de Fertilité des Sols Sous Culture Cotonnière Dans les Principaux Bassins de Production de Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 14(33) : 1857-7881.
- ENDA, UNESCO, SEI & NCAP (2007). Climate Change Adaptation and Water Resources Management in West Africa. Synthesis Report Writeshop February 2007, 40 p
- Fageria N. K. & Baligar V. C. (2004). Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Communication in Soil Science and Plant Analyses*, 32 : 1303-1319.
- Fageria N. K., De Morais O. P. & Dos Santos A. B. (2010). Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. *Journal of plant nutrition*, 33(11) : 1696-1711.

- Fall M. & Jacquemot P. (2023). « L'autonomisation des femmes, une réponse à l'insécurité alimentaire en Afrique ? », *Afrique contemporaine*, n° 275, 2023/1, pp 9-39.
- FAO (1990). Graines oléagineuses non légumineuses. Utilisation des aliments tropicaux: graines oléagineuses tropicales, Rome, Italie : 55-57.
- FAO (2014a). Gestion intégrée de la production et des déprédateurs du coton/Guide du facilitateur pour les Champs écoles des producteurs, 79 p.
- FAO (2014b). Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires. Comité du codex sur les fruits et légumes frais. Dix-huitième session Phuket, Thaïlande, 91 p.
- FAO (2014c). Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'ouest. Rapport du bureau régional pour l'Afrique de la FAO, Accra, Ghana 73 p.
- Fardeau J-C. (2015). Des indicateurs de la fertilité des sols. *Etudes et gestion des sols*, 22 : 77-100.
- Fatondji D., Martius C., Zougmore R., Vlek P.L.G., Biielders C.L. & Koala S. (2009). Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85 : 225-239.
- Faye D. (2019). Problématique de la baisse de production de coton graine de 2013 à 2017 dans la région de Kolda : du centre agricole de Dabo. Mémoire de Master : espaces, sociétés et développement, UFR des Sciences et Technologies département de Géographie, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), 110 p.
- Feller C. (1995). La matière organique du sol : un indicateur de fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienne. *Agriculture et Développement*, 8 : 35-41.
- Ferd K. (2022). Contribution à l'étude de la relation entre l'utilisation excessive des engrais agricoles et le phénomène d'eutrophisation. Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Larbi Tébessi -Tébessa, (Algérie), 81 p.
- Fok M. (2007). Analyse multifactorielle de la baisse du rendement coton en zone CMDT : de la physiologie à l'idéologie CIRAD, 160 p.
- Fok M. A. C. & Barbier B. (2001). Coton portée et limites du marché mondial pour les sous-produits du coton en Afrique francophone. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 8(3) : 239-253.

- Fondrillon M. (2009). À propos des recherches sur les terres noires urbaines : dépasser le concept d'attente. *Archéologie Médiévale*, 39 : 1-16.
- Francou C. (2003). Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage-Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris), 289 p.
- Gaborel C. (2006). La fertilisation du cotonnier en Afrique. IFDC/CIRAD, Bamako (Mali), 2 p.
- Gayan A., Nath D. J., Bhattacharyya B. & Dutta N. (2020). Assessment of soil quality indicators under rice ecosystem of Assam. India. *Journal Environmental Biology*, 41 : 1655-1664.
- Gbenahou H. B. M. (2017). La Participation et L'appropriation à L'épreuve des Pouvoirs Dans les Projets Ruraux à Coby (Atacora-bénin). Une Approche Socio-Historique. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Sociale, Université de Liège (Belgique), 335 p.
- Gérardeaux E. (2009). Ajustement de la phénologie, de la croissance et de la production de biomasse du cotonnier (*Gossypium hirsutum L.*) face à des carences en potassium. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale des Sciences et Environnements, Université de Bordeaux I, 122 p.
- Gobat J-M., Aragno M. & Matthey W. (2010). Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols. 3ème Edition, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, 817 p.
- Godard O. & Hubert B. (2002). Le développement durable et la recherche scientifique à l'INRA. Rapport intermédiaire de mission. Paris (France): INRA éditions, 45 p.
- Grandjean C. & De Cannière F. (2015). Techniques agricoles et financières pour atteindre durablement le droit à l'alimentation au Benin. Louvain School of Management, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, 172p.
- Guessoum S. (2018). Diagnostic du comportement de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum* desf.) en relation avec l'état hydrique du sol en agriculture de conservation en zone semi-aride. Mémoire de Master, Faculte des Sciences de la Nature et de la Vie. Université Ferhat Abbas Setif (Algérie), 172 p.

- Guibert H., Fallavier P. & Romero J. J. (1999). Carbon content in soil particle size and consequence on cation exchange capacity of Alfisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(1718) : 2521-2537.
- Hau B. (1988). Histoire de la sélection en Côte d'Ivoire. *Coton Fibres Tropicales*, 43(3) : 177-204.
- Hearn A. B. & Constable G. (1984). Cotton. In « The physiology of tropical food crops ». P. R. Goldsworthy and N. M. E. Fisher. Bath, *Avo, John Wiley and Sons* : 495-527.
- Helvetas (2008). Guide de production du coton biologique et équitable. Manuel de référence pour l'Afrique de l'Ouest, 49 p.
- Hien M. A. (2016). Evaluation de l'efficacité de nouvelles formules d'engrais minéraux sur la nutrition minérale et le rendement du cotonnier sur des sols ferrallitique, ferrugineux et brun eutrophe. Mémoire de fin de cycle en Agronomie, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), 56 p.
- Hinimbio T. P. (2019). Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G. & E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun. Thèse de Doctorat, Unité de Formation Doctorale en Sciences de l'Ingénieur, Université de Maroua (Cameroun), 239 p.
- Huang B. (2018). Réponses physiologiques et biochimiques à une limitation nutritive en phosphore ou en azote sur la réorientation métabolique des lipides polaires chez différentes espèces de microalgues marines. Thèse de Doctorat, Le Mans Université (France), 274 p.
- Huber G. & Schaub C. (2011). La fertilité des sols : L'importance de la matière organique. In Chambre d'agriculture du Bas-Rhin (pp. 46).
- Hussein K., Perret C., Hitimana L. (2005). Importance économique et sociale du coton en Afrique de l'Ouest : Rôle du coton dans le développement, le commerce et les moyens d'existence. Rapport au Secrétariat du Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest / OCDE, 72 p.
- Intercoton (2022). Association Interprofessionnelle de la filière coton. Statistiques de la production : <https://www.intercoton.ci/la-filiere-cotonniere-ivoirienne/> consulté le 26 Mai 2024 à 03 h 39 min.
- ISO (2015). Norme NF ISO 11074, qualité du sol, 120 p.

- IUCN. (2004). Reducing West Africa's Vulnerability to Climate Impacts on Water Resources, Wetlands and Desertification: Elements for a Regional Strategy for Preparedness and Adaptation. Niassé M., Afouda A., Amani A., IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 77 p.
- Jacques F. (2021). Evaluation de la fertilité de différents types de buttes de style permacole. Master Bio-ingénieur en Sciences Agronomiques, UFR Agro-Bio Tech. Université de Liège-Gremloux (Liège, Bruxelles), 62 p.
- Jangorzo N. S. (2013). Quantification du processus d'agrégation dans les Technosols. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomique, Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement, Université de Lorraine (France), 203 p.
- Janssen B. H., Guiking F. C. T., Van der Eijk D., Smaling E. M. A., Wolf J. & Van Reuler H. (1990). A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46 : 299-318.
- Jones M. (2021). Potassium dynamics in soils: A review. *Plant and Soil*, 456(1) : 89-102.
- Joseph I. P. O. U. (2005). Biologie et écologie de *euphorbia heterophylla* L.(euphorbiaceae) en culture cotonnière, au nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université de Cocody (Côte d'Ivoire), 207 p.
- Jourda J. P., Djangoua E. V., Kouamé K. F., Saley M. B., Gronayes C., Achy J. J., Biémi J. & Razack M. (2006). Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Apport de l'imagerie ETM+ de Landsat. *Revue Télédétection*, 6(2) : 123-142.
- Jourdain A. (2023). Etude des propriétés physico-chimiques des Hydroxydes Doubles Lamellaires pour le relargage contrôlé de phosphate comme fertilisant. Thèse de Doctorat, Unité de Formation et de Recherche de Chimie, Université Clermont Auvergne, 225 p.
- Kangatlam A. (2025). Crédit agricole et le bien-être producteurs cotonniers dans le grand Nord Cameroun. *International Journal of Research in Economics and Finance*, 2(4) : 46-77.

- Kassin K. E. (2009). Etude des conditions pédoclimatiques pour la replantation cacaoyère dans le centre ouest de la côte d’ivoire : cas des départements de Divo et de Gagnoa. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan (Côte d’Ivoire), 167 p.
- Kervazo B. & Texier J. P. (2011). Le site paléolithique de la grotte XVI (Dordogne, France) : lithostratigraphie, processus de formation et essai de chronologie. *PALEO. Revue d'archéologie préhistorique*, 21 : 163-188.
- Kessab A. (2025). Evaluation de la Contribution des carbonates dans la rétention des polluants métalliques dans les sols. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra (Algerie), 151 p.
- Kibblewhite M. G., Ritz K. & Swift M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 363 : 685-701.
- Kintche K. (2011). Analyse et modélisation de l'évolution des indicateurs de la fertilité des sols cultivés en zone cotonnière du Togo. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne (France), 215 p.
- Koffi A. (2023). Caractérisation agro-pédologique et cartographie de l’aptitude culturale des sols de nouvelles zones de production hévéicole en Côte d’Ivoire : cas des départements de Man, Toumodi et Prikro. Thèse de doctorat, UFR Agroforestérie, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d’Ivoire), 169 p.
- Koffi S.Y. (2013). Libéralisation de la filière coton en Côte d’Ivoire quinze ans après : empreinte spatiale et organisationnelle. *Cinq Continents*, 3(7) : 5-17.
- Kohei Y., Hiroki H. & Mizuhiko N. (2014). Estimation of microbial biomass potassium in paddy field soil. *Soil Science Plant Nutrition*, 60 : 512-519.
- Koné T. (2021). Variabilité climatique et stratégies d’adaptation des paysans dans le département de Ouangolodougou, Nord de la Côte d’Ivoire. Mémoire de Master en Biodiversité et Gestion Durable des Ecosystèmes. Université Jean Lorougnon Guede Daloa (Côte d’Ivoire), 69 P.
- Kouffi S. (2024). Valorisation des sous-produits agricoles (Grignon d’olive et marc de café) sur le développement de la variété de tomate fixe (Marmande), Mémoire de fin d’études, Option : Productions Végétales, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences agronomiques, Université Mouloud Mammeri (Algérie), 109 p.

- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D. & Zombré P. N. (2009). Effets des amendements locaux sur les rendements, les indices de nutrition et les bilans culturaux dans un système de rotation coton-maïs dans l'ouest du Burkina Faso. *Biotechnology Agronomy, Society and Environment*, 13(1) : 103-111.
- Kumar R., Singh P. & Gupta D. (2023). Effects of calcium-magnesium ratios on soil properties and plant growth. *Agricultural Sciences*, 10(4) : 245-256.
- La Salle J. (2004). Biology of gall inducers and evolution of gall induction in Chalcidoidea (Hymenoptera: Eulophidae, Eurytomidae, Pteromalidae, Tanaostigmatidae, Torymidae), in: Raman A., Schaeffer C. W. & Withers T. M. (eds). *Biology, ecology, and evolution of gall-inducing arthropods*, 1(2) : 507-537.
- Lançon F. (1995). Le marché du soja : tendance et perspectives. *Oléagineux Corps gras lipides*, 2(2) : 86-88.
- Landon J. R. (1991). Booker Tropical Soil Manual, A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics, paperback, longman, Booker Tate limited, Oxon, Royaume Uni, 474 p.
- Lare Y. (2008). Lutte antiérosive et contraintes socio-économiques dans la région des savanes du Nord-Togo. *Sécheresse*, 19 (2) : 103-114.
- Larson W. E. & Pierce F. J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality, in: Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991, Bangkok, Thailand: *International Board for Soil Research and Management*, 175-203.
- Le Loeuff P. (1994). Environnement et ressources aquatiques de Côte-d'Ivoire. Edition de l'ORSTOM, 2 : 7099-11345.
- Legout A., Hansson K. & Van D. H. G. (2020). Chemical fertility of forest ecosystems. Part 2: Towards redefining the concept by untangling the role of the different components of biogeochemical cycling. *Forest Ecology and Management*, 461 : 117-844.
- Legros J. P. (2009). La salinisation des terres dans le monde. *In Proc. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier Conférence*, 40(69) : 257-269.
- Lehmann J. & Kleber M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528 : 60-68.

- Lévêque C. (1972). Les mollusques benthiques du Lac Tchad : écologie, étude des peuplements et estimation des biomasses. *Cahier ORSTOM*, série Hydrobiologie, 6(1) : 3-45.
- Lorenz N., Verdell K., Ramsier C. & Dick R. (2010). A Rapid Assay to Estimate Soil Microbial Biomass Potassium in Agricultural Soils Biology & Biochemistry. *Soil Science Society of America Journal*, 74 : 512-516.
- Maalej M. H. (2013). Article de synthèse. Apports des biotechnologies dans les domaines de la phytoprotection et l'amélioration de la tolérance des plantes aux stress abiotiques. *Annales de l'INRATT* : 86-230.
- Maha C. (2010). Effet de l'apport de composts sur la dynamique hydrique du sol, la disponibilité de l'azote pour la plante et le lessivage du nitrate : cas d'un sol limoneux cultivé du bassin parisien. Thèse de Doctorat, Faculté des Science de la Terre, Université de Paris-sud 11(France), 258 p.
- Malavolta E., Vitti G. C. & Oliveira S. A. (1997). L'état nutritionnel des plantes : principes et applications. *American Journal of Plant Sciences*, 8(10) : 2158-2742.
- Maliki R. (2013). Gestion de la fertilité des sols pour une meilleure productivité dans les systèmes de culture à base d'igname au Bénin. Thèse de Doctorat unique ès-Sciences agronomiques, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, (Bénin), 266 p.
- Mariame H. (2019). Etude de l'effet d'une déficience de la nutrition minérale en soufre sur la physiologie et la qualité phytochimique des plantes aromatiques et médicinales, cas de *Trigonella foenum-graecum*, *Foeniculum vulgare* et *Eruca sativa*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah (Maroc), 147p.
- Maron M. S., Maron B. J., Harrigan C., Buros J., Gibson C. M., Olivotto I. & Appelbaum E. (2009). Hypertrophic cardiomyopathy phenotype revisited after 50 years with cardiovascular magnetic resonance. *Journal of the American College of Cardiology*, 54(3) : 220-228.
- Martin T. (2020). L'urine humaine en agriculture : des filières variées pour contribuer à une fertilisation azotée durable. Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay (France), 253 p.

- Masset X. (2008). De la fibre végétale à la fibre textile. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Université Montpellier I (France), 96 p.
- Mazour A. W. (2015). Analyse des facteurs de risque de l'érosion hydrique dans la région de Ain Temouchent. Mémoire de Master en Sciences de l'eau et l'environnement, Département de Génie de l'Eau et de l'Environnement, Centre Universitaire de Ain Témouchent, Institut des Sciences et de la Technologie (Algérie), 97 p.
- Mazzucato V. & Niemeijer D. (2000). Rethinking soil and water conservation in a changing society : A case study in eastern Burkina Faso. *Tropical Resource Management Papers*, 32 : 0926-9495.
- Meena V. S., Maurya B. R. & Verma J. P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? *Microbiology Ressource*, 169 : 337-347.
- Mengel K. & Kirbky E. A. (1978). Principles of plant nutrition. *Springer Science & Business Media*, (4) : 453- 465.
- Merabti H. F. F. (2015). Caractéristiques physico-chimiques des différents laits et technologie laitière. Mémoire de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers, Université 8 Mai 1945 Guelma (Algérie), 163 p.
- Mihoub A. (2017). Etude de la dynamique du phosphore dans les sols calcaires sahariens cultivés en blé : cas de Oued Righ. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences Agronomiques, Université Kasdi Merbah Ouargla, (Algérie), 185 p.
- Mikutta R., Kleber M., Torn M. S. & Jahn R. (2006). Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance. *Biogeochemistry*, 77 : 25-56.
- Milkha S. A. & Sukhdev S. M. (2004). Fertilizer nitrogen use efficiency as influenced by interactions with other nutrients, in: Mosier, A. R., Syers, J. K., Freney (Eds.), *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment*. Istand Press, Scope, 65 : 181-191.
- Millogo D. (2002). Diagnostic des modes de gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de culture motorisés en zone cotonnière Ouest du Burkina Faso. Mémoire d'Ingénieur du développement rurale. Université Polytechnique de Bobo Dioulasso (Burkina Faso), 94 p.

- Mitscherlich E. A. (1909). Ertragsgesetze. Walter de Gruyter GmbH & Co KG. Akademie-Verlag, Berlin, 77 p.
- Mjejra M. (2015). Etude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences humaines et sociales, Université des Lettres, Arts et Sciences Sociales-Tunis I (Tunisie), 310 p.
- Mohamed N. (2014). Contribution à l'étude de la capacité de quelques plantes et bactéries à la remédiation des sols contaminés par les métaux lourds du site d'ait ammar. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Beni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane (Maroc), 161 p.
- Mosier A. R., Syers J. K., Freney J. R. (2004). Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production, In: Mosier A. R., Syers J. K., Freney (Eds.), Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment. Istand Press, Scope 65, 3-15.
- Mosier A., Wassmann R., Verchot L., King J. & Palm C. (2004). Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. *Environment, Development and Sustainability*, 6(1) : 11-49.
- Mouas B. (2014). Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de *olea europea*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques et des Sciences Biologiques, Département des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (Algérie), 220 p.
- Mulaji C. (2011). Utilisation des composts de bios déchets ménagers pour l'amélioration de la fertilité des sols acides de la province de Kinshasa RDC. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 219 p.
- Ndiaye M. (2020). Dynamiques des territoires ruraux au Sénégal : Culture de l'espèce *Anacardium occidentale Linnaeus* (anacardier) et stratégies de lutte contre la pauvreté dans les Départements de Foundiougne (Commune de Diosong) et Ziguinchorr. Thèse de Doctorat, Université Gaston Berger Saint-Louis Sénégal, 334 p.
- Neufeldt H., Ayarza M. A., Resck D. V. S. & Zech W. (1999). Distribution of water-stable aggregates and aggregating in Cerrado Oxisols. *Geoderma*, 93 : 85-99.

- Nyembo K. L., Useni S.Y., Mpundu M. M., Bugeme M. D., Kasongo L. E. & Baboy L. L. (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. *Journal of Applied Biosciences*, 59 : 4286-4296.
- Nyembo K.L. (2010). Augmentation du rendement du maïs par l'exploitation de l'effet hétérosis des hybrides produits au Katanga. Thèse de doctorat, Université de Lubumbashi, République Démocratique du Congo, 157 p.
- Ochou O. G. ; N'guessan E. & Yao Y. S. (2015). Guide du conseiller agricole coton. 45 p.
- Ochou O. G., Martin T. & Chandre F. (2001). Rapport d'activité 2000, CNRA. Programme coton, Entomologie (Côte d'Ivoire), 255 p.
- Olsen S. R. & Sommers L. E. (1982). Phosphorus. In: Methods of soil analysis. Ed Page adison. Wisc. *American Society of Agronomy, and Soil Science Society of America* : 403-430.
- ONU (2024). Les Nations unies publient de nouvelles projections de population mondiale. <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/memos-demo/focus/2024-les-nations-unies-publent-de-nouvelles-projections-de-population-mondiale/> consulté le 21 Mai 2024 à 03h 40 min.
- Oorts K., Vanluwe B. & Merckx R. (2003). Cation exchange capacity of organic matter fractions in a ferric lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 100(2-3) : 61-68.
- Ouali K. (2016). Teneurs en éléments traces métalliques des sols agricoles de la wilaya de Tizi-Ouzou. Mémoire de fin de Cycle, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques Département des Sciences Agronomiques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (Algérie), 116 p.
- Ouattara N. P-K. & Kouakou K. O. (2021). La culture du maïs face au binôme coton-anacarde dans le nord ivoirien : Une cohabitation dominée par les cultures de rente dans la Sous-Préfecture de Napié. *International Journal of Social Sciences and Humanities Invention*, (10) : 6693-6704.
- Ouedraogo O. (2023). Ville, agricultures et santé dans le Grand Ouaga : un triptyque aux multiples influences. Thèse de Doctorat, Nantes Université ; Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou Burkina Faso, 440 p.

- Oursin M. (2021). Développement d'une approche expérimentale pour mieux comprendre l'évolution de la fertilité des sols en zone de moyenne montagne. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale des Sciences de la Terre et Environnement (ED 413), Université de Strasbourg (France), 400 p.
- Pansu M. & Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. Edition Springer, Paris (France), 1012 p.
- Pardo A., Amato M. & Chiarandà F.Q. (2000). Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. *European Journal of Agronomy*, 13: 39-45.
- Parry G. (1982). Le cotonnier et ses produits techniques agricoles et productions tropicales. Maisonneuve et Larose, Paris (France), 502 p.
- Pernes-Debuyser A. & Tessier D. (2002). Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols. Cas des 42 parcelles de l'INRA à Versailles (France), 177 p.
- Perraud A. (1971). Les sols. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoire ORSTOM*, 50 : 157-263.
- Perraud R. (1971). Les sols ferrallitiques et leurs caractéristiques pédologiques. *Bulletin de la Société Française de Pédologie*, 9 : 55-64.
- Pieri C. (1989). Fertilités des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du sahara. Ministère de Coopération et du développement CIRAD, 444 p.
- Pierre S. (2020). 2PAI-Nord CI EIES. Rapport sur l'aménagement hydro-agricole – t10 (Ferké, Bamory-vogo). Ferkessedougou (Côte d'Ivoire), 372 p.
- Pirlot C. (2019). Effet de la dissolution des oxydes de fer induite par les sidérophores sur la solubilisation du phosphore dans les sols. Master Bioingénieur en Sciences et Technologies de l'Environnement, Liège Université Gembloux (France), 98 p.
- Piutti S., Romillac N., Chanseaume A., Slezack-Deschaumes S., Manneville V. & Amiaud B. (2015). Enjeux et contributions des prairies temporaires pour améliorer la fertilité des sols. *Fourrages*, 223 : 179-187.
- Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L. & Hinsinger P. (2015). Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des

- plantes et les mécanismes biologiques du sol. *Innovations Agronomiques*, 43 : 115-138.
- Pouya B.M., Bonzi M., Gnankambary Z., Traoré K., Ouédraogo J. S., Somé A. N. & Sedogo M. P. (2013). Pratiques actuelles de gestion de la fertilité des sols et leurs effets sur la production du cotonnier et sur le sol dans les exploitations cotonnières du centre et de l'ouest du Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 22(4) : 282-292.
- Radcliffe D. E. & Šimunek J. (2010). Soil physics with HYDRUS : modeling and applications, 1 ère Editions, *CRC Press Boca Raton*, Floride (USA), 300 p.
- Recous S., Chabbi A., Vertès F., Thiebeau P. & Chenu C. (2015). Fertilité des sols et minéralisation de l'azote : sous l'influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués ? *Fourrages*, 223 : 189-196.
- Renaudin C. (2011). Le paysannat cotonnier africain dans la mondialisation : impacts sociaux économiques et géographiques. Le cas de la région Est du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sorbonne (France), 384 p.
- Renou A. (2007). Synthèse des études conduites au Mali à propos de l'écimage des cotonniers en cours de campagne. Rapport de synthèse, CIRAD UPR 102, 23 p.
- Reynolds W. D., Drury C. F., Yang X. M. & Tan C. S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146 : 466-474.
- Ribeiro M. A., Da-Silva Q. J. O., Aitken W. M., Machado R. C. R. & Baligar V. C. (2008). Nitrogen Use Efficiency in Cacao Genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 31 : 239-249.
- Risède J. M., Achard R., Banidol J. J., Birba O., Coranson-Beaudu R., Coulis M. & Thibaut C. (2020). Rapport final d'exécution du projet AgroBioDev: "Agroécologie et biodiversité locale au service du développement agricole en Martinique". Programmes opérationnels 2014-2020. Campus AgroEnvironnemental Caraïbe, 148 p.
- Ritchie G.L., Bednarz C.W., Jost P. H. & Brown S.M. (2007). Cotton growth and development. Bulletin, The University of Georgia, USA, 16 p.
- Roger-Estrade J., Boizard H., Richard G., Defossez P. & Boiffin J. (2004). Étude de l'effet à moyen et long termes des systèmes de culture sur la structure d'un sol limono-argileux du nord du bassin parisien : les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrémons (80). *Etude et Gestion des Sols*, 11 : 11-20.

- Roose E. & Barthès B. (2001). Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa: a contribution from Francophone research. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61 : 159-170.
- Roose E. (1977). Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, Paris (France), 8 p.
- Roose E. (1981). Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Cahier ORSTOM Paris (France), 253 p.
- Roose E., Blancaneaux P. & Freitas P.L. (1993). Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, 28 (2) : 413-419.
- Roufaï M. C. 2005. L'évaluation environnementale face aux enjeux d'un développement agricole durable en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat, UFR de Géographie et Aménagement, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 313 p.
- Roupsard M. (2000). Production rizicole. Atlas de l'Extrême Nord du Cameroun, IRD Paris (France), 94-97.
- Roussel O., Bourmeau E. & Walter, C. H. (2001). Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et Gestion des sols*, 8 : 65-81.
- Saadaoui M. (2023). Mécanismes et applications du potentiel biomodulateur du microbiote associé au blé «Florence aurore» dans la promotion de la croissance et la résistance à *Fusarium culmorum*. Thèse de Doctorat, Université Clermont Auvergne (France), 225 p.
- Sahnoune R. (2014). Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia). Master en Valorisation des Ressources minérales, Faculté de technologie, Département des Mines et Géologie, Université Abderahmane Mira Bejaia (Bejaia, Algérie), 86 p.
- Saïdou A., Kossou D., Brussaard L., Richards P. & Kuyper T. W. (2008). Activités des vers de terre dans les champs de manioc et de melon egusi dans la zone de transition du Bénin : relier les perceptions des agriculteurs aux études sur le terrain. *NJAS Wageningen Journal of life Sciences*, 56 (1/2) : 123-135.

- Salembier C. (2019). Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteurs. Thèse de Doctorat, Sciences Agronomiques, Université Paris Saclay (France), 270 p.
- Sall M. (2015). Les exploitations agricoles familiales face aux risques agricoles et climatiques : stratégies développées et assurances agricole. Thèse de Doctorat, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II (France), 279 p.
- Sanchez P. A. (2002). Fertilité des sols et faim en Afrique. *Journals Science*, 295 : 55-62.
- Sankara F. (2016). Effet des traitements insecticides sur les ennemis naturels des piqueurs-suceurs et sur la qualité du coton en culture du Cotonnier Génétiquement Modifié (CGM) au Burkina Faso. Mémoire de fin de cycle, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), 66 p.
- Sanogo S. (2017). Dimension sociale et économique de la culture du sésame (*Sesamum indicum* L.) dans la Kossi, au nord-ouest du Burkina Faso, Thèse de Doctorat, Université Ouaga I Pr Joseph Ki-Zerbo (Burkina Faso), 293 p.
- Sawadogo H., Bock L., Lacroix D. & Zombré N. P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zaï et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 12 (3) : 279-290.
- Scarf H. (1988). One hundred years of the Kjeldahl method for nitrogen determination. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 32 : 321-32.
- Scherer H. W., Goldbach H. E., Clemens J. (2003). Potassium dynamics in the soil and yield formation in a long-term field experiment. *Plant Soil and Environment*, 49(12) : 531-535.
- Schnitzer M. (1986). The synthesis, chemical structure, reactions and functions of humic substances. *Humic substances effect on soil and plants*, 3 : 26-28.
- Schöl V. L. (1998). Gérer la fertilité du sol. Agrodock 2, quatrième édition, Agromisa, Wageningen, Pays-Bas, 88 p.
- Schwartz C., Decroux J. & Muller J. C. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. France Agricole Editions, 407 p.
- Schwartz C., Muller J. C. & Decroux J. (2005). Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et prairies. France Agricole, Paris (France), 46 p.

- Schwartz D. & Lanfranchi R. (1990). Origine et évolution des savanes intermayombiennes (R.P. du Congo), apports de la pédologie et de la bio-géochimie isotopique. *In* : Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. ORSTOM, Paris (France) : 314-325.
- Sebillotte M. (1989). Fertilité et systèmes de production. « Ecologie et Aménagement Rural ». INRA (France), 369 p.
- Segalen P. (1995). Les sols ferrallitiques et leurs répartitions géographiques. ORSTM. Tome 1.2.3. Etudes et thèses, 572 p.
- Sement G. (1983). La fertilité des systèmes culturaux à base de cotonnier en Côte d'Ivoire. Neuf années d'expérimentation et d'observations multilocales (1973-1982). Paris : GERDAT-IRCT, 40 p.
- Sement G. (1986). Le cotonnier en Afrique Tropicale. Technique d'Agriculture Tropicale, (Ed), Maisonneuve et Larose Paris (France), 131 p.
- Sharma S. K., Ramesh A., Sharma M. P., Joshi O. P., Govaerts B., Steenwerth K. L. & Karlen D. L. (2010). Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality. *In* : Biodiversity. Biofuels. Agroforestry and Conservation Agriculture. *Sustainable Agriculture Reviews*, 5 : 317-358.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S. M., Sa J.C.D. & Albrecht A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22 : 755-775.
- Smith A., Johnson B. & Lee C. (2022). Soil nutrient ratios and their impact on crop yield. *Journal of Soil Science*, 78(2) : 123-134.
- Sogbedji J. M., Van E. H. M. & Agbeko K. L. (2006). Cover cropping and Nutrient Management Strategies for Maize Production in Africa. *Agronomy Journal*, 98 : 883-889.
- Sokrat S., Raphaël C., Alice B., Brice D., Jürg H., Lilia L., Didier P., Guillaume B. & Bernard J. (2017). Fertilisation des grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse*, 8(8) : 1-8.
- Soltner D. (1986). Les bases de la production végétale. Tome I. le sol. 146 éditions collection sciences et techniques agricoles, Maine et Loire (France), 464 p.
- Soltner D. (1989). Les bases de la production végétale, tome 1. Le sol. 17ème Ed., Collection Sciences et Techniques Agricoles, Maine et Loire (France), 468 p.

- Soltner D. (1992). Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 19ème Edition Sainte Gemmes sur Loire, Angers (France), 200 p.
- Soro D., Bakayoko S., Dao D., Bi Tra T., Angui P. & Girardin O. (2011). Diagnostic de fertilité du sol au centre-nord de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 23 (3) : 205-215.
- Sparks D. L. & Huang P. M. (1985). Physical Chemistry of Soil Potassium. *In: Munson RD (ed) Potassium in Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA, 201-276.
- Speth P., Christoph M. & Diekkrüger B. (2010). Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa. 2010. Springer Eds. Subsaharienne. Rome, (Italie), 63 p.
- Stessens J. (2002). Analyse technique et économique des systèmes de production agricole au nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Biologiques Appliquée, Katholieke Universiteit Leuven (Belgique), 302 p.
- STIPA (1982). Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sol en banque de données. Système de transfert de l'information pédologique et agronomique, STIPA. 2ème Edition, 1982, INRA, CIRAD-LRAT, Montpellier (France), 125 p.
- Stoorvogel J. J. & Smaling E. (1990). Assesment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa, 1983-2000. VoU Main Report 28, DLO. The Winang Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, the Netherlands, 137p.
- Tahraoui S. (2024). Contribution à l'optimisation de la fertilisation phospho-azotée en sol salé et calcaire. Thèse de Doctorat, Faculte des Sciences et Science de la Nature et de la Vie Departement des Sciences Agronomiques Universite Mohamed Khider-Biskra, (Algérie), 110 p.
- Taïbi A. N. (2015). Désertification et dégradation. Ré-interrogation des concepts à la lumière d'exemples africains. Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie, Université d'Angers (France), 171 p.
- Taoufik EL Rasafi (2018). Etude des effets des éléments traces métalliques sur la croissance des plantes et rôle des amendements organiques dans la phytoremediation des sites contaminés. Thèse de Doctorat, Université Sultan Moulay Slimane (Maroc), 158 p.

- Thibault C. & Lecompte F. (2018). Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères. Rapport d'étude du GIS Piclég (France), 72 p.
- Tié B. T. (1995). Contribution à l'étude de la fourniture en azote des sols sous climat tropical humide (Côte d'Ivoire) : application à l'entretien de la fertilité des terres de cultures. Thèse de Doctorat, Université de Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire), 182 p.
- Tié B. T., Diby L. N., Seyo E. & Assa A. (2010). Estimating soil available nitrogen with a hot H₂O₂/KCl extraction. *Scientific Research and Essays*, 5 :12-8.
- Tié B.T. (2019). Support de formation sur la technique N-NH₄⁺. 8 p.
- Tokpa L. Z. & Sery D. J. M. (2023). Productivité de trois variétés d'igname (*Dioscorea spp.*) sur deux Ferralsols en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 84 : 19212-19232.
- Tokpa L. Z., Tie B. T., Séry D. J. M. (2020). Underlining a nitrogen–calcium imbalance in red soils under yam crop (*Dioscorea alata* var Bete-Bete) in Ivory Coast. *Journal of Plant Nutrition*, 43 :4-10.
- Tokpa L.Z. (2021). Potentialités agronomiques de trois variétés d'igname (*Dioscorea spp.*) sur des sols de différents niveaux de fertilité en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), 175p
- Tokpa L.Z., Tié B. T. & Séry D. J. M. (2019). Underlining a nitrogen calcium imbalance in red soils under yam crop (*Dioscorea alata* var Bete-Bete) in Ivory Coast. *Journal of Plant Nutrition*, 184 : 19212-19232.
- Toundou O. (2016). Evaluation des caractéristiques chimiques et agronomiques de cinq composts de déchets et étude de leurs effets sur les propriétés chimiques du sol, la physiologie et le rendement du maïs (*Zea mays* L. Var. Ikenne) et de la tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Var. Tropimech) sous deux régimes hydriques au Togo. Thèse de Doctorat, Université de Limoges ; Faculté Des Sciences, Université de Lomé (Togo), 213 p.
- Touoyem F. M. (2022). Contribution des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers à la dynamique des savanes périforestières sur le confluent Mbam-Sanaga au Centre Cameroun. Thèse de Doctorat, Département de Géographie, Université de Yaoundé I, 383 p.

- Touyre P. (2015). Le sol, un monde vivant : Formation, faune, flore. Edition Delachaux et Niestlé Paris (France), 83 p.
- Traoré A. (2008). Effet des rotations et des fumures sur la fertilité du sol et le rendement du coton dans la zone soudanienne du Burkina Faso, Mémoire de fin de cycle, Ingénieur agronome, Institut polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée, Mali, 54 p.
- Traore S. S. H. (2012). Etude des impacts agro-pédologiques des apports continus et en rotation de fertilisants organo-minéraux sur le cotonnier en stations de recherche : cas de Sana et Farako-Bâ. Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur du développement rural, Option : Agronomie, Université Polytechnique De Bobo-Dioulasso. Institut du Développement Rural (IDR), Burkina Faso, 66 p.
- Trigalet S., Chartin C., Kruger I., Carnol M., Van Oost K. & Van-Wesemael B. (2017). Soil organic carbon fractionation for improving agricultural soil quality assessment-a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 21(3) : 191-200.
- Turlin J. P. (2016). Agriculture de conservation des sols : semis direct sous couvert permanent de trèfle blanc. *Fourrages*, 228 : 265-270.
- Vaissayre M. & Cauquil J. (2000). Principaux ravageurs et maladies du cotonnier en Afrique au Sud du Sahara. CIRAD-CTA, 60 p.
- Vaitilingom G. (2006). Utilisations énergétiques de l'huile de coton. *Cahiers agricultures*, 15(1) : 144-149.
- Van D. H. G., Legout A. & Pollier B. (2014). The dynamics of calcium and magnesium inputs by throughfall in a forest ecosystem on base poor soil are very slow and conservative: Evidence from an isotopic tracing experiment (^{26}Mg and ^{44}Ca). *Biogeochemistry*, 118 : 413-442.
- Van der Pol F. (1992). Soil mining: an unseen contributor to farm income in southern Mali. Royal Tropical Institute- Amsterdam, 325 p.
- Vertès F., Jeuffroy M. H., Justes E., Thiebeau P. & Corson M. S. (2010). Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovations agronomiques*, 11 : 25-44.

- 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*, 34 : 29-38.
- Walter C.H., Bispo A., Chenu C., Langlais H. A. L., Schwartz C.H. (2015). Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. Agriculture et Foncier Concurrences entre Usages des sols et entre Usagers des sols Agricoles : La Question Foncière Renouvelée. Editions Cahier Demeter, Paris (France), 15 : 51-68.
- Wedepohl K. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 : 1217-1232.
- Widad E. (2020). Caractérisation physico-chimique de la qualité et de la pollution métallique des sols agricoles dans la partie nord-est de la plaine du tadla–bassin oum er rbia–maroc. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Maroc, 167 p.
- Wilding L.P. & Tessier O. (1988). Genesis of vertisols : shrinkswell phenoma. *In* Vertisols : their distribution, properties, classification, and management. Edited by L.P. Wilding and R. Puentes, Texas A&M University Printing Center, college station, Texas (USA) : 55-81.
- Wiseman C. L. S. & Püttmann W. (2005). Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany. *European Journal of Soil Science*, 56 : 65-76.
- WRB (World Soil Resources) (2014). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 191 p.
- Yaghoubi K. M., Pirdashti H., Rahimian H. (2019). The role of potassium solubilizing bacteria (KSB) inoculations on grain yield, dry matter remobilization and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Plant Nutrition*, 42 : 1165-1179.
- Yao T. (2009). Contribution à la gestion durable des eaux pluviales dans un contexte de Changement climatique : cas de la ville de Korhogo. Mémoire de fin d'étude de Master Spécialisé en Génie Sanitaire et Environnement. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement Ouagadougou (Burkina Faso), 52 p.
- Yoboué K. E. ; Blé L. O. & Yao K. A. (2018). Caractéristiques Morphopédologiques et Géochimiques des Sols Brunifiés de Anikro et de Kahankro (Centre-Sud de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 14(3) : 1857-7881.

- Youl S. (2009). Dynamique et modélisation de la dynamique du carbone dans un agrosystème de savane de l'Ouest du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Polytechnique Bobo Dioulasso (Burkina), 193 p.
- Zagbaï H. S., Bert F. & Lebailly P. (2006). Impact de la dynamique cotonnière sur le développement rural. *Biotechnology Agronomy Society and Environment*, 10(4) : 325-334.
- Zahia B. (2024). Polycopié pédagogique. Ecosystème microbiens impact-santé environnement. Cours de Microbiologie Appliquée niveau Master 2, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (Algérie), 92 p.
- Zahm F., Viaux P., Vilain L., Girardin P. & Mouchet C. (2008). Assessing farm sustainability with the IDEA method—from the concept of agriculture sustainability to case studies on farms. *Sustainable development*, 16(4) : 271-281.
- Zakem E. J., Cael B. B. & Levine N. M. (2021). A unified theory for organic matter accumulation. *National Academy of Sciences*, 118(6) : 1-22.
- Zomboudre G. (2009). Caractérisation biophysique et incidence des parcs à *Vitellaria paradoxa* Gaertn. et *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. Sur les facteurs pédoclimatiques et la productivité du maïs (*Zea mays* L.) dans la zone ouest du Burkina Faso. Thèse Doctorat Unique, Unité de Formation et de Recherche en Science de la Vie et de la Terre, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 150 p.



PUBLICATIONS

Publication 1

KOUASSI Koffi Djinkin Samuel, ZORO Bi Gohi Ferdinand, KOUADIO Koffi Hypolith, HAMOUDA Achi, BAKAYOKO Sidiky, and SORO Dognimiton. (2024). Evaluation of the Availability of Exchangeable Soil Bases Under Cotton in the Ouangolodougou Production Basin (North of Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, (73) : 2351-8014.

Publication 2

KOUASSI Koffi Djinkin Samuel, TOURE Bessimory, ABOBI Akre Hébert Damien, ZORO Bi Gohi Fernand and BAKAYOKO Sidiky. (2025). Reasoning Behind Soil Fertilisation under Cotton Crops Based on the Relationship between the Sum of Exchangeable Bases (SEB) and Mineralisable Nitrogen (N-NH₄⁺). *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(10) : 109-123.

RESUME

L'étude porte sur la contribution de la fertilisation raisonnée, notamment via l'utilisation de la forme ammoniacale de l'azote (N-NH₄⁺), à l'amélioration durable de la production cotonnière. Elle a été menée en trois phases sur trente parcelles d'au moins un hectare qui ont été sélectionnées dans le département de Ouangolodougou. Il s'est agi d'abord d'une caractérisation in situ des propriétés morphologiques des sols des parcelles de coton, suivie par la détermination des caractéristiques chimiques de ces sols pour déduire les doses précises d'engrais minéraux adaptées. Enfin, l'application des doses de fertilisants déterminées sur les sols et l'évaluation de leurs effets sur le cotonnier a été réalisée. Le niveau global de fertilité des sols a été diagnostiqué selon la relation entre la somme des bases échangeables et l'azote minéralisable, permettant de concevoir des fertilisations adaptées aux carences détectées. Les essais agronomiques ont été conduits sur des parcelles témoins (engrais NPK standard) et des parcelles tests (apports de NPK+dolomie+urée+KCl ou de NPK+urée+KCl) avec relevés systématiques de paramètres agronomiques (taille, branches, entre-nœuds, capsules) et rendement, mesurés sur des segments délimités au stade fructifère (130 jours après semis). Les données ont été traitées statistiquement via une ANOVA et l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour identifier les effets positifs des fertilisations raisonnées sur les rendements de coton. Il est ressorti de l'étude que les sols sont profonds et différenciés en horizons, riches en éléments grossiers et que ces sols se divisent en deux groupes selon leur teinte : sols humifères (gris foncé) et sols peu humifères (teinte claire). La morphologie révèle aussi une bonne porosité superficielle mais une compaction et un mauvais drainage dans les horizons profonds. Les analyses chimiques ont montré une acidité modérée des sols, des taux variables de carbone organique, azote, phosphore assimilable et un déficit généralisé en potassium, ainsi que des carences ponctuelles en calcium et magnésium. Les résultats agronomiques révèlent une amélioration significative de la taille des plants, une nette augmentation des branches fructifères, entre-nœuds, capsules et un rendement multiplié par 8 à 12 dans les parcelles fertilisées selon la nouvelle méthode par rapport aux témoins. L'analyse statistique confirme l'efficacité des fertilisations raisonnées, sans préférence marquée entre les deux types appliqués, validant ainsi cette approche comme un levier prometteur pour la durabilité et la productivité de la filière cotonnière ivoirienne. Ces résultats ouvrent la perspective d'une diffusion élargie de cette technique auprès des producteurs, accompagnée d'un suivi agro-pédologique afin d'adapter les pratiques aux contextes locaux.

Mots clés : Cotonculture, Fertilisation raisonnée, Sol, facteur N-NH₄⁺, Production durable.

ABSTRACT

The study focuses on the contribution of sustainable fertilisation, particularly through the use of ammoniacal nitrogen (N-NH₄⁺), to the sustainable improvement of cotton production. It was conducted in three phases on thirty plots of at least one hectare each, selected in the department of Ouangolodougou. The first phase involved an in situ characterisation of the morphological properties of the cotton plot soils, followed by the determination of the chemical characteristics of these soils in order to deduce the precise doses of mineral fertilisers required. Finally, the determined doses of fertiliser were applied to the soils and their effects on the cotton plants were evaluated. The overall level of soil fertility was diagnosed based on the relationship between the sum of exchangeable bases and mineralisable nitrogen, enabling the design of fertilisation programmes tailored to the deficiencies detected. Agronomic trials were conducted on control plots (standard NPK fertiliser) and test plots (NPK+dolomite+urea+KCl or NPK+urea+KCl inputs) with systematic recordings of agronomic parameters (size, branches, internodes, capsules) and yield, measured on delimited segments at the fruiting stage (130 days after sowing). The data were statistically processed using ANOVA and Principal Component Analysis (PCA) to identify the positive effects of rational fertilisation on cotton yields. The study showed that the soils are deep and differentiated into horizons, rich in coarse elements, and that these soils can be divided into two groups according to their colour: humic soils (dark grey) and low-humus soils (light colour). The morphology also reveals good surface porosity but compaction and poor drainage in the deep horizons. Chemical analyses showed moderate soil acidity, variable levels of organic carbon, nitrogen and assimilable phosphorus, and a generalised potassium deficit, as well as occasional calcium and magnesium deficiencies. The agronomic results reveal a significant improvement in plant size, a clear increase in fruiting branches, internodes and capsules, and a yield multiplied by 8 to 12 in the plots fertilised using the new method compared to the control plots. Statistical analysis confirmed the effectiveness of sustainable fertilisation, with no marked preference between the two types applied, thus validating this approach as a promising lever for the sustainability and productivity of the Ivorian cotton sector. These results open up the prospect of wider dissemination of this technique among producers, accompanied by agro-pedological monitoring in order to adapt practices to local contexts.

Keywords : Cotton cultivation, Sustainable fertilisation, Soil, N-NH₄⁺ factor, Sustainable production.