



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE
Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

THÈSE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Pédologie

ANNÉE : 2022-2023

N° D'ORDRE : 082

Évaluation du potentiel de fertilité du sol d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers dans une perspective de revalorisation au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire (Daloa).

CANDIDAT

Nom : KACOU

Prénoms : Bony

Date de Soutenance
le : 30 / 11 / 2023

JURY

Présidente : Mme TRAORÉ - OUATTARA Karidia, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE ;

Directeur : M. ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE ;

Rapporteur : M. AYOLIÉ Koutoua, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE ;

Examineurs :

- M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE ;
- M. NANGAH Krogba Yves, Maître de Conférences,
Université Peleforo GON COULIBALY.

TABLE DES MATIÈRES	PAGES
TABLE DES MATIÈRES	i
DÉDICACE.....	vi
REMERCIEMENTS	vii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES ANNEXES.....	xv
INTRODUCTION.....	1
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	6
I.1. SYSTÈMES DE CLASSIFICATION DES SOLS ET SOLS DE CÔTE D'IVOIRE.....	7
I.1.1. Systèmes de classification des sols.....	7
I.1.1.1. Caractéristiques générales de la Commission de la Pédologie et de Cartographie des Sols.....	7
I.1.1.2. Caractéristiques générales de la Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols.....	8
I.1.2. Sols de Côte d'Ivoire selon la CPCS	10
I.1.2.1. Sols peu évolués à minéraux bruts.....	10
I.1.2.2. Sols hydromorphes.....	10
I.1.2.2.1. Sols hydromorphes peu évolués d'apport colluvial	10
I.1.2.2.2. Sols hydromorphes peu évolués d'apport illuvial.....	11
I.1.2.3. Vertisols	11
I.1.2.4. Sols bruns tropicaux.....	12
I.1.2.5. Sols ferrugineux	13
I.1.2.6. Sols ferrallitiques	14
I.2. CAFÉIER ET CACAOYER ET LEURS SOLS DE CULTURE	16
I.2.1. Caféier.....	16
I.2.1.1. Histoire et répartition géographique	16
I.2.1.2. Position systématique.....	19
I.2.1.3. Morphologie et biologie.....	20
I.2.1.3.1. Système racinaire	20
I.2.1.3.2. Troncs et branches	21
I.2.1.3.3. Système foliaire	21
I.2.1.3.4. Système floral	21

I.2.1.4. Classification phylogénétique	23
I.2.1.5. Facteurs climatiques de la caféiculture	24
I.2.1.5.1. Température	24
I.2.1.5.2. Pluviométrie	25
I.2.1.5.3. Eclairage	25
I.2.1.5.4. Ventilation.....	25
I.2.1.6. Exigences pédologiques	25
I.2.2. Cacaoyer	27
I.2.2.1. Origine et répartition géographique	27
I.2.2.2. Position systématique.....	30
I.2.2.3. Morphologie et biologie du cacaoyer	30
I.2.2.3.1. Système racinaire	31
I.2.2.3.2. Partie aérienne.....	31
I.2.2.4. Classification phylogénétique	34
I.2.2.5. Facteurs climatiques de la cacao-culture	34
I.2.2.5.1. Température	34
I.2.2.5.2. Pluviométrie	34
I.2.2.5.3. Ombrage et insolation	35
I.2.2.6. Exigences pédologiques	35
I.2.3. Sols de culture du caféier et du cacaoyer en Côte d'Ivoire.....	36
I.2.3.1. Localisation géographique	36
I.2.3.2. Caractéristiques générales.....	38
I.2.3.3. Conditions de dégradation	39
I.2.3.4. Options de restauration	40
I.2.4. Notion de fertilité du sol en général.....	43
I.3. MILIEU D'ÉTUDE	46
I.3.1. Situation géographique	46
I.3.2. Caractéristiques physiques du milieu d'étude.....	47
I.3.2.1. Climat et hydrographie	47
I.3.2.2. Végétation	47
I.3.2.3. Géomorphologie et pédologie.....	48
I.3.3. Activités socio-économiques	48
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES	49

II.1. MATÉRIEL	50
II.1.1. Présentation des sites de l'étude	50
II.1.2. Matériel utilisé.....	54
II.1.2.1. Matériel édaphique	54
II.1.2.2. Matériel technique	54
II.1.2.2.1. Matériel de terrain	54
II.1.2.2.2. Matériel de laboratoire.....	55
II.1.2.2.3. Matériel informatique	56
II.2. MÉTHODES	57
II.2.1. Détermination des propriétés morphologiques, physico-chimiques et biologiques des sols.....	57
II.2.1.1. Caractérisation morphologique des sols	57
II.2.1.1.1. Description du dispositif de prospection des sols.....	57
II.2.1.1.2. Emplacement et ouverture des fosses pédologiques.....	58
II.2.1.1.3. Description des propriétés morphologiques et échantillonnage du sol	59
II.2.1.2. Détermination des propriétés physico-chimiques des sols	60
II.2.1.2.1. Préparation des échantillons des sols pour des analyses au laboratoire	60
II.2.1.2.2. Analyses physico-chimiques	61
II.2.1.3. Etude de la macrofaune du sol.....	62
II.2.1.3.1. Description du dispositif de collecte	62
II.2.1.3.2. Mode de collecte.....	64
II.2.1.3.3. Isolement et dénombrement.....	64
II.2.2. Classifications des sols et correspondances CPCS-WRB	64
II.2.2.1. Classification CPCS des sols	65
II.2.2.2. Classification WRB des sols.....	65
II.2.3. Analyse du potentiel de fertilité des sols	66
II.2.3.1. Analyse au regard des propriétés morpho-physiques et du pH du sol.....	66
II.2.3.2. Analyse au regard des teneurs d'éléments minéraux.....	67
II.2.3.3. Analyse de la fertilité au regard de la macrofaune du sol	68
II.2.3.4. Analyse globale des données et détermination des classes de sols d'égale fertilité... 68	
II.2.3.4.1. Analyses de variances.....	68
II.2.3.4.2. Matrices de corrélations.....	69
II.2.3.4.3. Analyse en Composantes Principales	69
II.2.3.4.4. Classification Ascendante Hiérarchique et classes de sols d'égale fertilité	70

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION	71
III.1. RÉSULTATS	72
III.1.1. Caractères généraux des sols étudiés	72
III.1.1.1. Caractéristiques morpho-physiques	72
III.1.1.2. Caractéristiques chimiques.....	75
III.1.1.3. Caractéristiques biologiques	81
III.1.1.4. Variabilité des propriétés des sols	82
III.1.2. Classes des sols et correspondances entre CPCS et WRB.....	84
III.1.3. Potentiel de fertilité des sols étudiés	91
III.1.3.1. Propriétés agronomiques des sols	91
III.1.3.1.1. Au regard de la morphologie des sols	91
III.1.3.1.2. Au regard des interactions entre les variables physico-chimiques des sols	92
III.1.3.1.3. Au regard des équilibres entre quelques éléments nutritifs du sol.....	98
III.1.3.1.4. Au regard de l'acidité et de la désaturation du complexe adsorbant du sol.....	99
III.1.3.1.5. Au regard des interactions entre la densité des macro-invertébrés et les variables explicatives de la fertilité des sols.....	100
III.1.3.2. Composantes Principales de l'ACP, nuage des variables des sols et classes de sols d'égale fertilité	102
III.1.3.2.1. Composantes Principales de l'ACP.....	102
III.1.3.2.2. Nuage des variables des sols	102
III.1.3.2.3. Classes de sols d'égale fertilité	104
III.2. DISCUSSION	106
III.2.1. Processus majeurs de la pédogenèse et variabilité des propriétés des sols de Daloa.	106
III.2.2. Potentiel de fertilité des sols étudiés	111
III.2.2.1. Fertilité chimique	111
III.2.2.2. Fertilité biologique	111
III.2.2.3. Propriétés morpho-physiques	112
III.2.2.4. Effets des principales interactions entre les variables des sols sur leur fertilité	114
III.2.2.4.1. Interactions CEC-MO et CEC-nutriments du sol.....	114
III.2.2.4.2. Interactions CEC-faune du sol et texture-faune du sol	115
III.2.3. Facteurs ayant conduit à l'abandon du sol d'anciens vergers de cacaoyers et de caféiers dans la zone d'étude	117
III.2.4. Perspectives de revalorisation des sols étudiés	120
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	122

RÉFÉRENCES.....	127
ANNEXES	xvi
PUBLICATIONS.....	157
RÉSUMÉ.....	160

DÉDICACE

À ma chère et tendre épouse BOMI Raïssa et mes enfants BOMI Damas Junior Yann Kacou et BOMI Kwamé Moïse Emmanuel Kacou pour le soutien et l'amour inestimables qu'ils me manifestent quotidiennement et surtout durant toute la période de réalisation de ce travail.

REMERCIEMENTS

Je ne saurais présenter cette thèse sans exprimer au préalable ma reconnaissance à tous ceux ou celles qui, de près ou de loin, ont contribué à son aboutissement. Ainsi, mes premiers mots de remerciement et de gratitude sont adressés au Professeur ADOHI Krou Viviane, Professeur Titulaire en Physique, Présidente de l'Université Jean Lorougnon GUÉDÉ (UJLoG) et à ses collaborateurs, Docteur SORO Dogniméton, Maître de Conférences en Agropédologie, Vice-président Chargé de la Pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique, Professeur KONÉ Issiaka, Professeur Titulaire en Socio-anthropologie, Vice-président en charge de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures et Professeur BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire en Agropédologie, Secrétaire Général Adjoint de l'UJLoG, pour leurs conseils, leurs encouragements et pour avoir facilité toutes les procédures administratives en vue de la réalisation de cette thèse. Ces remerciements sont aussi adressés à l'ancienne équipe dirigeante de l'UJLoG, qui avait à sa tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epse KONÉ, Professeur Titulaire en Ecologie Générale, qui m'a permis de m'inscrire en thèse.

Ce travail a été réalisé à l'UFR Agroforesterie dirigée par Docteur TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences en Phytopathologie, à qui j'exprime toute ma gratitude, pour ses conseils avisés.

J'exprime surtout ma reconnaissance à Docteur ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences en Pédologie, Directeur de cette thèse. En effet, malgré ses nombreuses occupations, il a toujours été disponible pour diriger ce travail avec toute la rigueur scientifique. Merci cher Maître.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury de ce mémoire, à savoir :

- Madame TRAORE-OUATTARA Karidia, Professeur Titulaire en Botanique à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse ;

- Monsieur AYOLIE Koutoua, Maître de Conférences en Agrophysiologie, pour sa contribution à l'amélioration de ce mémoire et pour avoir accepté de faire partie du jury en tant que rapporteur ;

- Monsieur SORO Dogniméton, Maître de Conférences en Agropédologie à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour sa contribution à l'amélioration de ce travail en tant qu'examinateur ;

- Monsieur NANGAH Krogba Yves, Maître de Conférences en Pédologie à l'Université Peleforo Gon Coulibaly, pour sa contribution à l'amélioration de ce mémoire en tant qu'examinateur.

Je témoigne ma gratitude à tous les enseignants-chercheurs du département d'Agropédologie de l'UJLoG pour leur implication remarquable dans la réussite de cette thèse.

Je ne saurais oublier les vaillants planteurs KOFFI Roger, AMOUZOU Innocent, ZONGO Adama, KOFFI Marcel, ZOGBO Valentin et SÉRY Guillaume qui ont accepté volontiers que les travaux de cette étude soient réalisés dans leurs plantations.

À Monsieur Issa SANOGO, Proviseur du Lycée Moderne 2 de Daloa et ses adjointes (Mesdames KOUAKOU Monique et SÉMIEN Evelyne) ainsi que mes collègues enseignants du Lycée Moderne 2 de Daloa, particulièrement ceux du Conseil d'Enseignement des Sciences de la Vie et de la Terre, je dis infiniment merci pour leurs soutiens et encouragements.

Il en est de même pour tous mes parents et amis, en particulier, BONY N'da Françoise épouse KWACHI, KOMAN N'Cho Léon, KADIO Maria Gisel épouse DARÉ, KADIO Christiane, Docteur KWACHI Franck, Docteur ALLÉ Okon Albert et son épouse, YÉO Joseph et Docteur YÉO Lacina, pour leurs remarquables et diverses contributions à la réalisation de ce travail.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADN	: Acide Désoxyribonucléique
AE	: AgroÉcologie
ANOVA	: Analyse de variance
Autres_M	: Autres macro-invertébrés
APC	: Analyse en composantes principales
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
CNTIG	: Comité National de Télédétection et d'Information Géographique
CPCS	: Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CV	: Coefficient de Variation
Dal	: Daloa
E.G	: Éléments grossiers
ENSEA	: École Nationale Supérieure de Statistique et d'Économie Appliquée
ESA	: École Supérieure Agronomique
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FOASTAT	: Organisation des Nations Unies pour les Bases de Données Statistiques sur l'Alimentation et l'Agriculture
Four	: Fourmis
Gon	: Gonaté
GPS	: Système de Positionnement Mondial
ICEF	: International de Conseil d'Études et de Finances
ICCO	: Organisation Internationale du Cacao
ind.m ⁻²	: individus par mètre carré
INS	: Institut National des Statistiques
IUSS	: Union Internationale des Sciences du Sol
LAVESO	: Laboratoire d'Analyse des Végétaux et des Sols
Lob	: Loboguiguia
Mad	: Madoguhé
MOS	: Matière organique du sol
OGM	: Oganisme Génétiquement Modifié
pc	: pourcent
pH	: potentiel Hydrogène
PIB	: Produit Intérieur Brut

Pshh	: Profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RSG	: Groupe de Sols de Référence
Tgf	: Taux de gravillons ferrugineux
Ter	: Termites
TSBF	: Tropical soil biology and fertility
TVA	: Taxe sur la Valeur Ajoutée
UEMOA	: Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
USDA	: Département de l'Agriculture des États-Unis
Vers_T	: Vers de terre
Wan	: Wandaguhé
WRB	: Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols
Zép	: Zépréguhé.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Principaux pays producteurs de café (2007).....	18
Tableau II : Classement des pays selon leur consommation de café par habitant en 2014.....	19
Tableau III : Caractéristiques chimiques idéales du sol pour la caféiculture.....	27
Tableau IV : Occupations du sol et coordonnées géographiques des sites de l'étude	50
Tableau V : Niveaux de stratification du dispositif de prospection pédologique	58
Tableau VI : Paramètres physico-chimiques et méthodes de détermination	61
Tableau VII : Valeurs indicatrices d'interprétation de la somme et du taux de saturation en bases échangeables des sols	67
Tableau VIII : Equilibres entre minéraux du sol.....	68
Tableau IX : Granulométrie des sols étudiés	74
Tableau X : Caractéristiques chimiques des sols de Bla et de Daloa en fonction de la profondeur d'échantillonnage	77
Tableau XI : Caractéristiques chimiques des sols de Gonaté et de Loboguiguia en fonction de la profondeur d'échantillonnage.....	78
Tableau XII : Caractéristiques chimiques des sols de Madoguhé et de Wandaguhé en fonction de la profondeur d'échantillonnage.....	79
Tableau XIII : Caractéristiques chimiques du sol de Zépréguhé en fonction de la profondeur d'échantillonnage	80
Tableau XIV : Densités des taxons des macro-invertébrés collectés dans les 40 premiers cm des sols.....	81
Tableau XV : Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des propriétés dans les 40 premiers cm des sols	83
Tableau XVI : Principales caractéristiques CPCS du sol d'anciens vergers de caféiers à Daloa et Bla et correspondances dans la WRB.....	86
Tableau XVII : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de cacaoyers à Wandaguhé et correspondances dans la WRB	87
Tableau XVIII : Principales caractéristiques CPCS du sol d'anciens vergers de cacaoyers à Madoguhé et Gonaté et correspondances dans la WRB	87
Tableau XIX : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de caféier à Loboguiguia et correspondances dans la WRB.....	89

Tableau XX : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de cacaoyer à Zépréguhé et correspondances dans la WRB	90
Tableau XXI : Propriétés morphologiques des sols et contraintes agronomiques associées ...	91
Tableau XXII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Bla entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols.....	92
Tableau XXIII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Daloa entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	93
Tableau XXIV : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Gonaté entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	94
Tableau XXV : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Madoguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	95
Tableau XXVI : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Wandaguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	96
Tableau XXVII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Zépréguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	97
Tableau XXVIII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Loboguiguia entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols	98
Tableau XXIX : Équilibres entre éléments nutritifs dans les 40 premiers cm des sols	99
Tableau XXX : Corrélations macro-invertébrés-texture et macro-invertébrés-CEC dans les 40 premiers cm des sols	101
Tableau XXXI : Pourcentage d'inertie expliqué par les quatre (4) premiers axes de l'ACP	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition géographique des différentes zones de production du café dans le monde (2007)	18
Figure 2 : Morphologie du Caféier <i>Robusta sp</i>	20
Figure 3 : Fleurs du caféier	22
Figure 4 : Fruits et feuilles (A) et représentation schématique de la coupe longitudinale du fruit du caféier (B).....	23
Figure 5 : Variétés morpho-géographiques de cacaoyers cultivés dans le monde	28
Figure 6 : Régions de production cacaoyère dans le monde en 2011	29
Figure 7 : Répartition par pays de la production mondiale de cacao en 2018	29
Figure 8 : Représentation schématique de l'architecture générale d'un cacaoyer	30
Figure 9 : Représentation schématique d'une fleur de cacaoyer.....	32
Figure 10 : Représentation schématique du fruit du cacaoyer	33
Figure 11 : Cartes des principales zones de productions de cacao et de café en Côte d'Ivoire	37
Figure 12 : Carte de localisation géographique du département de Daloa.....	46
Figure 13 : Cartes montrant la localisation géographique de la zone et des sites de l'étude extraites des images Landsat TM couvrant la zone d'étude.....	51
Figure 14 : Anciens vergers	52
Figure 15 : Quelques termitières observées sur les sites	52
Figure 16 : Quelques occupations du sol de l'environnement des parcelles.....	53
Figure 17 : Quelques échantillons de sol collectés	54
Figure 18 : Quelques outils et produits chimiques utilisés sur le terrain	55
Figure 19 : Dispositif du calcul de la pente du topographique.....	57
Figure 20 : Dispositifs utilisés pour l'emplacement des fosses	59
Figure 21 : Fosse pédologique	59
Figure 22 : Triangle textural de l'USDA	62
Figure 23 : Dispositifs mis en place pour la collecte de la faune.....	63
Figure 24 : Monolithe de sol (50x50x40 cm ³) scindé en trois strates	63

Figure 25 : Diagramme de synthèse du mode d'application de la classification WRB.....	66
Figure 26 : Profils de sols de plateaux étudiés	73
Figure 27 : Nuage des variables de l'ACP.	103
Figure 28 : Projection des variables et des individus sur le plan factoriel (1x2) (A) et classes de fertilité des sols (B)	105

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse des critères diagnostiques de la classification des sols ferrallitiques (Ségalen, 1970).....	xvii
Annexe 2 : Horizons, propriétés et matériaux diagnostiques de la WRB	xix
Annexe 3 : Guide simplifié pour les Groupes de sols de référence de la WRB (2014).....	xxv
Annexe 4 : Contraintes agronomiques des sols au regard des propriétés morpho-physiques et du pH du sol	xxvii
Annexe 5 : Valeurs moyennes des caractéristiques physiques des sols étudiés.....	xxix
Annexe 6 : Valeurs moyennes des caractéristiques chimiques des sols étudiés	xxx

INTRODUCTION

Depuis son indépendance, la performance économique de la Côte d'Ivoire a été soutenue par les exportations des matières premières agricoles (Esso, 2009), principalement le cacao et le café. Les recettes liées à l'exportation de ces cultures pérennes ont évolué au rythme de leur production. Pour preuve, entre 2000 et 2010, le café était le deuxième produit d'exportation du pays, après le cacao. Dans les années 1970 et 1980, le pays était le premier exportateur africain de café. Quant au cacao, la Côte d'Ivoire en était le premier producteur mondial, avec une production moyenne annuelle de plus de 1 700 000 tonnes, soit environ 40 pc de l'offre mondiale (ICCO, 2015). Le binôme café-cacao est devenu alors la principale locomotive de la croissance économique de la Côte d'Ivoire, fournissant 40 pc des exportations et 10 pc environ du PIB. L'exportation du cacao et du café était donc une source essentielle de revenus pour les producteurs et, au niveau macroéconomique, une source d'entrée de devises pour le pays (Cogneau & Mesplé-Somps, 1999). Ainsi, la filière café-cacao avait bénéficié d'une attention particulière, eu égard à son rôle stratégique dans l'économie ivoirienne car, la Côte d'Ivoire en tirait environ 30 à 90 pc des revenus d'exportation (Ouattara, 2010).

Aujourd'hui, après plus de 50 ans, la Côte d'Ivoire n'est plus que le 15^{ème} producteur mondial et 3^{ème} producteur africain de café, alors qu'elle occupait dans les années 1970 les rangs de 3^{ème} producteur mondial et premier pays africain avec une production annuelle de 400 000 tonnes (Mossu, 1990). Au contraire, la production de cacao estimée en 2020 à 2,2 millions de tonnes demeure le principal pilier du secteur agricole et revêt, de ce fait, une importance stratégique pour l'équilibre macroéconomique et la stabilité sociale du pays. Toutefois, durant ces quarante dernières années, la filière cacao dans l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UÉMOA), plus spécifiquement, en Côte d'Ivoire, a été confrontée à plusieurs contraintes et difficultés qui ont entravé son essor (FAOSTAT, 2022).

Parmi les freins au développement de la filière café-cacao, la chute des cours internationaux et leur forte volatilité (FAOSTAT, 2022), ainsi que la baisse continue des revenus perçus par les producteurs (Eponon *et al.*, 2017), ont joué un rôle déterminant. Quelques-uns de ces problèmes sont : l'amenuisement des terres cultivables, la faiblesse des rendements due au vieillissement des vergers (Freud *et al.*, 2000 ; Aguilar *et al.*, 2003 ; Assiri, 2007). Aussi, les difficultés des planteurs à s'approprier les techniques modernes de production, l'abandon des plantations du fait des crises politico-militaire et post-électorale survenues respectivement entre 2002 et 2007 puis 2010 et 2011 (Timité *et al.*, 2019).

En effet, le déclin de la productivité du café qui s'est fait remarquer depuis l'ère coloniale s'expliquait facilement par le fait que les plantations européennes de café étaient souvent établies dans un esprit pionnier, avec une connaissance insuffisante des conditions locales, notamment les données pédologiques. En quête de solutions au déclin de leurs plantations, les paysans ivoiriens procèdent en général à des replantations ou à des reconversions de leurs parcelles. Plusieurs travaux ont porté sur ces sujets de replantations et de reconversions des sols de cultures pérennes dégradés.

Ainsi, dans les années 1980, la région de Bonoua au Sud-Est de la Côte d'Ivoire voit le binôme café-cacao disparaître au profit d'investissements dans le palmier à huile, l'ananas et le manioc qui alimentent la ville d'Abidjan (Colin, 1990a ; Colin, 1990b ; Leiter & Hardin, 2004 ; Léonard & Vimard, 2005 ; Ruf, 2012).

On observe aussi des investissements pour l'installation de nouvelles cultures pérennes (hévéa, anacarde, etc.) par défrichements de jachères et de vieilles caféières dans les régions où les réserves forestières s'épuisent (Ruf, 2000 ; Ruf & Schroth, 2013). C'est ainsi que l'hévéa et l'anacarde ont pris de l'importance pendant et après la crise post-électorale sur des sols ferrallitiques aux alentours de la forêt classée du Haut-Sassandra (Gyau et *al.*, 2014).

L'étude réalisée par Colin (1990a) qui est le produit d'une recherche de terrain conduite de 1983 à 1985 en vue de cerner le devenir de l'économie de plantation dans une ancienne zone pionnière de Basse-Côte a ressorti que la dynamique des systèmes de culture est marquée par la disparition du caféier et du cacaoyer, par la régression de certaines productions vivrières, et par le développement de cultures comme le palmier à huile, l'ananas ou le manioc. Ici également, on note une tendance à la reconversion des plantations de cacaoyers et de caféiers.

Dans la région d'Agboville, à la fin des années 1980, Chaléard (1996) remarque que les extensions de nouvelles plantations de café, cacao et des vivriers associés étaient réduites, et les planteurs créaient de nouvelles parcelles vivrières qui pouvaient fournir 30 à 40 pc des revenus des exploitations familiales. Pour justifier les motivations de reconversions des sols des cultures pérennes, notamment le café, Chaléard (1997) évoque la chute du prix d'achat, qui joue en interaction avec d'autres facteurs, comme la croissance urbaine, et donc l'augmentation de la demande en vivriers, surtout à Abidjan, qui dépassait 2 millions d'habitants en 1990, puis l'amélioration des liaisons routières.

Il est donc clair qu'en Côte d'Ivoire, l'heure est à la revalorisation des sols anciennement utilisés pour des cultures pérennes tombées en déclin, précisément la caféiculture et la cacao-culture. Pour éviter un autre échec des nouvelles cultures envisagées, un besoin en

évaluation du potentiel de fertilité des sols abandonnés s'impose. En d'autres termes, il est impérieux que les décideurs et les acteurs de la production agricole soient informés sur les bases de données géographiques et sémantiques de ces sols, mais aussi et surtout, sur leurs possibilités de revalorisation. C'est en cela que la compréhension de la classification des sols réalisée en Côte d'Ivoire selon la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) (Aubert, 1965), qui date de plus d'un demi-siècle, s'avère très nécessaire. En effet, cette classification pourrait être aujourd'hui caduque à cause des effets du changement climatique et surtout des actions de l'homme qui ont concouru à détruire très massivement le couvert végétal du sol. Dans cette quête nouvelle de caractérisation des sols à grande échelle, tout pédologue africain devrait penser à appliquer la Base de Reference Mondiale pour les Ressources en sols (IUSS Working Group WRB, 2015) car ce concept nouveau, basé sur la connaissance de la morphologie et de l'environnement du profil et la description des horizons diagnostics, permet une bonne connaissance du sol en vue d'une meilleure utilisation (FAO, 2002). De plus, cette classification qui représente la synthèse des classifications pédologiques existantes, et déjà acceptée par la communauté internationale, n'est pas encore bien maîtrisée sur le continent africain (FAO, 2002).

Il ressort qu'à l'heure actuelle de la replantation ou la reconversion des sols de cultures pérennes tombées en déclin, une question de recherche s'impose : "comment envisager une revalorisation des sols sous cultures pérennes dégradées et abandonnées dans un objectif de durabilité". C'est ainsi que la présente thèse a été initiée. Elle vise globalement à constituer une base de données actualisée sur les sols d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers à l'effet de leur valorisation durable en agriculture. Pour parvenir à cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis. Ils visent à :

- déterminer les propriétés morphologiques, physico-chimiques et biologiques des sols étudiés ;
- caractériser ces sols selon le système CPCS et déterminer leurs correspondants dans la WRB (Base de Référence mondiale pour les Ressources en Sol) ;
- analyser leur potentiel de fertilité au regard des données collectées.

L'étude est fondée sur trois hypothèses énoncées comme suit :

- la classification des sols réalisée dans le département de Daloa serait devenue caduque ;
- les sols anciennement utilisés en cultures de caféiers et de cacaoyers dans le département de Daloa ne conviendraient plus à ces cultures ;

- les sols anciennement utilisés en cultures de caféiers et de cacaoyers dans le département de Daloa conviendraient à d'autres types de cultures pérennes et vivrières.

Le présent mémoire qui rend compte du travail réalisé est subdivisé en trois parties. À la suite de l'introduction, la première partie porte sur les généralités de l'étude, notamment les systèmes de classification des sols et les sols de Côte d'Ivoire, le caféier, le cacacoyer et leurs sols de culture ainsi que les caractéristiques générales du milieu de l'étude. Dans la seconde partie, sont présentés d'abord le matériel et ensuite les méthodes utilisées. La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus et à la discussion. Enfin, le mémoire se termine par une conclusion assortie de perspectives.

PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

I.1. SYSTÈMES DE CLASSIFICATION DES SOLS ET SOLS DE CÔTE D'IVOIRE

Les classes de sols connues en Côte d'Ivoire sont décrites selon la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS), un des systèmes français de classification des sols issu du Référentiel Pédologique français. Ce paragraphe présente une revue bibliographique sur ces classes de sols. Mais avant, une présentation des caractéristiques générales de la CPCS et du Référentiel World Reference Base for Soil Resources (WRB) est faite. Ce dernier système de classification des sols cité est destiné à servir de commun dénominateur pour communiquer à l'échelon international.

I.1.1. Systèmes de classification des sols

I.1.1.1. Caractéristiques générales de la Commission de la Pédologie et de Cartographie des Sols

Le système de la Commission de la Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) (Aubert, 1965) est basé sur une série de critères hiérarchisés, permettant d'accéder à des niveaux de plus en plus détaillés de classification. Ainsi, les unités de classification dans ce système se déclinent en unités supérieures et unités inférieures.

Les unités supérieures dans la classification de la CPCS (Aubert, 1965) sont constituées, des plus importantes aux moins importantes, par : la classe ou ordre, la sous-classe ou sous ordre, le groupe et le sous-groupe. Les classes correspondent à un développement particulier du profil soit peu ou évolué. Les sous-classes peuvent être différenciées sur des critères physico-chimiques à l'intérieur de la classe. Les groupes sont définis par des caractères morphologiques correspondant à des processus d'évolution des sols tels que la différenciation de certains horizons, le lessivage du calcaire, des éléments colloïdaux, etc. Quant aux sous-groupes, ils distinguent à l'intérieur des groupes, soit un degré dans l'intensité d'un processus, soit une transition entre deux groupes.

Les unités inférieures dans la classification de la CPCS sont constituées par la famille, la série, le type et la phase (Aubert, 1965). Les familles rassemblent dans un même sous-groupe, les sols dérivant du même matériau. Les séries sont caractérisées par le même type de profil (même disposition, épaisseur, couleur des horizons), même type de drainage, de roche-mère. Ces unités sont les plus commodes à utiliser pour la cartographie à grande échelle. Elle porte généralement le nom du lieu où elle a été identifiée pour la première fois. Le type correspond à

une granulométrie particulière de l'horizon supérieur et la phase, pour finir, correspond à des critères de différenciation tels que le taux d'éléments grossiers, la pente, le degré d'érosion, etc.

En général, les classifications réalisées dans ce système sont poussées jusqu'au niveau du groupe ou du sous-groupe. Elles se limitent donc aux unités supérieures de la classification.

I.1.1.2. Caractéristiques générales de la Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols

La Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols ou World Reference Base for Soil Resources (WRB) est le système international de classification des sols approuvé par l'Union Internationale des Sciences du Sol (International Union of Soil Sciences - IUSS). Il a été développé par une collaboration internationale coordonnée par le Groupe de travail de l'UISS sur la base de référence. Il a remplacé la légende de la carte FAO-UNESCO des sols du monde en tant que norme internationale.

Ce système s'inspire largement des concepts de classification des sols modernes, y compris la Soil Taxonomy (1975), la Légende de la carte des sols FAO-UNESCO (1975) du monde, le Référentiel pédologique (1980) et les concepts russes. Il n'a pas pour dessein de se substituer aux systèmes nationaux de classification des sols, mais de servir de commun dénominateur pour communiquer à l'échelon international. Ainsi, autant que possible, ses critères de diagnostic correspondent à ceux des systèmes existants, de sorte que la corrélation avec les systèmes nationaux et internationaux soit aussi simple que possible (WRB, 2014).

En règle générale, la WRB est basée sur des caractéristiques de sol définies en termes d'horizons diagnostiques, propriétés diagnostiques et matériaux diagnostiques, qui doivent être, autant que possible, mesurables et observables sur le terrain. Les paramètres climatiques ne sont pas appliqués dans la classification des sols selon la WRB. Il est clair cependant que ces paramètres doivent être employés en combinaison avec les caractéristiques des sols pour interpréter la classification et non faire partie de la définition des sols. Ce faisant, la classification des sols reste insubordonnée à la disponibilité de données climatiques : le changement climatique ne peut donc la rendre obsolète. Dans la pratique, la classification selon la WRB comporte trois étapes successives décrites dans les paragraphes qui suivent (WRB, 2014).

❖ **Étape 1 : Identifier les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques**

Les directives pour la description des sols sont suivies de la description des sols et de leurs caractéristiques (FAO, 2006). Il est alors utile de dresser une liste des horizons, propriétés et matériaux diagnostiques observés (Annexe 1). Cette démarche permet sur le terrain, de faire une classification préliminaire du sol en se servant de toutes les caractéristiques observables ou facilement mesurables dans le sol et sur l'espace environnant. La classification définitive ne pourra se faire qu'avec les résultats d'analyses de laboratoire. Les procédures des analyses du sol sont suivies à cet effet pour la détermination des caractéristiques chimiques et physiques des sols (Van Reeuwijk, 2002).

Pour la classification, seuls les critères diagnostiques sont pertinents. Les valeurs numériques collectées sur le terrain ou au laboratoire sont à prendre telles quelles et ne peuvent être arrondies pour satisfaire aux valeurs seuil des critères diagnostiques. Une couche peut satisfaire aux critères de plus d'un horizon, propriété ou matériau diagnostique : on les considère alors comme chevauchants ou concomitants. Si un horizon diagnostique consiste en plusieurs sous-horizons, les moyennes n'étant pas admises, chacun d'entre eux doit satisfaire séparément aux critères diagnostiques (WRB, 2014).

❖ **Étape 2 : Attribuer le sol à un Groupe de sols de référence**

La combinaison obtenue d'horizons, propriétés et matériaux diagnostiques est mise en regard de la Clé WRB pour attribuer le sol aux Groupes de Sols de Référence (RSG) appropriés : c'est le premier niveau catégoriel comprenant 32 Groupes de sols de référence (Annexe 2). L'utilisateur doit suivre la Clé de manière systématique, commençant par le début et excluant un par un tous les RSG pour lesquels les exigences spécifiées ne sont pas remplies. Le sol appartient au premier RSG pour lequel il remplit tous les critères (WRB, 2014).

❖ **Étape 3 : Attribuer les qualificatifs au sol**

Les qualificatifs sont employés au second niveau de la classification WRB. Les qualificatifs utilisables dans un RSG particulier sont repris dans la Clé à la suite de ce RSG. Les qualificatifs principaux (les plus importants pour la caractérisation des sols d'un RSG particulier) sont listés par ordre d'importance tandis que, par convention, les qualificatifs supplémentaires n'ont d'autre ordre qu'alphabétique (WRB, 2014).

Ces qualificatifs sont listés et définis dans la Clé WRB. Il en existe deux types : les qualificatifs principaux et qualificatifs supplémentaires. Les premiers correspondent aux caractéristiques typiques du sol résultant du processus pédogénétique principal. Les seconds

différencient les sols selon des caractéristiques du sol résultant de tout processus pédogénétique secondaire ayant affecté de manière significative les caractéristiques primaires du sol telles que les caractéristiques du sol qui ont un effet significatif sur son utilisation.

Par convention, les qualificatifs principaux sont listés par ordre d'importance tandis que les qualificatifs supplémentaires n'ont pas d'autre ordre qu'alphabétique. Les qualificatifs principaux sont ajoutés devant le nom du RSG, sans parenthèses et sans virgules ; leur séquence progresse de droite à gauche, de sorte que le qualificatif le plus important se retrouve dans la position la plus proche du nom du RSG. Les qualificatifs supplémentaires sont placés entre parenthèses après le nom du RSG et sont séparés les uns des autres par des virgules ; leur séquence va de gauche à droite, le premier qualificatif selon l'alphabet étant le plus proche du nom du RSG (WRB, 2014).

I.1.2. Sols de Côte d'Ivoire selon la CPCS

En Côte d'Ivoire, diverses classes de sols ont été dénombrées. Cependant, les sols ferrallitiques et ferrugineux constituent plus de 90 pc de ces sols (Kassin, 2009).

I.1.2.1. Sols peu évolués à minéraux bruts

Pour mémoire, Aubert (1965) cite parmi les sols minéraux bruts, les amoncellements de blocs de cuirasse ferrugineuse où ce matériau constitue en quelque sorte une roche-mère secondaire sur laquelle la végétation devra se reconstituer et donner le départ à une nouvelle phase pédogénétique qui conduira à une dislocation et à une disparition de la cuirasse. Pour lui, les nappes caillouteuses d'origine granitique, doléritique ou schisteuse de régions où affleure le socle peuvent être considérées aussi comme des sols minéraux bruts ou des sols squelettiques. L'extension de ces sols minéraux bruts est extrêmement limitée dans les régions tropicales de la Côte d'Ivoire.

I.1.2.2. Sols hydromorphes

I.1.2.2.1. Sols hydromorphes peu évolués d'apport colluvial

Les sols peu évolués d'apport colluvial sont les sols du cordon littoral formés sur sables marins récents ou actuels, et qui ne couvrent que quelques centaines de mètres de large le long de la côte (Dabin *et al.*, 1960). Ces sols sont caractérisés essentiellement par un léger enrichissement superficiel organique sur 25 à 30 centimètres, et une grande homogénéité du profil au

point de vue textural (sable grossier), tout au moins dans les premiers mètres de sédiments. La nappe phréatique peut être localisée entre 7 et 8 m. Une tendance au lessivage se marque dans ces sols à mesure que l'on s'éloigne du rivage dans des zones moins élevées topographiquement et où la nappe phréatique est plus proche de la surface (Dabin *et al.*, 1960).

I.1.2.2.2. Sols hydromorphes peu évolués d'apport illuvial

Ce sont des sols dont les caractères sont dûs à une évolution dominée par l'effet d'un excès d'eau par suite d'un engorgement temporaire de surface, de profondeur ou d'ensemble par suite de la présence ou de la remontée d'une nappe phréatique (Aubert, 1965). La présence de l'eau est liée à des conditions topographiques basses et planes : zones à écoulement difficile (bas-fonds, fonds de vallées, dépressions lagunaires) ; zones inondables par les eaux de crues de fleuves ; zone où la nappe phréatique peut varier facilement (sables littoraux). L'hydromorphie s'exprime par la présence dans l'horizon situé juste en dessous de l'horizon humifère ou dans certains cas seulement dans les horizons de profondeur par des taches de réduction et réoxydation (taches grises et rouille) ou de redistribution d'oxydes de fer et de manganèse en milieu réducteur (teintes gris-bleuâtre). Suivant l'importance de l'accumulation organique, deux sous-classes de sols hydromorphes ont été distinguées : les sols hydromorphes organiques et les sols hydromorphes minéraux (Aubert, 1965).

I.1.2.3. Vertisols

Les vertisols sont, selon (Aubert, 1965), toujours argileux. Les argiles sont à majorité de type gonflant (de type 2/1). La différenciation des horizons d'un vertisol est essentiellement structurale et la couleur de ces horizons est presque uniformément gris-foncé à noire. Ces sols présentent toujours des fentes de dessiccation à la surface, dues à la sécheresse, et des faces de glissement en profondeur, témoignant du phénomène de mouvement dans la masse du profil. Aussi, sont-ils en général riches en calcium et magnésium et parfois en sodium. Ils peuvent présenter à la surface un microrelief ondulé appelé « gilgai » (Wilding & Tessier, 1988). Deux conditions sont donc nécessaires pour que se forment des vertisols : un pédoclimat saturé d'eau, suivi d'une saison très sèche et une roche-mère susceptible de fournir des argiles gonflantes, soit directement, soit par décomposition (cas des roches calcaires). Les vertisols sont caractérisés par une bonne fertilité liée à leurs caractéristiques physico-chimiques. En effet, ils ont un taux de saturation de l'ordre de 78,23 pc, une importante quantité de calcium dans le complexe absorbant, un pH entre 6 et 7 et une capacité d'échange cationique (CEC) de 23,06 cmol.kg⁻¹.

Ils ont une bonne réserve en eau. A noter le fort taux de fer libre (9,08 pc) traduisant l'importance de l'hydromorphie dans la dynamique des profils de ces sols. Ils sont aptes pour les cultures suivantes : le riz, le blé, l'haricot, le tabac, le maïs, le poivron, le melon, le chou, le piment, etc. Malgré sa bonne fertilité, les vertisols ont une contrainte agronomique majeure en relation avec leur texture argileuse et leurs fentes de retrait assez profondes (Wilding & Tessier, 1988).

I.1.2.4. Sols bruns tropicaux

Les sols bruns tropicaux ou terres brunes ou noires se développent sur des matériaux issus de roches basiques (dolérites et amphibolites), en position topographique de plateaux ou de pentes. La fraction argileuse de ces sols est composée non seulement de kaolinite mais aussi d'illite et de montmorillonite, ce qui se traduit analytiquement par un rapport silice/alumine >2 . La présence de montmorillonite est due en partie à des conditions d'hydromorphie temporaire d'origine pétrographique ou de position topographique (Perraud, 1971).

Au plan morphologique, il est donné de constater que les sols bruns tropicaux sont souvent peu profonds (50 cm à 1 m.) et présentent fréquemment des affleurements ou des fragments de roche saine dans leur horizon superficiel (Aubert, 1965). On y distingue un horizon argilo-humifère brun foncé ou noir, à structure grumeleuse typique, parfois en horizon B à tendance polyédrique fine, épais de 20 à 50 cm. Cet horizon forme la couche superficielle du sol. Par ailleurs, un horizon de teinte plus claire, brun-jaune foncé, ou gris-verdâtre, à structure nettement prismatique, ou grossièrement polyédrique, forme une transition avec la zone d'altération de la roche (faciès de décomposition en boules). Dans les régions de savanes, la présence de nodules calcaires est fréquente dans l'ensemble du profil pour les terres brunes ou noires tandis que dans les régions forestières, ces nodules sont plus rares et localisés au-dessus de l'horizon d'altération de la roche.

Concernant les caractéristiques physico-chimiques, les sols bruns tropicaux saturés en surface sont très faiblement désaturés en profondeur : la somme des bases très élevée 20 à 40 méq/100 g et le pH est neutre ou faiblement acide. L'horizon de surface brun foncé est très riche en matière organique et en azote avec un rapport de C/N < 10 ; le rapport acides fulviques/acides humiques < 1 . La somme des bases échangeables très élevée et le taux d'argile supérieur à 30 pc expliquent le développement exceptionnel de la structure grumeleuse moyenne à nuciforme et la cohésion assez forte des agrégats. Les réserves en eau sont

importantes mais si l'eau utile est élevée (10 - 15 pc), le point de flétrissement est également très élevé, comprise entre 20 à 30 pc. Les fortes teneurs en Ca et Mg sont une des caractéristiques essentielles de ces sols (Dabin *et al.*, 1960).

Au niveau géographique, les sols bruns tropicaux sont localisés en gisements intra zone sur les affleurements de roches vertes (amphibolites) et de dolérites, dans les chaînes métamorphiques birrimiennes, à partir de la limite du sud des ferrisols en direction des régions soudaniennes. En Côte d'Ivoire, ces sols sont situés en position de sommet de collines, de pente et de bas de pente sur modelé accidenté dans les massifs de roches basiques (Perraud, 1971). En zone forestière, ils sont limités à quelques collines en juxtaposition avec des sols ferrallitiques moyennement et faiblement désaturés. Toutefois, dans la chaîne de la Haute-Comoé ces sols prennent une extension beaucoup plus importante. Cependant en savane, ils occupent les chaînes de collines du complexe volcano sédimentaire en juxtaposition avec des sols ferrallitiques faiblement désaturés, le plus souvent indurés (Lévêque, 1972).

Les caractères de fertilité de ces sols sont très élevés. Ainsi, en forêt, le seul facteur limitant est la topographie qui conditionne à la fois la profondeur du sol et la possibilité de sa mise en culture. L'hydromorphie est rarement un facteur limitant. Pour des cultures autres que le cacaoyer ; cultures vivrières en particulier ; il est nécessaire de protéger le sol pour éviter la dessiccation des horizons et la rupture des racines. Par ailleurs, en savane seuls les sols bruns en position basse et sur pente faible peuvent être utilisés pour la culture du coton, des cultures vivrières, maraîchères et du tabac. Le facteur limitant est l'eau utile pour les plantes (Aubert 1965).

I.1.2.5. Sols ferrugineux

La ferrugination est une évolution dans laquelle le lessivage débarrasse les profils supérieurs des sols ferrallitiques des argiles sensibles au lessivage (montmorillonite) ne laissant sur place que celles qui sont peu sensibles, c'est-à-dire, peu chargées (kaolinite). La topographie plane étant la règle pour ces sols. L'hydromorphie y est presque toujours associée avec pour résultat une mobilité très nette du fer. Leurs minéraux argileux sont la kaolinite associée à des proportions variables de minéraux de type 2 :1. Ces sols se forment essentiellement dans les régions où règne une très longue saison sèche et sur un pédoclimax de savane à graminées. Ils sont localisés au Nord-Est de la Côte d'Ivoire, au-delà de la ligne Bondoukou-Dabakala-Kong.

Ils sont répartis en deux groupes : ces sols ferrugineux peu ou pas lessivés et ces sols ferrugineux lessivés (Dabin & Maignien, 1979 ; Keita, 2000).

Ces sols sont riches en fer, en argiles (kaolinite), mais pratiquement, voire totalement dépourvus d'alumine libre. En vérité, les sols ferrugineux sont une sous-classe des sols fersialitiques (Yao-Kouamé, 2008).

Au plan morphologique, les sols ferrugineux tropicaux regroupent des sols profonds (> 2 m), dont le profil est différencié en horizon A humifère d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, à structure moyennement développée à tendance grumelo-particulaire et, en horizon E ou A₂ à structure faiblement développée, peu teinté par de l'humus, mais lessivé. L'horizon B apparaît vers 75 cm avec une accumulation argileuse parfois épaisse de près d'1 m et une accumulation ferrugineuse avec apparition de concrétions. Cet horizon B est susceptible de durcir au contact de l'air, du fait de son enrichissement en argile et en fer. Ensuite, vient l'horizon C qui est un matériau arénacé (Dabin & Maignien, 1979 ; Keita, 2000).

I.1.2.6. Sols ferrallitiques

La ferrallitisation est une évolution dans laquelle tous les matériaux primaires du sol, hormis le quartz, sont altérés. Seule la kaolinite associée à l'alumine résiduelle (gibbsite) et en mélange avec les oxydes de fer, se rencontrent dans le profil. Parfois, le fer rendu mobile peut participer à la fabrication de carapaces et de cuirasses (Gigou, 1987). Les carapaces et les cuirasses ferrallitiques sont des indurations de sesquioxydes de fer qui cristallisent sous l'effet des températures élevées. On parle de carapaces quand ces indurations peuvent encore être brisées à la pioche et de cuirasses quand les dalles ne peuvent plus être brisées par des outils maniés par la seule force humaine (Keita, 2000).

Au plan morphologique, les sols ferrallitiques sont caractérisés par la présence de plusieurs horizons dont l'horizon supérieur qui a une couleur plus sombre due à la présence de matières organiques en quantités significatives ; la structure en agrégats de cette couche est arrondie : il s'agit d'un horizon A, organo-minéral. L'horizon sous-jacent a une couleur plus claire due à son appauvrissement en particules fines argileuses accompagnées d'oxyde de fer : c'est un horizon lessivé E. Quant au troisième horizon, sa couleur plus rouge traduit un enrichissement en particules fines argileuses, accompagnées d'oxyde de fer, venant de l'horizon sus-jacent. Sa structure en agrégats est anguleuse : c'est un horizon d'accumulation B_t. Cet

horizon surmonte un quatrième horizon qui a une couleur très claire : c'est l'horizon d'altération de la roche-mère (granito-gneiss) ou horizon C (Jagoret & Jadin, 1993).

En comparant leur morphologie, il ressort que les sols ferrallitiques peuvent être mis en parallèle avec les sols ferrugineux qui n'en diffèrent que par l'évolution de la fraction argileuse. Cette évolution est plus poussée pour les sols ferrallitiques, ce qui y conduit à une dominance de la kaolinite, minéral argileux de type 1 : 1.

Les principales sous-classes des sols ferrallitiques de la Côte d'Ivoire sont (Dabin *et al.*, 1960) :

- les sols ferrallitiques faiblement désaturés caractérisés par une teneur en bases échangeables variant de 2 à 8 méq pour 100 g, un degré de saturation en base de 40 à 70 pc qui, parfois, monte jusqu'à près de 80 pc et un pH de 5,5 à 6,5 ;
- les sols ferrallitiques moyennement désaturés qui ont des teneurs en bases échangeables variant de 1 à 3 méq pour 100 g ; un degré de saturation en base de 20 à 40 pc et un pH de 4,5 à 6. Ils se répartissent en deux zones, l'une à l'Ouest d'une ligne Duékoué-Soubre-San-Pédro, l'autre à l'Est d'une ligne Ayaou-Azaguié-Dabou ;
- les sols ferrallitiques fortement désaturés, qui, le plus souvent sont très profonds avec des teneurs en bases échangeables < 1 méq pour 100g ; un degré de saturation < 20 pc et un pH < 5,5. Ces sols présentent un horizon E textural qui ne représente que la partie supérieure de l'horizon B du sol. La matière organique y est moyennement ou peu décomposée, formant souvent des complexes avec les oxydes métalliques. Ils correspondent typiquement au climat équatorial et sont connus le long du littoral de la côte occidentale d'Afrique. La couleur de l'horizon B est généralement jaune-orangé. On les rencontre en général dans la Basse Côte d'Ivoire.

Au niveau du groupe, sont différenciés les divers sols remaniés, rajeunis, appauvris et typiques. Par ailleurs, les processus évolutifs secondaires tels que l'accumulation de matières organiques, le lessivage, l'induration, la surévolution podzolique et l'hydromorphie sont notés au niveau du sous-groupe (Aubert & Segalen, 1966).

I.2. CAFÉIER ET CACAOYER ET LEURS SOLS DE CULTURE

Le déclin de la productivité du café qui s'est fait remarquer depuis l'ère coloniale s'expliquait facilement par le fait que les plantations de café européennes étaient souvent établies dans un esprit pionnier, avec une connaissance insuffisante des conditions locales, notamment des données pédologiques. Concernant le cacao, les travaux de Koko *et al.* (2006) ont montré que le recul de la production est en relation avec la dégradation précoce des cacaoyers liée à la connaissance insuffisante des caractères morfo-pédologiques des surfaces exploitées. Il y a donc un intérêt à connaître les exigences édaphiques de ces deux cultures et aussi plusieurs autres de leurs caractéristiques générales y compris leurs impacts sur la fertilité des sols. Ce paragraphe est aussi le lieu de décrire les effets du changement climatique sur la fertilité des sols et les options de restauration de la fertilité des sols dégradés.

I.2.1. Caféier

I.2.1.1. Histoire et répartition géographique

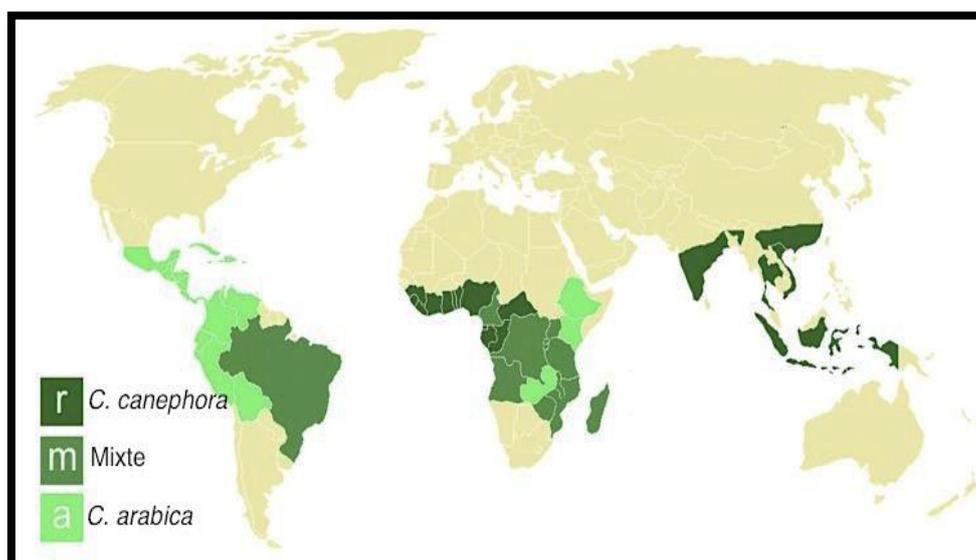
Haler (2013), dans sa revue bibliographique réalisée sur le caféier, mentionne l'existence de deux espèces de caféiers qui sont cultivés : *Coffea arabica* (Linné) et *Coffea canephora* (Pierre). L'espèce *arabica* est la plus ancienne et elle est la plus cultivée. Le *robusta* fut découvert plus tardivement, vers le 19^{ème} siècle. Aussi, l'auteur souligne-t-il qu'à l'origine, le café poussait à l'état sauvage en Ethiopie, berceau du *Coffea arabica*. La diffusion de l'implantation du café commença par le passage de la mer Rouge : le café qui était cueilli en Ethiopie fut transplanté au Yémen où la culture et les plantations du café commencèrent vers le 12^{ème} siècle. L'Arabie fut le pays qui vit naître le véritable essor du café. À partir du 15^{ème} siècle, la consommation de café se répand en Orient dans le monde musulman comme une épidémie. Au 16^{ème} siècle, le café est déjà connu en Egypte, Syrie, Turquie et en Iran.

Selon le même auteur, le café fit son apparition en Europe à partir du milieu du 17^{ème} siècle. Au commerce ancestral du café du Yémen se substituèrent peu à peu les grandes compagnies maritimes européennes. En 1600, fut fondée à Londres, la East India Company qui envoya en premier, des navires vers les Indes. Cependant, jalousement gardés et protégés par le Yémen qui les rendaient stériles par ébouillement avant leur commercialisation, les grains de café ne pouvaient pas être replantés dans un autre pays. En 1616, le marchand hollandais décida alors de voler quelques grains à Moka qui furent rapportés au jardin botanique d'Amsterdam où ils devaient prospérer pendant 40 ans. Ce n'est donc qu'en 1658, moins d'un

demi-siècle plus tard que les Hollandais décidèrent de cultiver le café dans leurs colonies à Ceylan puis dans le sud de l'Inde.

Haler (2013), poursuit sa revue bibliographique sur le caféier en rapportant que :

- en 1696, les Hollandais exportent leurs plantations d'Inde jusqu'à Batavia où commença alors la culture dans l'archipel Indonésien. Les plantations se développent grâce au travail de paysans réduits en esclaves par ceux-ci ;
- en 1710, les plants sont envoyés à Surinam, une colonie hollandaise située sur le continent américain et étroitement gardés jusqu'en 1719 où des Français vinrent dérober des plants qu'ils rapportèrent à Cayenne en Guyane où ils furent plantés avec succès. Le café sera ensuite acclimaté dans les Antilles et dans l'île Bourbon, transporté par la Compagnie des Indes ;
- en 1722, l'officier portugais, Francisco de Melo Plaheta fit entrer les plants de caféiers au Portugal. Ceux-ci furent à l'origine des plantations du café brésilien. A l'image des cultures Hollandaises, des milliers d'esclaves venus d'Afrique participèrent à cette caféiculture. Ce sont également les portugais qui plus tard, dans l'actuel Angola, découvriront une autre variété d'*Arabica* qu'ils mettront en culture. Plus haute et plus robuste, ils la baptisèrent *Coffea canephora* qui allait ensuite être connu sous le nom de sa variété principale : le *Robusta* ;
- entre 1650 et 1750, tout le café consommé en Arabie et en Europe provient principalement du Yémen : les marchands anglais, français ou hollandais viennent renforcer l'engouement pour Moka en y effectuant leur approvisionnement. En France, c'est par le port de Marseille que transite le café avant d'être importé dans les différents pays d'Europe (Italie, Suisse, pays de l'Europe du Nord). A la fin du 18^{ème} siècle, le café est cultivé en Colombie, en Amérique centrale, en Jamaïque ou encore aux Philippines grâce aux puissances coloniales ;
- par le biais de missionnaires et autres voyageurs, le caféier est cultivé dans différentes zones du monde (Figure1). Dans ces zones de production, certains pays se distinguent par leurs fortes productions, faisant d'eux les principaux pays producteurs du café (Tableau I).



Source : Haler (2013).

Figure 1 : Répartition géographique des différentes zones de production du café dans le monde (2007)

Tableau I : Principaux pays producteurs de café (2007)

Pays	Production d'Arabica (en milliers de sacs de 60 kg)	Production de Robusta (en milliers de sacs de 60 kg)	Production totale (en milliers de sacs de 60 kg)
Brésil	41800	12700	54500
Vietnam	575	18150	18725
Colombie	9500	0	9500
Indonésie	1375	7950	9325
Inde	1500	3600	5100
Ethiopie	4400	0	4400
Honduras	4000	0	4000
Pérou	4000	0	4000
Guatemala	3900	10	3910
Mexique	3500	200	3700

Source : Haler (2013).

Le Brésil détient à lui seul 15 à 20 pc de la production mondiale de café et est le plus grand producteur au monde. C'est majoritairement une production de *Coffea arabica*. Le deuxième pays producteur, le Vietnam produit quant à lui en grande partie *Coffea canephora*.

Au début du XX^{ème} siècle, l'Amérique du sud produisait 90 pc du café mondial, ceci a changé depuis lors. L'Afrique ainsi que l'Asie contribuent également à la production du café. Dans les pays Asiatiques, c'est la production de *Coffea canephora* qui prédomine, alors qu'en Amérique du Sud c'est le *Coffea arabica*. Cependant, en Afrique, la production est mixte (Haler, 2013).

Depuis ces débuts en Orient, le café est devenu une des boissons les plus consommées au monde. Certains pays se distinguent par leurs grandes consommations comme cela figure dans le tableau II. Les chiffres très élevés pour le Luxembourg peuvent en partie être expliqués par le fait que la TVA sur le café est moins importante que dans les pays limitrophes, de ce fait, de nombreux frontaliers achètent leur café et font monter le taux de la consommation en café par habitant et par an dans ce pays.

Tableau II : Classement des pays selon leur consommation de café par habitant en 2014

Pays	Consommation de café par habitant en kg par an
Luxembourg	28,44
Finlande	12,12
Norvège	9,21
Suisse	7,99
Suède	7,89

Source : Bonnin (2016).

I.2.1.2. Position systématique

La classification APG III du caféier est le suivant :

Règne	: Plantae
Sous Règne	: Viridaeplantae
Classe	: Equisetopsida
Clade	: Spermatophyta
Ordre	: Gentianales
Famille	: Rubiaceae
Genre	: <i>Coffea</i>
Espèce	: <i>arabica</i> ou <i>canephora</i> .

Selon Mwangamwanga *et al.* (2013) et Dany (2014), il existe aujourd'hui environ 80 espèces différentes dans le genre *Coffea*. Seules deux espèces sont vraiment intéressantes pour la production de café. Il s'agit de *Coffea arabica* (Linné) qui donne du café arabica et de *Coffea canephora* (Pierre) qui donne du café robusta (Davis *et al.*, 2006 ; Atila, 2010).

I.2.1.3. Morphologie et biologie

Le caféier est un arbuste dont l'espérance de vie est d'environ cinquante années et sa pleine production ou vie utile s'étale sur une trentaine d'années. Cette espérance de vie se subdivise en trois grandes périodes : celle de la croissance, qui se termine avec l'âge adulte et dure de 4 à 7 ans ; celle de la productivité, qui dure de 15 à 25 ans, voire davantage et enfin celle du déclin. La taille du caféier varie entre trois et douze mètres, mais dans les plantations, les caféiers sont taillés de façon à ne pas dépasser 2 à 3 m pour faciliter la cueillette (Pinard, 2007). Le caféier (Figure 2) présente des caractéristiques morphologiques variant selon les espèces et les variétés (Coste, 1989 ; Pochet & Flémal, 2001).



Figure 2 : Morphologie du Caféier *Robusta sp*
Source : Jomonis (2015)

I.2.1.3.1. Système racinaire

L'appareil racinaire du caféier comprend, un pivot, robuste et court (40 à 60 cm), d'où partent souvent des racines axiales pouvant atteindre 1,20 m, s'enfonçant verticalement en profondeur. Cet ensemble de racines assure d'une part l'alimentation hydrique et d'autre part, engendrent des ramifications latérales superficielles, prolongées de nombreuses radicelles et

poils absorbants, qui explorent la couche supérieure du sol pour assurer la nutrition minérale (Champéroux, 1991).

I.2.1.3.2. Troncs et branches

Le tronc des caféiers peut être unique (unicaule) ou multiple (multicaule) ; dans ce cas, on distingue : la base du tronc ou souche et les tiges charpentières ou gourmands faites de rameaux verticaux, orthotropes (Champéroux, 1991).

Les branches ou rameaux primaires, sont longues et grêles, plus ou moins horizontales (plagiotropes), opposées deux par deux. Elles sont parcourues de rameaux secondaires également opposés deux par deux suivant un plan horizontal. Parfois, les rameaux secondaires donnent lieu à des ramifications de troisième ordre (rameaux tertiaires), toujours opposés deux à deux et qui se développent en même temps que les tiges charpentières pendant la saison des pluies (Coste, 1989 ; Champéroux, 1991). Les ramifications secondaires et tertiaires, qui sont renouvelables, constituent le support de la production. Le bois du caféier est très dur, l'écorce est grisâtre, lisse ou légèrement craquelée (Dany, 2014).

I.2.1.3.3. Système foliaire

Les feuilles des caféiers sont entières, de forme elliptique ou ovale, à bord plus ou moins ondulé, avec un pétiole court et sont de couleur vert foncé brillant (Mahuka, 2011). Elles sont persistantes, coriaces et opposées le long du tronc et des gourmands suivant un même plan. Le limbe est pourvu de neuf à onze nervures, de forme, de texture et de couleur variables selon l'espèce et la variété (Cambrony, 2001). La foliation se poursuit sur les rameaux au fur et à mesure du développement des entrenœuds. La chute des feuilles est permanente, mais plus abondante en saison sèche (Dany, 2014).

I.2.1.3.4. Système floral

Le café fleurit pour la première fois vers l'âge de trois ans, parfois même plutôt. Toutefois, vers l'âge de cinq ans, la floraison atteint sa pleine intensité. L'inflorescence, portée par les rameaux d'un an, est située surtout sur les ramifications primaires pour la variété *coffea canephora* et sur les ramifications secondaires pour *coffea arabica* (Bonnin, 2016).

Les fleurs des caféiers (Figure 3 A), de couleur blanche à rose sont très odoriférantes (à odeur de jasmin) et petites. Elles sont localisées aux assaillles foliaires des rameaux

plagiotropes, constituant ainsi des verticilles, ou glomérules floraux, de huit à onze fleurs. Un bouton floral ces ramuscules des inflorescences. Chaque fleur (Figure 3 B) est formée par un calice réduit dont les lobes sont limités à des échancrures, une corolle, un ovaire et des anthères linéaires (Pochet & Fleama, 2001).

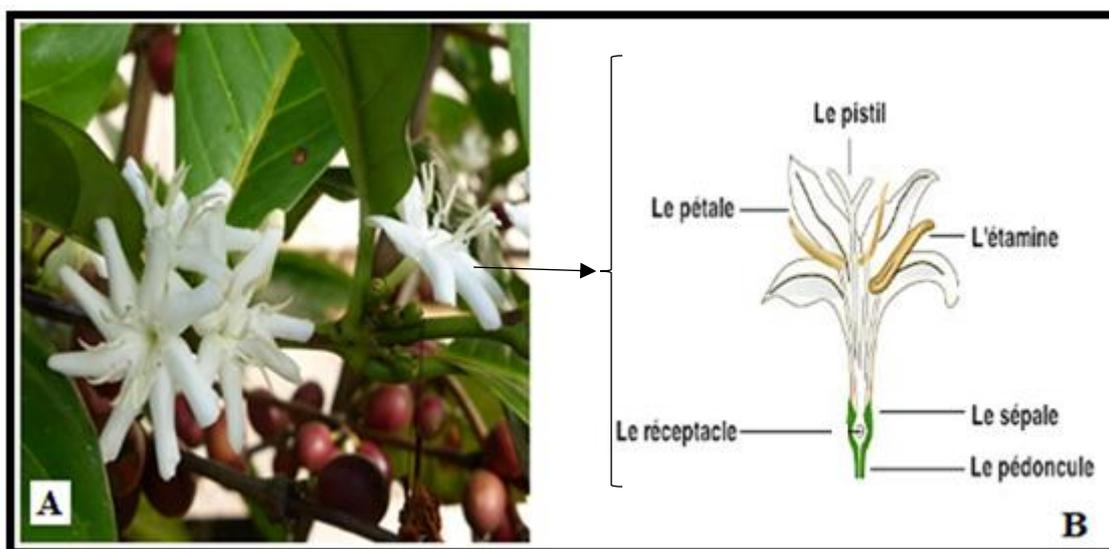


Figure 3 : Fleurs du caféier

A : Photographie de fleurs de caféier ; B : Représentation schématique de la fleur de caféier.

Source : Bonnin (2016).

À maturité, les fleurs fécondées donnent des fruits (Figure 4) contenant une ou deux graines. Les fruits sont groupés en glomérules comme les fleurs dont ils sont issus. Le fruit est botaniquement une drupe, mais la faible importance de l'endocarpe le fait souvent considérer comme une baie. De forme ovoïde ou subglobuleuse, rouge à maturité (10 à 15 mm sur 17 à 18 mm de hauteur), on l'appelle communément cerise. Il est constitué d'un exocarpe coloré (peau), d'un mésocarpe charnu jaunâtre et sucré (pulpe) et de deux graines accolées (Cambrony, 1982).

Chaque graine est protégée par deux enveloppes : la première mince et scléreuse, qui est l'endocarpe et que l'on appelle parche, la seconde, qui est le très fin tégument séminal (périsperme) est appelé pellicule argentée. La graine, d'un gris variable selon les variétés, est appelée fève en langage commercial. Elle est constituée par un albumen corné, à surface lisse, dont la face plane est creusée par un sillon profond plus ou moins rectiligne et d'un petit embryon comportant une radicule et deux cotylédons (Champéroux, 1991).



Figure 4 : Fruits et feuilles (A) et représentation schématique de la coupe longitudinale du fruit du caféier (B)

Source : Bonnin (2016).

La multiplication chez les caféiers se fait par deux modes : sexué et asexué. Le mode sexué ou propagation générative par l'utilisation des semences (graines), concerne principalement *Coffea arabica* du fait de son auto fertilité ou pollinisation directe. Cette autogamie lui permet de mieux conserver ses caractéristiques d'une génération à l'autre (Pochet & Fleama, 2001).

La multiplication asexuée ou propagation végétative par bouturage est propre à la variété *Coffea robusta* (Champéroux, 1991). Cette variété étant auto stérile (allogame) ou ayant une pollinisation croisée, est généralement propagée par voie végétative car la graine ne transmet qu'une partie des qualités de la plante mère. Par contre, l'usage des boutures de clones sélectionnés donne les meilleurs résultats, aussi bien pour les rendements que pour la précocité et les qualités gustatives.

I.2.1.4. Classification phylogénétique

Parmi les espèces du genre *Coffea* connues à ce jour, toutes sont diploïdes ($2n = 2x = 22$) à l'exception de l'espèce *Coffea arabica* qui est tétraploïde ($2n = 4x = 44$) (Bertrand *et al.*, 2012). L'analyse des caryotypes des onze chromosomes du génome de caféier rapportée par Sybenga (1959), met en évidence l'existence d'un génome de base composé de onze chromosomes ($n=11$) présentant une taille moyenne réduite (1 à 3 μm) et peu variable. En revanche la quantité d'ADN nucléaire est très variable entre les différentes espèces de caféier, avec des valeurs comprises entre 0,95 et 1,78 pg par noyau. *Coffea arabica* avec le double de

chromosomes présente 2,61 pg d'ADN (Cros *et al.*, 1995), pour un nombre de base approximatif de 950 Mb (Anthony & Lashermes, 2005). Toutefois, cette classification permet de dénombrer l'existence d'au moins cinq (5) groupes phylogénétiques relativement peu différenciés. Ces groupes recouvrent les trois (3) ensembles biogéographiques qui sont : la zone guinéo-congolaise (2 groupes) ; l'Afrique de l'Est (1 groupe) ; le Madagascar, l'archipel des Comores et les îles Mascareignes (1 groupe) (Lashermes *et al.*, 1997).

L'espèce *Coffea arabica* diffère des espèces diploïdes par son autogamie. En revanche, les espèces diploïdes sont allogames du fait d'un système d'incompatibilité génétique. La diversité génétique des espèces diploïdes représente ainsi un intérêt agronomique majeur (Berthaud & Charrier, 1988). Notamment, l'espèce *Coffea canephora* dont les cultivars se caractérisent par une bonne adaptation à basse altitude, une importante vigueur, une productivité élevée et la résistance vis à vis de divers agents pathogènes du caféier (Cambrony, 1982).

I.2.1.5. Facteurs climatiques de la caféiculture

La convenance d'un site donné à une bonne production caféière est conditionnée par l'expression de certaines variables fondamentales de l'environnement : la température, la pluviométrie, l'éclairement et à moindre degré la ventilation. Par ailleurs, toutes autres considérations géographiques (latitude, altitude) ou topographiques (exposition, pente) n'interfèrent dans la vie des caféiers que lorsqu'elles affectent l'expression de ces quatre variables de base (Cambrony, 1982).

I.2.1.5.1. Température

D'une manière générale, la température est un facteur limitant pour la survie du caféier car aucune espèce ne résiste longtemps à une température avoisinante 0°C (Ayi, 2017). Cependant, la température optimale pour la culture du caféier est comprise entre 18° et 25°C avec des limites fixées à 15° et 30°C (Cambrony, 1982), ce qui s'apparente aux zones intertropicales. *Coffea arabica* est le plus tolérant, supportant sans dégâts des températures allant jusqu'à -2°C pendant aux plus six heures, par contre *Coffea canephora* en est sensible. Les effets dûs aux excès de température se manifestent par le nanisme, la décoloration foliaire, la mort des rameaux, même de la tige et aussi par la diminution de la production des plants de café (Davis *et al.*, 2012).

I.2.1.5.2. Pluviométrie

Tout comme la température, la pluviométrie est aussi un facteur limitant majeur pour la caféiculture. Les hauteurs d'eau annuelle de 1200 à 2000 mm constituent des limites moyennes favorables, en dessous de 800 mm pour *Coffea arabica* et de 1000 mm pour *Coffea canephora* (Cambrony, 1982). Selon ce même auteur, les caféiers s'accoutument mieux à des excès de précipitations si les conditions topographiques et physiques du sol permettent le drainage (Cambrony, 1982).

I.2.1.5.3. Eclairement

Le caféier est une plante naturellement héliophile car l'éclairement joue un rôle important dans la fructification. Pochet & Flémal (2001) ont vérifié expérimentalement qu'au niveau de la feuille, le rendement de la photosynthèse était maximum à la luminosité réduite (entre 10 pc et 60 pc de la pleine insolation) et faible à grande lumière par la fermeture des stomates.

I.2.1.5.4. Ventilation

Une très légère agitation de l'air favorise les échanges gazeux au niveau des feuilles. Les vents forts, en tornades ou cyclones sont nuisibles aux caféiers, car ils leurs causent des dégâts mécaniques tels que la défoliation, le bris des troncs et des branches, le déchaussement des arbustes en sol léger. Cependant, les vents faibles mais permanents (alizés, brise de mer ou brise de terre, vents secs et chauds) accentuent les inconvénients physiologiques (évapotranspiration exagérée des rameaux, flétrissure précoce des pièces florales ou des fruits proches de leur maturation) (Coste, 1989).

I.2.1.6. Exigences pédologiques

Tercinier (1958) a identifié les caractéristiques communes des véritables terres à caféiers à partir d'une étude faite en Nouvelle-Calédonie. Il s'agit, des sols formés ou dérivés par alluvionnement de roches dont les compositions minéralogique et chimique doivent être sensiblement neutres ou modérément alcalines (pierre bleue : Flysch et Grauwackes ; schistes durs de montagne : Pyllades et Schistes noirs) et des sols jeunes et non lessivés, contenant souvent dans leur masse des débris de roche facilement reconnaissables.

Les sols miniers (sur Péridotites et Serpentes), les sols sur caillasse siliceuse (Phtanites), sur grès et schistes argileux assez tendres, contenant de nombreux petits graviers durs et anguleux de quartz blanc ou rosâtre (Mudstones ou Pelites ainsi que certains Sericitoschistes), ne conviennent pas en général à la caféiculture. Il en sera de même des alluvions dérivant des sols miniers, sauf, si elles sont convenablement amendées. Les sols vieux et évolués, quelle que soit la nature de la roche à partir de laquelle ils se sont formés, ne conviennent pas non plus ou conviennent mal à la caféiculture (Petithuguenin, 1998).

Cependant, selon Atila (2010), les caféiers font preuve d'une très grande plasticité et n'ont donc pas d'exigences bien définies pour ce qui est de la nature des sols. Ainsi, les caféiers sont cultivés sur une grande variété de sols dont les qualités de fertilité peuvent d'ailleurs être modifiées par des techniques culturales appropriées (fertilisation, irrigation). Toutefois, le caféier requiert certains caractères physiques et chimiques du sol pour sa bonne croissance (Cambrony, 2001).

La structure, la texture, la profondeur (idéalement supérieure à 1,2 m au-dessus de tout obstacle : cuirasse, nappe phréatique, roche-mère) et la capacité hydrique (pouvoir de rétention en eau) du sol ont une importance originelle supérieure à sa fertilité chimique. Autrement dit, un sol propice à la caféiculture doit être : profond, de bonne structure, de bonne texture, bien drainé, et avoir un bilan hydrique favorable (Harorimana *et al.*, 2007).

La texture et la structure sont deux facteurs déterminants de la capacité à retenir l'eau, de l'installation et du développement du système racinaire. Les sols profonds permettent le développement des racines et l'exploration d'un volume de terre plus important par celles-ci, alors que les sols à faible profondeur (présence d'un horizon rocheux non altéré ou d'une compacité excessive située à faible profondeur) empêchent le développement normal du pivot et limite ainsi l'installation du système racinaire aux couches superficielles du sol (Pochet & Flémal, 2001). On retiendra donc que la texture du sol et sa profondeur ont une grande importance dans la culture du caféier, car les sols profonds, légèrement inclinés et à texture franche avec du sable, des limons, de l'argile, des alluvions (texture sableuse ; argilo-sablonneuse ; limono-argilo-sableuse etc.) et d'origine volcanique conviennent mieux à la caféiculture (Harorimana *et al.*, 2007). Les travaux de Wairegi *et al.* (2014) révèlent qu'en Ouganda, la culture du café est pratiquée sur des sols ferrallitiques fortement dégradés et à faible fertilité, d'une texture limono-argilo- sableuse, argilo-sableuse et argileuse. Par ailleurs,

les sols compacts et peu profonds ainsi que les sols légers et perméables très peu filtrants rendent les caféiers sujets à la sécheresse malgré la fertilité et la disponibilité en eau du sol.

Quant aux caractères chimiques, pour Wairegi *et al.* (2014), les sols dont les caractéristiques physiques (texture, profondeur) conviennent à la culture du caféier, doivent être suffisamment pourvu en matière organique (humus) et en nutriments, notamment en carbone organique, azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium. Ainsi, les valeurs idéales des paramètres chimiques des sols favorables à la caféiculture sont présentées dans le tableau III.

Tableau III : Caractéristiques chimiques idéales du sol pour la caféiculture

Paramètres	Unités	Valeurs
pHeau		> 5
Matière organique	pc	> 3
Carbone organique du sol	pc	> 1,7
Azote total	pc	> 0,15
Phosphore disponible	g.kg ⁻¹	> 15
Potassium échangeable	cmol.kg ⁻¹	> 0,3
Calcium échangeable	cmol.kg ⁻¹	> 2
Magnésium échangeable	cmol.kg ⁻¹	> 2

Source : Wairegi *et al.* (2014).

I.2.2. Cacaoyer

I.2.2.1. Origine et répartition géographique

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) est un arbuste tropical à feuilles persistantes appartenant au genre *Theobroma* et à la famille des Malvaceae (Alverson *et al.*, 1999 ; Pinheiro *et al.*, 2011). Il est l'une des espèces cultivées à des fins commerciales (Deheuvels, 2011). Il est originaire du bassin de l'Amazonie en Amérique du sud où il se développe spontanément (Aké-Assi, 2002). Selon Dublin (1972), les cacaoyers cultivés se répartissent en trois grandes variétés (Figure 5) : les Forastero, les Criollo et les Trinitario.

La variété Forastero, ou cacao "étranger" est originaire du bassin de l'Amazonie. Le Forastero serait le premier cacao apparu sur terre bien avant la naissance de l'humanité. Ses graines auraient été transportées au cours des âges depuis l'Amazonie, jusqu'au Mexique et, durant ce voyage, des mutations seraient intervenues pour transformer le Forastero en Criollo.



Figure 5 : Variétés morpho-géographiques de cacaoyers cultivés dans le monde

A: *Criollo*; B: *Forastero*; C: *Trinitario*

Source : Kouadio (2022).

La variété Criollo, est connue et cultivée par les Olmèques, les Toltèques et les Mayas. Elle est présente du Mexique jusqu'en Amérique centrale.

Le troisième type de cacao, identifié sur l'île de Trinidad, dont il a tiré son nom, est le Trinitario. C'est un hybride issu du Forastero et du Criollo, qui peut avoir des caractéristiques plus proches de l'un des deux parents. Le berceau ethnobotanique du cacaoyer est situé au Mexique. Ce sont les colons espagnols qui ont propagé sa culture en Amérique latine, puis en Asie. Vers 1670, les Espagnols introduisent le Criollo dans l'île de Java (Micheli, 2009).

L'histoire de la cacaoculture est liée à l'histoire de l'expansion coloniale et c'est ainsi qu'au XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}, on a assisté, sous l'influence des Hollandais, à une redistribution du cacao dans toutes les îles du Sud-Est Asiatique. À la fin du XIX^{ème} siècle, les Portugais introduisent le cacao en Afrique, via les îles de Sao Tomé et Príncipe. La culture des Forastero s'étend aujourd'hui du Ghana à la Côte d'Ivoire, accompagnée de Trinitario au Cameroun et au Nigéria (Verlière, 1981). Les Anglais, à partir de Ceylan, introduisent le cacao sur l'île de Madagascar. C'est vers 1890 que fut introduit le cacao en Côte d'Ivoire sur les bords de la Comoé, à partir du Ghana, dans la région d'Aboisso. Le désintérêt des autochtones pour cette nouvelle culture avait conduit le colon à la rendre obligatoire (Mossu, 1990).

Le cacaoyer est cultivé dans diverses régions du monde (Figure 6), dont les principaux producteurs (Figure 7), pour l'Afrique sont : la Côte d'Ivoire, premier producteur avec 37,5pc de la production mondiale, ensuite le Ghana, avec 18pc, le Nigéria, avec 6,5% et le Cameroun, avec 6pc. En Asie du Sud-Est, le principal producteur de cacao est l'Indonésie avec 11pc de la production mondiale. En revanche, l'Amérique latine comprend de petits producteurs qui sont

: le Brésil (5 pc de tonnage mondial) et l'Équateur (5 pc du tonnage mondial). L'ensemble des autres pays producteurs dispose de 13pc (FAOSTAT, 2020).

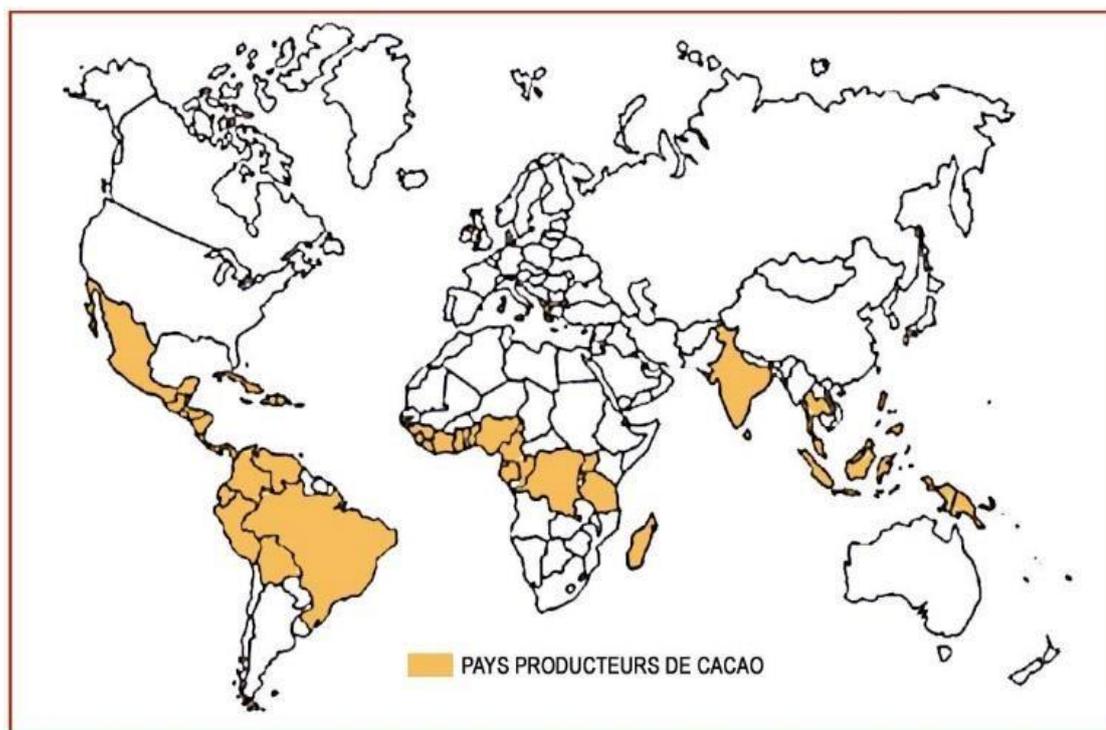


Figure 6 : Régions de production cacaoyère dans le monde en 2011

Source : ICCO (2012).

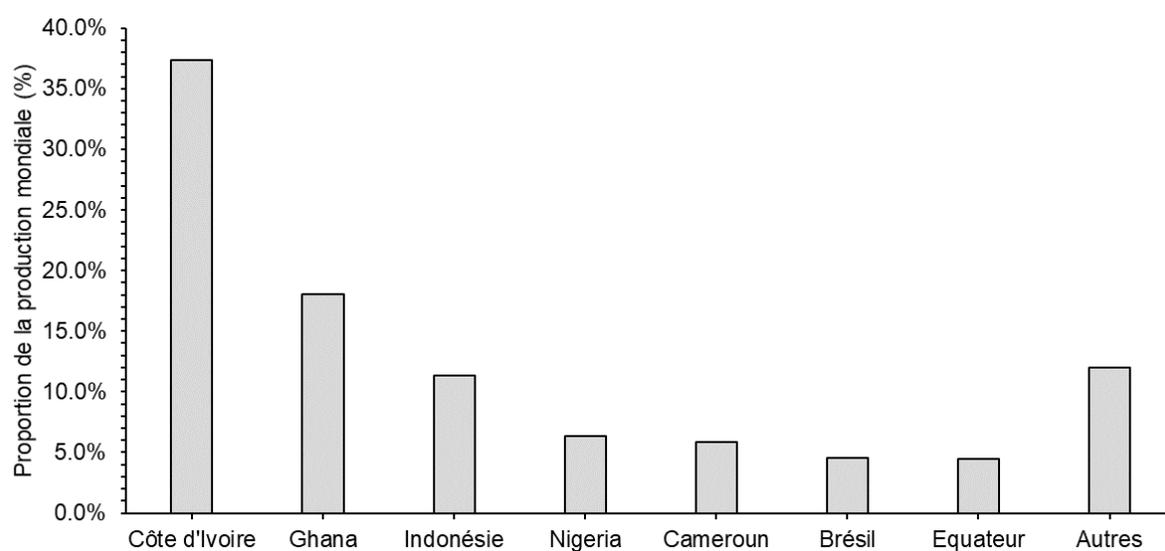


Figure 7 : Répartition par pays de la production mondiale de cacao en 2018

Source : FAOSTAT (2020).

I.2.2.2. Position systématique

Aussi appelé cacaotier, le cacaoyer (*Theobroma cacao*) appartient-il au genre *Theobroma*. Parmi les 22 espèces que renferme le genre, seule l'espèce *Theobroma cacao* est cultivée pour la commercialisation de ses fèves (Kouassi, 2010). Longtemps classé dans la famille des Sterculiacées selon la classification classique, le cacaoyer a été récemment reclassé dans la famille des Malvacées selon la classification phylogénétique ou classification APG (Silva & Figueira, 2004) présentée ci-après :

Règne	: Plantae
Embranchement	: Magnoliophyta
Classe	: Magnoliopsida
Ordre	: Malvales
Famille	: Sterculiacées
Genre	: <i>Theobroma</i>
Espèce	: <i>Theobroma cacao</i> .

I.2.2.3. Morphologie et biologie du cacaoyer

Dans ce paragraphe, les parties du cacaoyer décrites sont en relation avec le système racinaire et la partie aérienne (Figure 8).

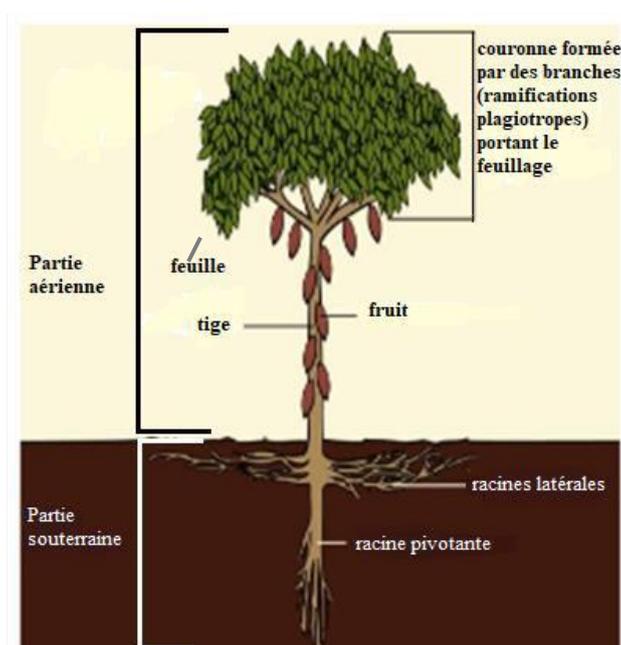


Figure 8 : Représentation schématique de l'architecture générale d'un cacaoyer
Source : Demol (2002)

I.2.2.3.1. Système racinaire

Le système racinaire comporte trois grandes parties : le collet, qui est le point de séparation de la tige et de la racine ; le pivot qui s'enfonce verticalement dans le sol (développement orthotrope) et peut atteindre 1,5 à 2 m de profondeur pour bien fixer la plante dans le sol et puiser l'eau et les éléments nutritifs en profondeur (Braudeau, 1969) ; les racines latérales qui se développent dans la partie supérieure du pivot dans la couche humifère du sol (20 à 30 cm).

Les racines latérales ont tendance à se ramifier à leurs extrémités pour donner un abondant "chevelu racinaire" dans une zone périphérique à environ 2,5 cm du tronc (cacaoyer adulte). Ainsi, le cacaoyer adulte possède 8 à 10 racines latérales principales réparties autour du pivot dont le rôle est d'assurer la nutrition hydrique et minérale de la plante (Aké-Assi, 1984 ; Mossu, 1990).

I.2.2.3.2. Partie aérienne

La partie aérienne est formée du tronc, des branches et des feuilles.

❖ Tronc

Après germination de la fève, le jeune plant croît verticalement par pousses successives jusqu'à 18 mois. Après cela, la croissance du tronc est interrompue et l'extrémité se divise en cinq branches formant la couronne à environ 1,5 m du sol. Sur le tronc se développent normalement de nombreux rejets ou gourmands qu'il faut régulièrement supprimer (égourmandage) (Verlière, 1981).

❖ Branches

Dans les conditions idéales de culture, le nombre de branches charpentières est de cinq, formant la couronne. La poussée des branches est latérale (rameaux plagiotropes). Les branches donnent naissance à d'autres branches, mais il peut se développer sur les branches, des gourmands (rameaux orthotropes) (Aké-Assi, 1984).

❖ Feuilles

Les feuilles sont alternées, simples, oblongues, acuminées. Elles mesurent 25 à 30 cm de longueur et 10 à 15 cm de largeur (Aké-Assi, 1984), et peuvent atteindre une surface de 500 cm² (Verlière, 1981). À l'état jeune, la coloration des feuilles varie du vert-jaune au rose-orangé

ou violacé, plus ou moins foncé selon les variétés. À l'état adulte, les feuilles prennent la coloration vert-foncée. La feuille est rattachée au rameau par un pétiole. À l'aisselle de chaque pétiole se trouve un bourgeon axillaire qui peut donner naissance à un rameau. La durée de vie de la feuille varie de huit à dix mois (Mossu, 1990).

❖ Fructification

Les fleurs du cacaoyer (Figure 9) apparaissent aussi bien sur le tronc que sur les branches à des points fixes appelés coussinets floraux. Elles sont de petites tailles, de couleur blanchâtre ou rose. L'inflorescence est de type cyme bipare. Les fleurs, pentamères, ont cinq sépales et cinq pétales libres. L'androcée comprend deux verticilles soudés à la base : l'un extrême, comporte cinq staminodes opposés aux sépales. L'autre, interne, présente cinq étamines fertiles opposées aux pétales et dont les filets sont divisés en deux ou trois ramifications portant chacune une anthère biloculaire. Les filets sont incurvés, les anthères se trouvant cachées à l'intérieur de la cuculle du pétale (Aké-Assi, 1984). L'ovaire, supère, à placentation axile, comprend cinq carpelles opposés aux pédicelles. Les fleurs sont dotées d'un ovaire contenant environ trente à soixante ovules (Aké-Assi, 1984 ; Deheuvels, 2011).

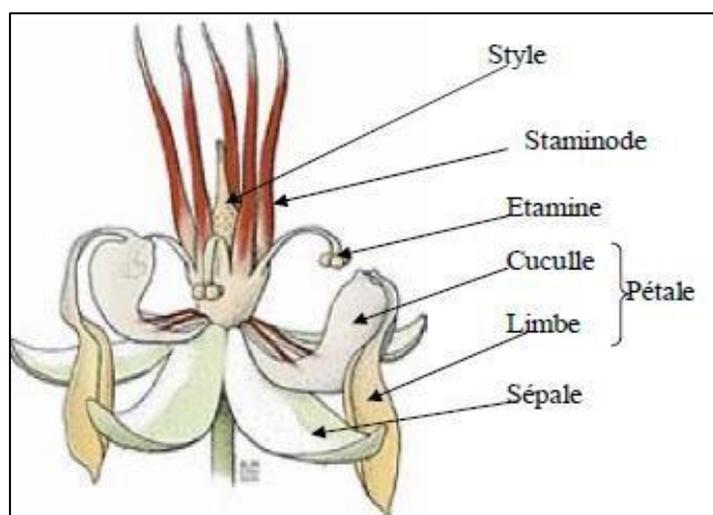


Figure 9 : Représentation schématique d'une fleur de cacaoyer

Source : Loor Solorzano (2007).

Il existe deux grandes périodes de floraison : Avril-Juillet qui assure la récolte principale et Novembre-Janvier qui assure la récolte intermédiaire. La pollinisation chez le cacaoyer est essentiellement assurée par les insectes. Le fruit (Figure 10) présente deux stades de développement : la chérelle et la cabose. La chérelle est le jeune fruit nouvellement noué, il

mesure environ cinq cm. La cabosse est l'état adulte du fruit. Elle pèse en moyenne 400 grammes et contient 30 à 40 fèves. Elle peut mesurer entre 12 à 15 cm de long et sept à neuf cm de large. La durée de développement du fruit, depuis la nouaison jusqu'à la maturité, varie de cinq à six mois en fonction de l'origine génétique. Les jeunes chérelles formées sur un cacaoyer ne parviennent pas toutes à maturité. Un nombre important d'entre elles se dessèchent. Ce dessèchement des chérelles est appelé " wilt " et n'est que la manifestation d'un mécanisme régulateur de la production de l'arbre. Seulement 33 pc en moyenne des fruits noués sont récoltés. À maturité, le fruit, désigné sous le nom de cabosse est une sorte de baie ovoïde, à développement coriace un peu charnue, relevée d'une dizaine de côtes longitudinales verruqueuses (Aké-Assi, 1984).

La taille des fèves est fonction de la variété : La variété criollo a de grosses fèves plus ou moins arrondies avec des cotylédons blancs ou rouges. Les Forastero sont caractérisés par de petites fèves. Les fèves fraîches sont entourées d'un mucilage sucré et sont rattachées les unes aux autres par le rachis fixé à l'extrémité supérieure de la cabosse. À la base de la fève (gros bout), on note la présence du germe qui doit être détruit pendant la fermentation (Loor Solorzano, 2007).

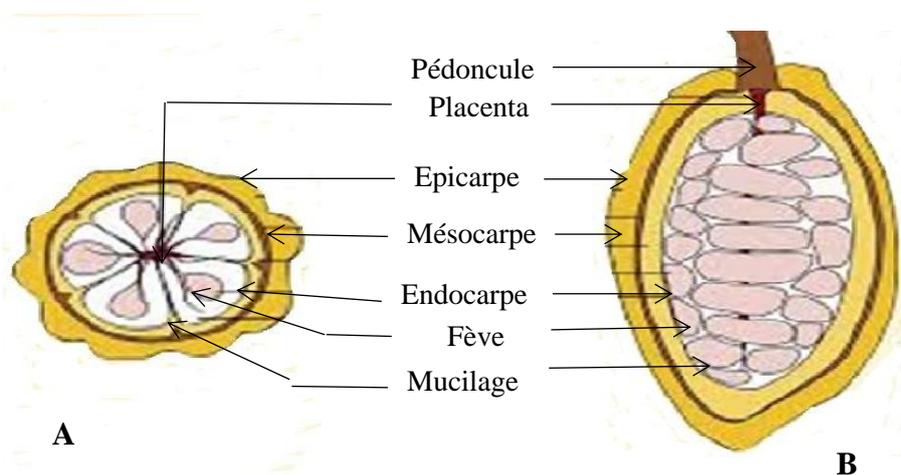


Figure 10 : Représentation schématique du fruit du cacaoyer

A : coupe transversale ; B : coupe longitudinale.

Source : Loor Solorzano (2007).

I.2.2.4. Classification phylogénétique

L'espèce *Theobroma cacao* est diploïde ($2n = 2x = 20$) et dotée d'un petit génome estimé à 0,43 pg ou $0,415 \times 10^9$ pb (Clement *et al.*, 2003 ; Micheli, 2009). La classification distingue trois grands groupes morpho géographiques au sein de l'espèce *Theobroma Cacao* : les Forastero originaires d'Amérique du sud, très variables, mais qui comportent des arbres vigoureux plus précoces et résistants aux maladies. Les Criollo domestiqués en Amérique Centrale, moins vigoureux et plus sensibles aux maladies, mais qui donnent un chocolat fin de haute qualité, et les Trinitario, groupe hybride entre les deux premiers. Les Forastero fournissent la presque totalité des fèves de cacao provenant du Brésil et de l'Ouest Africain. Ils constituent 80 pc de la production mondiale de cacao (Pitcholo, 1990).

I.2.2.5. Facteurs climatiques de la cacaoculture

Le développement et la production optimale du cacaoyer exigent qu'un certain nombre de conditions soient réunies au plan du climat, notamment la température, la pluviométrie et l'ombrage.

I.2.2.5.1. Température

La température, ainsi que ses fluctuations saisonnières ou quotidiennes affectent plusieurs processus physiologiques du cacaoyer (Petithuguenin, 1998). La température moyenne optimale favorable à la culture du cacaoyer est voisine de 25°C (non inférieure à 21°C). La moyenne des minimas quotidiens doit être supérieure à 15°C (sans jamais descendre au-dessous de 10°C). La température souhaitable est donc celle des régions proches de l'Equateur, à basse altitude (Braudeau, 1969). Cette température, selon ce même auteur assure un bon fonctionnement de la physiologie de la plante, en relation avec la poussée foliaire et la croissance en diamètre du tronc. Pour Petithuguenin (1998), la température ambiante influe sur la dureté du beurre de cacao et sur la taille des fèves d'une part et a un effet indirect sur la qualité du cacao commercialisé d'autre part, car elle conditionne la faisabilité du séchage solaire des fèves après leur fermentation.

I.2.2.5.2. Pluviométrie

Le rendement des cacaoyers d'une année à l'autre est fortement affecté par le régime des pluies. Les pluies doivent être abondantes et bien réparties tout au long de l'année. La cacaoculture nécessite une hauteur d'eau annuelle minimum de 1200 mm bien répartie, avec

une saison sèche n'excédant pas plus de trois mois. La pluviométrie optimale est de 1600 mm/an tandis que l'hygrométrie doit être constamment élevée (optimum 85 pc). Une humidité élevée (supérieure à 80 pc) est particulièrement souhaitable car elle permet de diminuer l'évapotranspiration (Mossu, 1990).

I.2.2.5.3. Ombrage et insolation

Le cacaoyer est un arbre de forêt. Aussi, le jeune cacaoyer, pendant les premières années de son développement, a-t-il besoin, pour sa croissance optimale, d'un ombrage relativement dense (Vincent, 1986). Cet ombrage peut être naturel ou créé (bananier, espèces forestières ou agroforestières introduites). Lorsque l'ombrage est constitué par des espèces forestières ou agroforestières, celui-ci doit être progressivement réduit de sorte à obtenir un peuplement définitif variant de 18 à 30 arbres /ha en fonction des espèces. L'ombrage contribue, de plus, à protéger le sol. De plus, sa culture sous ombrage aménagé diminue les attaques des insectes. Cependant, l'ombre a un inconvénient : il réduit la floraison et la production (Verlière, 1981).

Le cacaoyer jeune a une vigueur optimale lorsque l'éclairement devient important. Le rendement maximum d'un cacaoyer adulte ne peut être obtenu qu'avec une exposition totale à la lumière, surtout chez les cacaoyers hybrides. La floraison est maximale quand la durée d'insolation est supérieure à quatre heures par jour (Assiri *et al.*, 2009).

I.2.2.6. Exigences pédologiques

Les sols utilisés en général pour la cacaoculture sont ceux formés sur granitogneiss calco-alcalin, ou sur schistes plus ou moins métamorphiques. Les roche-mères donnant les meilleurs sols pour cette culture restent les dolérites, les schistes amphibolitiques et toutes les roches analogues (Verlière, 1981). Par contre, les sols sur roches granitiques très leucocrates sont souvent peu recommandables. Aussi, les sols hydromorphes, à hydromorphie accentuée et superficielle conviennent les moins bien. Il en est de même des sols à cuirasse peu profonde. Enfin, les sols sur sables quartzeux ou sur alluvions et colluvions sablo-graveleuses sont à éviter (Kassin *et al.*, 2012).

Par ailleurs, la réputation d'exigence du cacaoyer est peu fondée en ce qui concerne les sols. Il peut s'adapter en effet à des sols très variés. Cependant, selon Koko *et al.* (2009), Koko (2014), les conditions de sol requises pour une meilleure croissance du cacaoyer dépendent essentiellement de la profondeur, de la structure, de la texture et des propriétés chimiques.

Concernant la profondeur, ces mêmes auteurs soutiennent que dans de bonnes conditions, un mètre suffit (au cas où il n'y a pas d'obstacles physiques à moins d'un mètre de profondeur), sinon le cacaoyer requiert des sols profonds de 1,5 m au minimum.

Pour la structure, elle doit permettre une bonne pénétration des racines, donc être sans cailloux ou pierres en quantité excessive (taux pondéral d'éléments grossiers n'excédant pas 50 pc), ce qui gênerait le développement du pivot ou des racines latérales (Koko, 2014 ; CNRA, 2015).

Quant à la texture, elle doit assurer une bonne rétention de l'eau, permettre un bon drainage et aérée. Les sols sablo-argileux ou argilo-sableux et limono-argileux sont les plus productifs (Koko, 2014 ; CNRA, 2015).

Toutefois, dans la cacoculture, ce sont les propriétés chimiques des couches superficielles qui importent le plus car les racines les plus nombreuses sont dans cette zone. Cependant, le cacaoyer requiert des sols riches en matière organique, soit un taux minimum de 3 pc dans les horizons superficiels, lesquels doivent être bien pourvus en éléments minéraux (Smith, 1980). Par ailleurs, il ressort que les meilleures productions en cacao sont obtenues sur des sols ayant un rapport N/P₂O₅ total égale à 1,5 (Smith, 1980 ; Boyer, 1982).

Le pH légèrement acide des sols ne constitue pas une contrainte pour le cacaoyer car, même si l'optimum est pH 7 pour les meilleurs sols sous cacaoyers, cette plante peut se développer aussi sur des sols à pH acide (pH 4,5- 6) ou légèrement basique (pH 6,7-7,5) (Smith, 1980 ; Appiah *et al.*, 2006 ; Tossah *et al.*, 2006). La production est fortement limitée en dessous de pH = 4,5 et également supérieure à 8 (Aubert & Moulinier, 1954).

I.2.3. Sols de culture du caféier et du cacaoyer en Côte d'Ivoire

I.2.3.1. Localisation géographique

En Côte d'Ivoire, la cacoculture et la caféiculture sont pratiquées dans les mêmes zones de production, sur les mêmes sols (Figure 11). Par conséquent, les sols affectés à ces deux cultures sont de mêmes natures. Vu le manque de travaux sur la description des sols affectés à la caféiculture en Côte d'Ivoire et les exigences édaphiques du cacaoyer plus importantes que celles du caféier (Atila, 2010), la description des sols affectés à ces deux cultures dans cette étude a été faite sur la base des caractéristiques des sols affectés à la cacoculture en Côte

d'Ivoire. Cette description est précédée par la présentation des principales composantes de la fertilité du sol en général à l'effet de mieux apprécier l'état de fertilité des sols décrits.

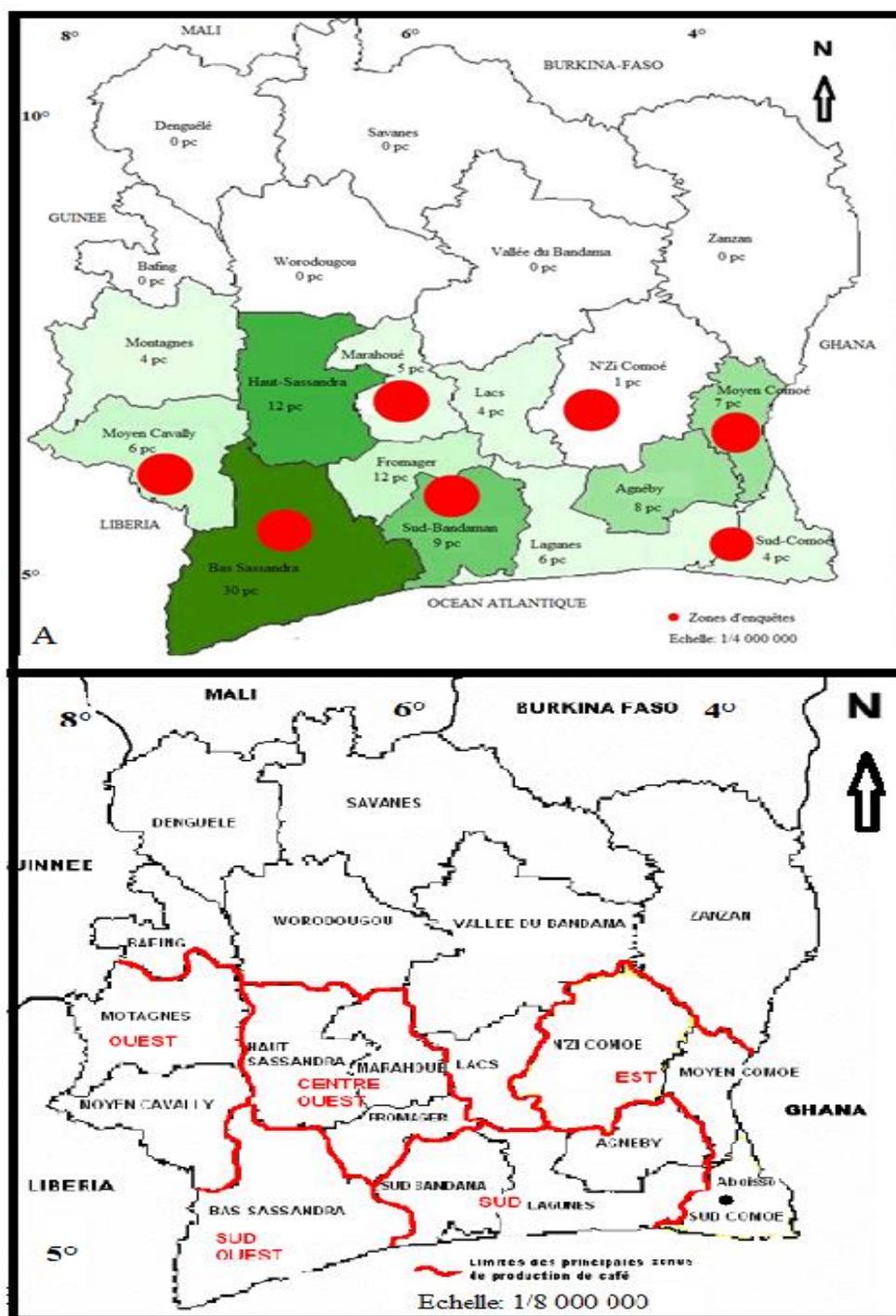


Figure 11 : Cartes des principales zones de productions de cacao et de café en Côte d'Ivoire

A : zones de production du cacao ; B : zones de production du café

Sources : MINAGRI (2003) et Koua (2007).

I.2.3.2. Caractéristiques générales

Les travaux de Petithuguenin (1998) sur les critères pédologiques pertinents pour la cacaoculture dans les zones de production en Côte d'Ivoire et au Ghana ont permis de dénombrer divers types de sols favorables ou non à la cacaoculture. Ces sols sont décrits dans les parties qui suivent.

Les sols inaptes sont constitués par les sols hydromorphes (classés comme fluvaquents, trophémistes ou hydraquents) et les sols ferrugineux de savane. Les sols peu favorables regroupent essentiellement les sols ferrallitiques fortement désaturés. Ces sols couvrent les franges Sud et Ouest de la Côte d'Ivoire. Leur pauvreté en éléments minéraux conduit, en l'absence de fertilisation minérale de compensation, à un plafonnement de la production (rendements maximaux inférieurs à 800 kg/ha/an) et à une sénescence précoce du verger (en culture de plein soleil. Les rendements présentent une tendance à la baisse dès la 10^{ème} année environ). Quant aux sols favorables, on compte les sols ferrallitiques moyennement désaturés localisés principalement dans les zones cacaoyères traditionnelles de la Côte d'Ivoire (régions Est et Centre-Ouest). Sur ces sols, il est possible d'atteindre des rendements potentiels, sans fertilisation et sous ombrage permanent léger ou nul, de 1500 kg/ha/an environ, durant une quinzaine d'années. Les sols très favorables enfin regroupent, d'une part, les sols peu désaturés, à capacité d'échange élevée, généralement profonds et bien drainants, couvrant une étendue limitée en Côte d'Ivoire : les sols bruns eutrophes tropicaux vers Oumé (l'un des premiers foyers de développement de la cacaoculture), les sols ferrallitiques faiblement désaturés, souvent rajeunis, issus de roches basiques, présents sous forme d'inclusions dans l'Ouest et le Centre-Ouest ivoirien et, d'autre part, les sols ferrallitiques moyennement désaturés typiques issus de granite, près de Niablé, Adzopé et Agboville dans l'Est du pays et les sols ferrallitiques moyennement désaturés remaniés modaux avec recouvrement issus de granite, des régions de Sinfra et Daloa au Centre-Ouest. Toutefois, les sols alluviaux (plus ou moins évolués) peuvent être considérés comme favorables à très favorables à la cacaoculture lorsque l'engorgement permanent ou fréquent du sol est évité par une position topographique légèrement surélevée ou par un réseau de canaux de drainage.

Selon le CNRA (2005), environ 72 pc des cacaoyers de la Côte d'Ivoire sont cultivés sur six (6) grands types de sols, ayant deux (2) origines géologiques : granitique et schisteuse. Pour les sols d'origine granitique, il s'agit des sols ferrallitiques faiblement rajeunis, remaniés (Ouest et Sud-Ouest), des sols ferrallitiques modaux à faciès remanié avec recouvrement (Centre-Ouest), des sols ferrallitiques modaux à faciès induré et remanié (Centre-Ouest) et des sols

ferrallitiques modaux remaniés (Centre-Est). Les sols d'origine schisteuse sont quant à eux constitués par les sols ferrallitiques modaux à faciès induré, remanié (Est) et les sols ferrallitiques modaux remaniés (Est, Sud-Ouest, Centre-Ouest). Ces six (6) types de sols représentent plus de 6 pc de la superficie des terres dans la ceinture du cacao.

I.2.3.3. Conditions de dégradation

En Côte d'Ivoire, la cacaoculture et la caféiculture avaient coutume de se pratiquer sur les sols forestiers fertiles. Après plus de 50 ans de pratique, la fertilité des sols s'est réduite, entraînant une régression de la productivité des plantations. Le déclin de la fertilité des sols cultivés se justifie principalement par les grandes quantités d'éléments nutritifs que les cacaoyers et caféiers empruntent au sol pour leur croissance et leur développement et qui ne sont pas remplacés par la fertilisation. Outre l'exportation massive des nutriments par les cultures, le réchauffement climatique participe aussi à la dégradation des sols sous cacaoyers et caféiers.

❖ Exportation des nutriments

Chez le cacaoyer, la production d'une tonne de fèves de cacao nécessite en moyenne une exportation de 45 kg d'azote, 13 kg de phosphore, 65 kg de potassium, 10 kg de calcium et 13 kg de magnésium (Jadin & Snoeck, 1985). De nombreux déséquilibres entre les minéraux ou déficits de minéraux peuvent être engendrés par ces prélèvements. C'est ainsi que Koko *et al.* (2008) ont constaté que les sols des cacaoyères dégradées avaient des carences en potassium et relativement riches en magnésium, au point que l'optimum du rapport entre ces deux minéraux (Mg^{2+}/K^+) qui égal à 3 a été largement dépassé. Ces auteurs ont aussi constaté que tous les sols sous cacaoyers du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire présentaient des déficits en phosphore assimilable (optimum fixé à 100 mg.kg^{-1} pour le cacaoyer) et des caractéristiques du complexe absorbant défavorables, tout comme celles des équilibres chimiques : déficits en potassium échangeable, en phosphore assimilable et en azote total notamment et déséquilibre entre les bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}).

Quant au caféier, une récolte donnant 574 kg de café marchand (soit l'équivalent de 2870 kg de cerises) prélève dans sol : 17,22 kg d'azote, 3,44 kg de phosphore, 28,70 kg de potassium, 3,00 kg de calcium et 2,40 kg de magnésium (Jadin & Snoeck, 1985).

Dans l'un ou l'autre des deux cas, les rendements sont satisfaisants à court terme (5-10 ans), mais les plants se dégradent progressivement et la production baisse à moyen terme (15-20 ans), car l'exportation des éléments nutritifs par les plants au détriment du sol aboutit à une perte de la fertilité chimique des sols par l'épuisement de leurs réserves nutritives et à une acidification des sols (CNRA, 2005 ; Afrifa *et al.*, 2006).

❖ Effets du changement climatique

L'agriculture Ouest-Africaine essentiellement pluviale et de subsistance, reste caractérisée par un bas niveau de la fertilité des sols (Saïdou *et al.*, 2009 ; Doamba *et al.*, 2011). Si les causes comprennent notamment les pratiques culturales inappropriées, l'érosion et le surpâturage, il n'en demeure pas moins que les risques climatiques tels que les longues séquences sèches, les fortes chutes de pluie et les vents violents apparaissent comme des contraintes supplémentaires à même d'accentuer les problèmes rencontrés au niveau de la fertilité des sols. En effet, en examinant l'évolution des facteurs climatiques entre 1960 et 2008 dans trois zones climatiques du Bénin, Gnanglè *et al.* (2011) ont remarqué non seulement une augmentation significative de la température moyenne de plus de 1 °C, mais aussi une diminution perceptible de la pluviosité de 5,5 mm/an en moyenne, et du nombre moyen annuel de jours de pluie. D'autres études ont aussi indiqué que les précipitations resteront plus ou moins stables (+ 0,2 pc) dans le sud du pays, mais seront réduites de 13 à 15 pc dans le Nord du Bénin à l'horizon 2100 (Yégbémey *et al.*, 2014).

Dans de tels cas, les cultures devront subir plus les effets des variations climatiques (Yégbémey *et al.*, 2014) quand la fertilité des sols baissera et, avec elle, le rendement des cultures (Bokonon-Ganta *et al.*, 2003 ; Paeth *et al.*, 2008 ; Gnanglè *et al.*, 2011). En effet, les changements de la composition de l'atmosphère auront entraîné des déséquilibres se traduisant par la modification de certaines caractéristiques du sol, principalement : la réserve organique, la réserve des éléments nutritifs, l'acidité, les conditions d'oxydo-réduction et les caractéristiques hydriques et physiques (Katé *et al.*, 2014).

I.2.3.4. Options de restauration

Le sol est dit dégradé quand il a perdu une ou plusieurs de ses qualités. La cause première de cette dégradation est liée en général à la minéralisation des matières organiques (MO) du sol suite au défrichement et à la mise en culture entraînant une faible restitution des MO. Mais l'érosion en nappe sélective des particules légères (MO, argile et limons) accélère

cette dégradation douze fois plus vite que le simple décapage par érosion en rigole (ravinement) ou en masse (érosion aratoire) (Roose, 2015). Cela montre l'importance de protéger la surface du sol par une couverture végétale abondante qui alimente la surface du sol en MO, élimine la battance des gouttes de pluie (érosion en nappe), maintient une bonne infiltration et augmente la rugosité de la surface du sol (érosion en masse) (Roose, 2015). Pour ce faire, plusieurs options dont les principales sont décrites ci-après ont été développées avec le temps.

❖ **Jachère**

La technique traditionnelle la plus courante pour restaurer la fertilité physique, chimique et biologique des sols consiste à abandonner les champs devenus trop peu productifs à la jachère pendant une période d'autant plus longue que le milieu est dégradé et aride (Roose, 2015). Mais la résilience des sols exige des temps de repos très longs (10 à 50 ans) pour retrouver une fertilité suffisante. Or depuis la période coloniale, la population africaine a doublé tous les 20 ans et les surfaces disponibles pour le développement agricole sont devenues trop exigües. La durée de la jachère n'a cessé de diminuer au point de disparaître au profit de cultures continues et intensives soutenues par l'apport massif d'engrais minéraux et de pesticides industriels. La durée des jachères peut toutefois être raccourcie si elles sont enrichies en légumineuses fixatrices d'azote, ou prolongée si elles sont exploitées comme parcours pour le bétail, ou comme ressource en produits pharmaceutiques ou énergétiques (bois de feu pour la cuisine) (Roose, 2015).

❖ **Conservation de l'eau et des sols**

Les efforts de conservation des sols dégradés ne suffisant plus, le concept de « conservation de l'eau et des sols » (CES) a été développé dès 1939 (Roose, 2015). Il consiste à mettre en défens une partie du territoire (les parcs nationaux) et à développer des techniques culturales pour couvrir les sols cultivés et des structures antiérosives (banquettes) pour conduire les excès d'eau de pluie jusqu'aux drains naturels.

De nombreux congrès internationaux ont décrit les processus de dégradation des terres et préconisé diverses techniques de conservation de l'eau et des sols (CES). Dans les régions méditerranéennes de l'Afrique du Nord bien connues pour les dégâts d'érosion catastrophique lors des averses exceptionnelles, agronomes et forestiers ont, selon (Roose, 2015), préconisé la mise en défens et la plantation d'arbres sur les hautes terres, la restauration des ravines et torrents qui transportent la majorité des sédiments et le terrassement des versants cultivés. Ce

sont les principes de la Défense et Restauration des Sols (DRS) qui se sont répandus tout autour de la Méditerranée. Cependant, dès les années 1975, de nombreuses critiques se sont élevées pour constater l'échec de ces approches technocratiques qui ne tiennent pas assez compte de l'avis des paysans et n'améliorent pas la fertilité des sols, ni le rendement des cultures (Hudson, 1992 ; Roose *et al.* 1993 ; Roose, 1994). De nouvelles approches ont donc été développées pour restaurer la productivité des sols dégradés : il s'agit principalement de la révolution verte et la révolution doublement verte ou l'agroécologie (Roose, 2015).

❖ Révolution verte

Face aux famines de plus en plus fréquentes qui ravageaient les pays tropicaux à forte densité de population dans les années 1960, une politique agricole dite « révolution verte » a vu le jour. Elle est fondée sur le développement d'une agriculture industrielle qui s'appuie sur la standardisation des facteurs de production, l'usage de variétés à haut rendement, l'irrigation et l'usage intensif d'engrais chimiques et de pesticides, la moto-mécanisation et le crédit (Allaverdian *et al.*, 2014). La « révolution verte » a permis d'augmenter rapidement la production agricole de pays émergents comme l'Inde, l'Argentine, le Brésil. Cependant, elle a causé la perte de nombreux petits producteurs qui, à la suite d'une récolte catastrophique (sécheresse, maladies, parasites) ont été privés de leur lopin de terre au profit de grosses sociétés qui leur avait prêté les moyens de production. La production régionale a fait un bond en avant au prix de graves pollutions.

❖ Agroécologie

Devant les échecs sociologiques et environnementaux ainsi que le retour de la pauvreté et de la malnutrition, une nouvelle approche agricole s'est développée qui intègre mieux le bien être de l'homme dans un milieu plus naturel. La révolution doublement verte recherche des techniques produisant des hauts rendements tout en protégeant l'environnement (notion de durabilité des systèmes). L'agroécologie est à la fois une discipline scientifique, des pratiques agricoles imitant au mieux la nature et un mouvement social. Depuis les années 2000, les experts s'intéressent plus aux liens entre producteurs, consommateurs, société, territoire, ressources naturelles et production agricole (Allaverdian *et al.*, 2014). L'agroécologie s'efforce de comprendre la nature et de l'imiter dans les champs de culture. Elle est basée sur cinq grands principes: i) le recyclage de la biomasse et la disponibilité des nutriments ; ii) la sauvegarde des matières organiques du sol, des activités biotiques et des conditions favorables au

développement des plantes ; iii) la réduction des pertes d'eau, d'énergie et de nutriments grâce à la couverture du sol ; iv) le renforcement de la diversité génétique, des associations et rotations et v) le renforcement des interactions biologiques parmi les composants de l'agrosystème (Allaverdian *et al*, 2014). En Europe, l'AgroEcologie (AE) se matérialise à travers l'agriculture biologique. En Amérique, l'AE s'est construite sur le savoir empirique des paysans pour gérer les ressources naturelles et a donné naissance à l'agriculture de conservation, faisant appel aux techniques culturales qui protègent le sol (rotation céréales/légumineuses, semis direct sous couverture des résidus ou des légumineuses) mais aussi aux Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) et désherbants chimiques, bien loin des principes de l'AE. En Asie, l'AE se décline autour de cultures spécifiques (riz) ou de lutte intégrée contre les ravageurs. En Afrique de l'Ouest, les expériences sont limitées aux techniques traditionnelles comme le Zaï, les parcs à *Faidherbia*, la fumure animale, le paillage, les soins phytosanitaires naturels (neem) et les plantations d'arbres ou de haies vives (Allaverdian *et al*, 2014).

I.2.4. Notion de fertilité du sol en général

Pour Pieri & Moreau (1986), le concept de fertilité paraît a priori clair quand on se réfère à la productivité primaire des écosystèmes naturels. Ce concept recouvre en réalité des notions variées dès lors que l'on se situe dans la perspective d'une utilisation agricole de ces écosystèmes. En effet, la fertilité a longtemps été considérée comme une propriété liée essentiellement aux facteurs chimiques du sol, assimilé à un réservoir d'éléments minéraux. Cette approche s'est rapidement avérée insuffisante, voire erronée, pour rendre compte de la réalité agricole et pour comprendre certains comportements culturaux. En réalité, le « pouvoir alimentaire » du sol résulte autant de la richesse chimique de ses constituants que de leurs conditions d'accessibilité par les cultures. Elle est donc le résultat de l'expression des composantes physiques, chimiques, biologiques et des interactions de ces composantes (Recous *et al.*, 2015).

I.2.4.1. Fertilité physique

La recherche agronomique tropicale française a attaché une importance grandissante à l'étude des facteurs morphologiques de la fertilité des sols dont la pente du terrain, la compacité, la profondeur utile et les états hydrostatiques du sol. Ces facteurs permettent de délimiter le volume de sol exploitable par les racines des végétaux (Pieri & Moreau, 1986).

Concernant la pente du terrain, les limitations agricoles sont en général analysées sur le plan de l'érosion du sol (Monnier *et al.*, 1981). Cette érosion ne se produit pas ou elle se produit peu sur sol bien couvert de végétation. Mais dès que le sol est mis en culture, elle peut se manifester avec intensité, surtout lorsque la surface du sol est rendue imperméable par le mode de travail adopté par l'utilisateur (Monnier *et al.*, 1981). Les sols de l'ensemble des classes de fertilité déterminées offrent des conditions de pente variant de 2 à 8 pc. Si l'on tient compte des seuils définis par Sys & Verheye (1978), ces conditions ne constituent aucune limite pour les cultures pérennes et pâturages. Toutefois ces conditions peuvent induire une faible contrainte pour les cultures vivrières dont les racines étant peu profondes, peuvent être déracinées et emportées par le courant de l'eau de ruissellement, si faible soit-il.

La présence de fortes quantités de concrétions de fer et d'autres éléments grossiers tels que les gravats dans les sols peut induire des effets négatifs, notamment une gêne pour les semis et les plantations et du travail du sol en général, une diminution du volume prospectable par les racines et une diminution de la réserve en eau. Cette analyse de la fertilité physique du sol a été aussi évoquée par Boa (1989).

I.2.4.2. Fertilité chimique

La fertilité chimique du sol se définit par l'aptitude d'un sol à créer et à maintenir un statut chimique caractérisé par un pH adapté aux besoins des plantes (généralement situé entre 5,5 et 7,0), une quantité de matière organique suffisante pour permettre une rétention d'eau suffisante, une bonne structure du sol et une concentration suffisante des différents nutriments indispensables aux plantes, sous des formes assimilables (Sébillotte, 1992).

I.2.4.3. Fertilité biologique

La fertilité biologique désigne l'aptitude des sols à apporter les éléments essentiels (azote, phosphore et potassium principalement) à la croissance des végétaux par l'action des organismes vivants (animaux, insectes, champignons, parasites) ayant des inter-relations complexes et qui se nourrissent de débris végétaux ou animaux (Chaussod, 1996). L'ensemble de ces organismes contribuent à la dégradation de la matière organique qui entraîne la libération des éléments nutritifs nécessaires à la plante. Une fraction de la matière organique, facilement dégradable, participe à la fertilité du sol en nourrissant la biomasse microbienne qui elle-même participe à la nutrition des plantes en azote, et en phosphore. Une autre fraction dite « stable » a un rôle de structuration du sol. L'équilibre du ratio entre dégradation et stabilisation de la

matière organique détermine la fertilité biologique des sols. Aussi, la fertilité biologique favorise-elle la disponibilité en eau grâce à la création de micropores permettant de retenir l'eau dans le sol. Les organismes emblématiques de cette activité biologique sont les vers de terre dont la présence est un bio-indicateur de la fertilité du sol. Ils contribuent également à la stabilité de la structure du sol ou encore favorisent l'accès à l'eau et aux nutriments pour les plantes (Chaussod, 1996).

I.3. MILIEU D'ÉTUDE

L'étude a été réalisée dans le département de Daloa en Côte d'Ivoire. Ce département bénéficie de caractéristiques physiques (climat, hydrographie, végétation, géomorphologie, pédologie) favorables en général qui font qu'il compte parmi les zones les plus densément peuplées et les plus économiquement actives de la Côte d'Ivoire. Voici un aperçu de ces caractéristiques générales.

I.3.1. Situation géographique

Le département de Daloa est situé dans la région administrative du Haut-Sassandra (Figure 12), elle-même située dans le district de Sassandra-Marahoué au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire (CNTIG, 2016).

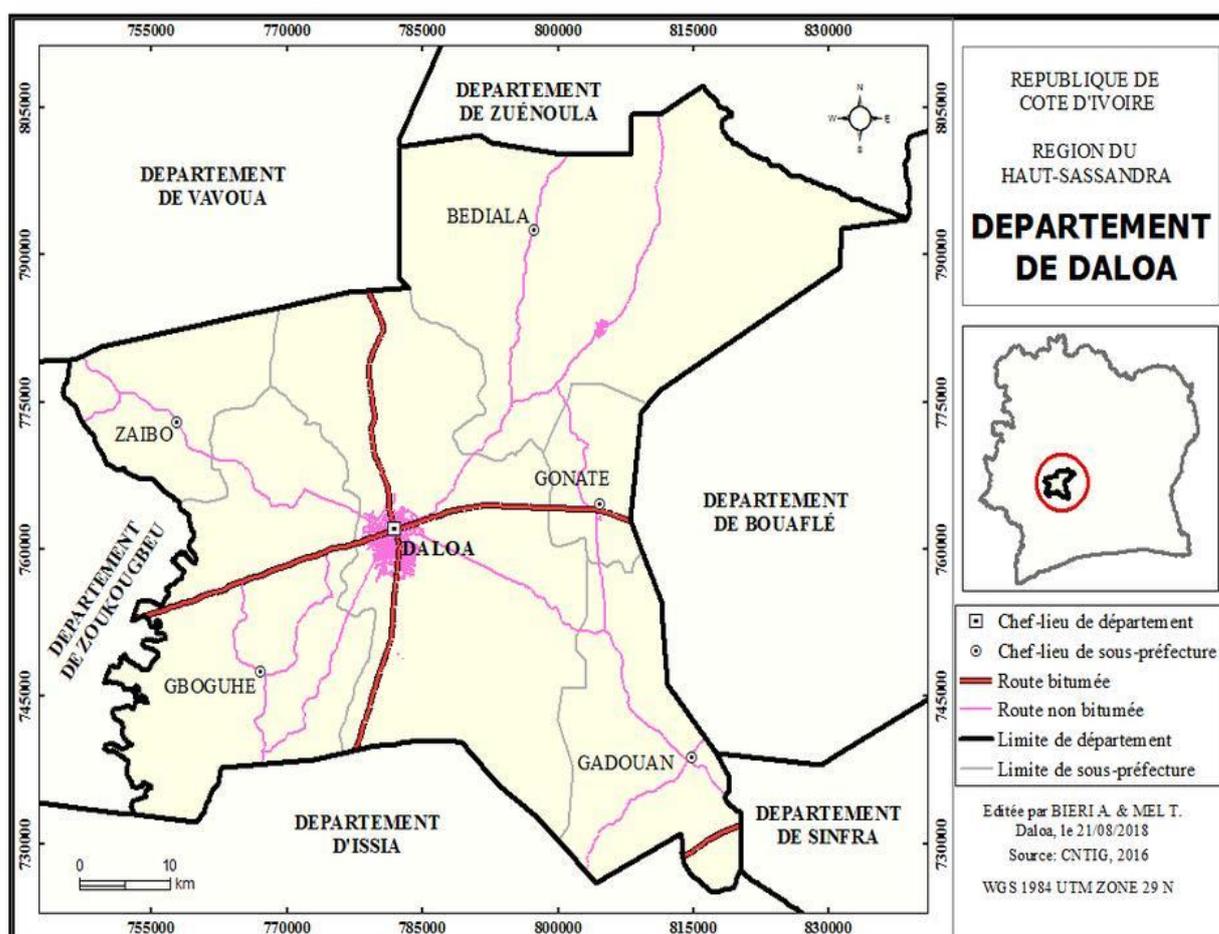


Figure 12 : Carte de localisation géographique du département de Daloa

Source : CNTIG (2016).

Ce département est limité au Nord par les départements de Vavoua et de Zuénoula, au Sud par ceux d'Issia et de Sinfra, à l'Ouest par celui de Zoukougbeu et à l'Est par le département de Bouaflé. Selon la figure 11, il est délimité par les Longitudes Ouest 745000 et 840000 m et les Latitudes Nord 733000 et 805000 m. Avec une superficie de 5 450 km², le département de Daloa occupe 28 pc de la surface de la région du Haut-Sassandra (INS, 2014).

I.3.2. Caractéristiques physiques du milieu d'étude

I.3.2.1. Climat et hydrographie

Le département de Daloa appartient au climat tropical humide avec une pluviométrie qui oscille entre 1200 et 1600 mm/an (ICEF & ENSEA, 2002 ; Koffie-Bikpo, 2013) et est ainsi favorable à la cacaoculture et à la caféiculture. C'est un climat à quatre saisons : la grande saison des pluies, marquée par des intersaisons et des orages s'étend d'Avril à mi-Juillet ; elle est suivie par une petite saison sèche (mi-Juillet à mi-Septembre) et la petite saison des pluies (mi-Septembre à Novembre) ; la grande saison sèche couvre les mois de décembre à mars. Globalement, les précipitations sont réparties sur toute l'année avec un maximum aux mois de Juin et Juillet et un minimum aux mois de Décembre à Mars. Zone humide par excellence, l'hygrométrie est importante avec une température homogène moyenne annuelle de 26°C (Koffie-Bikpo, 2013). Sur la période 1976 – 2015 (Figure 12), la hauteur moyenne annuelle de pluie enregistrée à la station météo de Daloa s'élevait à 1 235 mm. Les températures moyennes mensuelles ont varié sur la même période entre 24,75°C en Juillet et 27,72°C en Février (Yao *et al.*, 2020). Cette fourchette des températures inclut les températures moyennes optimales favorables aux cultures du cacaoyer et du caféier estimées à 25°C environ. Aussi, les fluctuations saisonnières ou quotidiennes de ces températures étant très peu prononcées, ne sauraient affecter les processus physiologiques des ces deux cultures.

Au plan hydrographique, le département est arrosé par le fleuve Sassandra et par son affluent la Lobo et ses ramifications le Dé et le Goré, donnent lieu à de nombreux bas-fonds cultivables (Ligban *et al.*, 2009).

I.3.2.2. Végétation

La région du Haut-Sassandra dont Daloa est le chef-lieu se caractérise par une flore très variée et présente deux types de végétations bien distinctes. On peut distinguer, selon ICEF & ENSEA (2002) et Koffie-Bikpo (2013) :

- la zone forestière qui occupe la majeure partie de la région. Elle se caractérise par une forêt semi-décidue à *Celtis spp* et *Triplochiton scleroxylon* (samba) ;

- et la zone des savanes ou savane pré forestière (Nord de Vavoua). Ces savanes sont composées d'un mélange d'espèces des savanes soudaniennes et d'espèces de la forêt dense semi-décidue, lesquelles sont groupées pour la plupart en bosquets de plateau et en forêts-galerie qui longent le cours des marigots et des fleuves.

L'occupation humaine qui est très forte dans cette région, a très profondément modifié la végétation naturelle. La forêt dense semi-décidue a fait place à des zones de cultures pérennes et vivrières (Koffié-Bikpo, 2013), notamment celles de caféiers et de cacaoyers qui ont fait l'objet de cette étude.

I.3.2.3. Géomorphologie et pédologie

Le modelé de la région est monotone et le paysage est constitué de pénéplaines qui sont de vastes surfaces faiblement ondulées. Il semble que les formes actuelles résultent du stade ultime de la dégradation d'anciens glaciers. Ces pénéplaines sont constituées d'interfluves. De cette surface, émergent de temps en temps des reliefs résiduels constitués d'inselbergs isolés, ce qui a amené Avenard & Deluz (1972) à préciser que le relief du département est constitué de plateaux de 200 à 400 m d'altitude alternant par endroits par des plaines et bas-fonds.

Sur le plan pédologique, les études réalisées par Dabin *et al.* (1960) ont montré que les sols du département de Daloa sont en général ferrallitiques moyennement lessivés (ou désaturés). Les formations qui constituent le substratum de la région ont subi une altération et une latérisation caractérisant les régions à climat chaud et humide. Du point de vue lithologique, le socle est constitué par des granitoïdes de composition minéralogique constante. Il s'agit de granites alcalins à subalcalins contenus dans les formations métamorphiques (gneiss et migmatites) de composition très voisine. Ces formations sont très rarement visibles à l'affleurement car masquées par une épaisse couverture d'altération argilo-sableuse.

I.3.3. Activités socio-économiques

Les populations du département de Daloa mènent des activités économiques qui sont assez diversifiées. Cependant, l'agriculture reste la principale activité génératrice de revenu. Elle occupe la majorité des populations. En effet, appartenant à la grande zone d'exploitation forestière ivoirienne, Daloa est la deuxième zone de production du cacao et la première de café (Koukougnon, 2020). Par ailleurs, la région participe de façon massive à l'approvisionnement du reste du pays en produits vivriers.

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. MATÉRIEL

Le présent paragraphe décrit le matériel utilisé pour réaliser l'étude. Il s'agit des matériels édaphique, biologique et technique. Mais avant, les sites ayant servi de cadre à la réalisation de l'étude sont présentés.

II.1.1. Présentation des sites de l'étude

Au total, sept (7) sites (Figure 13) ont été choisis dans sept (7) localités dans le département de Daloa suite à une prospection de terrain réalisée en Avril 2019. Conformément aux objectifs de l'étude, il s'est agi d'anciens vergers de cacaoyers (Figure 14 A) et de caféiers (Figure 14 B) d'accès facile et suffisamment grandes pour y délimiter une parcelle utile d'au moins 1 hectare de superficie. L'occupation du sol ainsi que les coordonnées géographiques des sites de l'étude sont resumées dans le tableau IV.

Tableau IV : Occupations du sol et coordonnées géographiques des sites de l'étude

Sites	Occupations du sol	Latitudes	Longitudes
Bla	Caféière	N6°43'58"	W6°29'37"
Daloa ville	Caféière	N6°55'03"	W6°22'10"
Loboguiguia	Caféière	N6°47'45"	W6°37'18"
Madoguhé	Caféière	N7°03'77"	W6°29'18"
Gonaté	Cacaoyère	N6°53'41"	W6°16'13"
Wandaguhé	Cacaoyère	N6°50'51"	W6°24'55"
Zépréguhé	Cacaoyère	N6°54'31"	W6°22'10"

La parcelle de Loboguiguia est située sur un plateau à faible pente (7 à 8 pc) ; celles de de Bla, Daloa, Gonaté, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé sont quant à elles sur des plateaux à pente très faible (< 7 pc). Le micro relief de l'environnement immédiat des parcelles est dominé par les termitières (Figure 15).

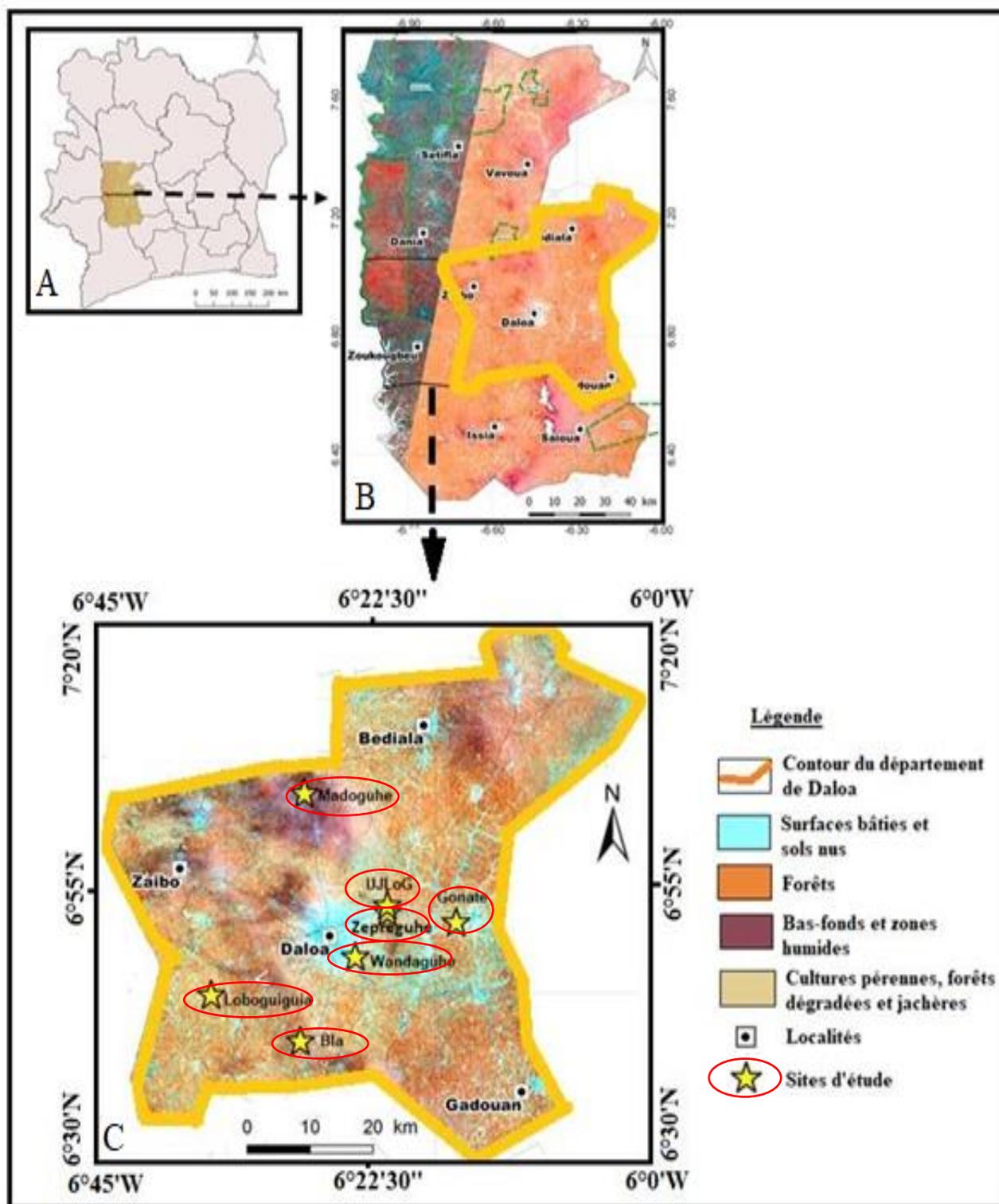


Figure 13 : Cartes montrant la localisation géographique de la zone et des sites de l'étude extraites des images Landsat TM couvrant la zone d'étude

A : Carte de la Côte d'Ivoire ; B : Carte de la région du Haut-Sassandra montrant ; C : Carte du département de Daloa montrant les sites de l'étude.



Figure 14 : Anciens vergers

A : cacaoyer ; B : caféier.

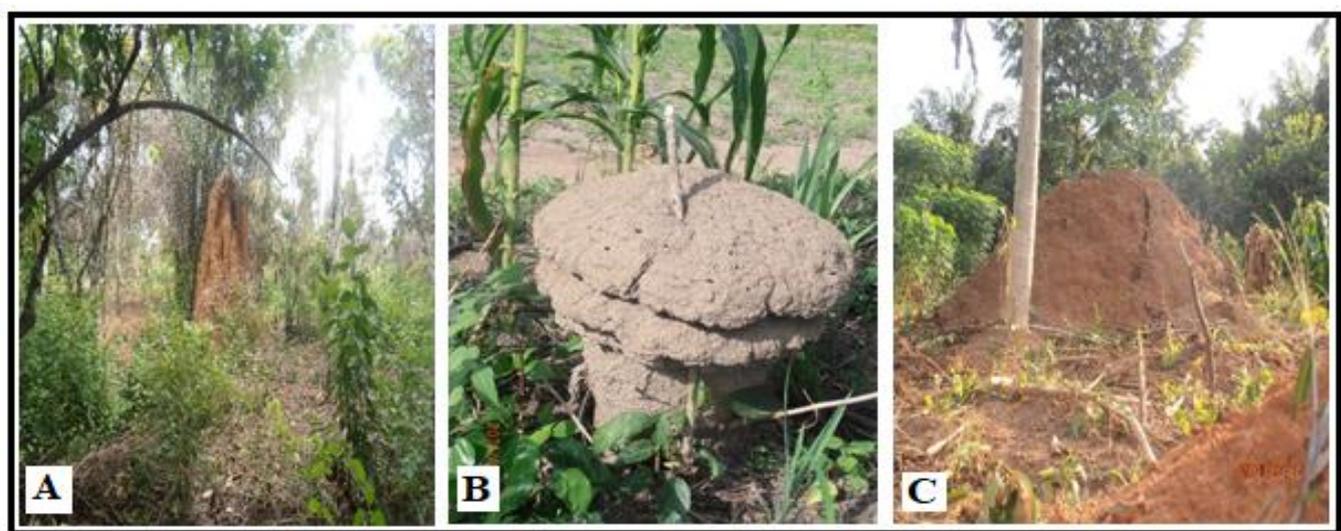


Figure 15 : Quelques termitières observées sur les sites

A : à Bla ; B : à Madoguhé ; C : à Zépréguhé.

L'environnement des sites est diversement occupé. En effet, les parcelles de Bla, Gonaté, Wandaguhé et Zépréguhé sont bordées par des plantations de cacaoyers en exploitation (Figure 16 A), d'anacardier, d'hévéa et des champs de vivriers (igname, maïs, gombo) (Figure 16 B).

À Madoguhé et Loboguiguia, on rencontre une forêt secondaire (Figure 16 C) et des affleurements de cuirasses latéritiques (Figure 16 E). Quant à la parcelle de Daloa (UJLoG), le voisinage immédiat est occupé par un campement (Figure 16 F), des cultures de vivriers et une étendue de graminées.

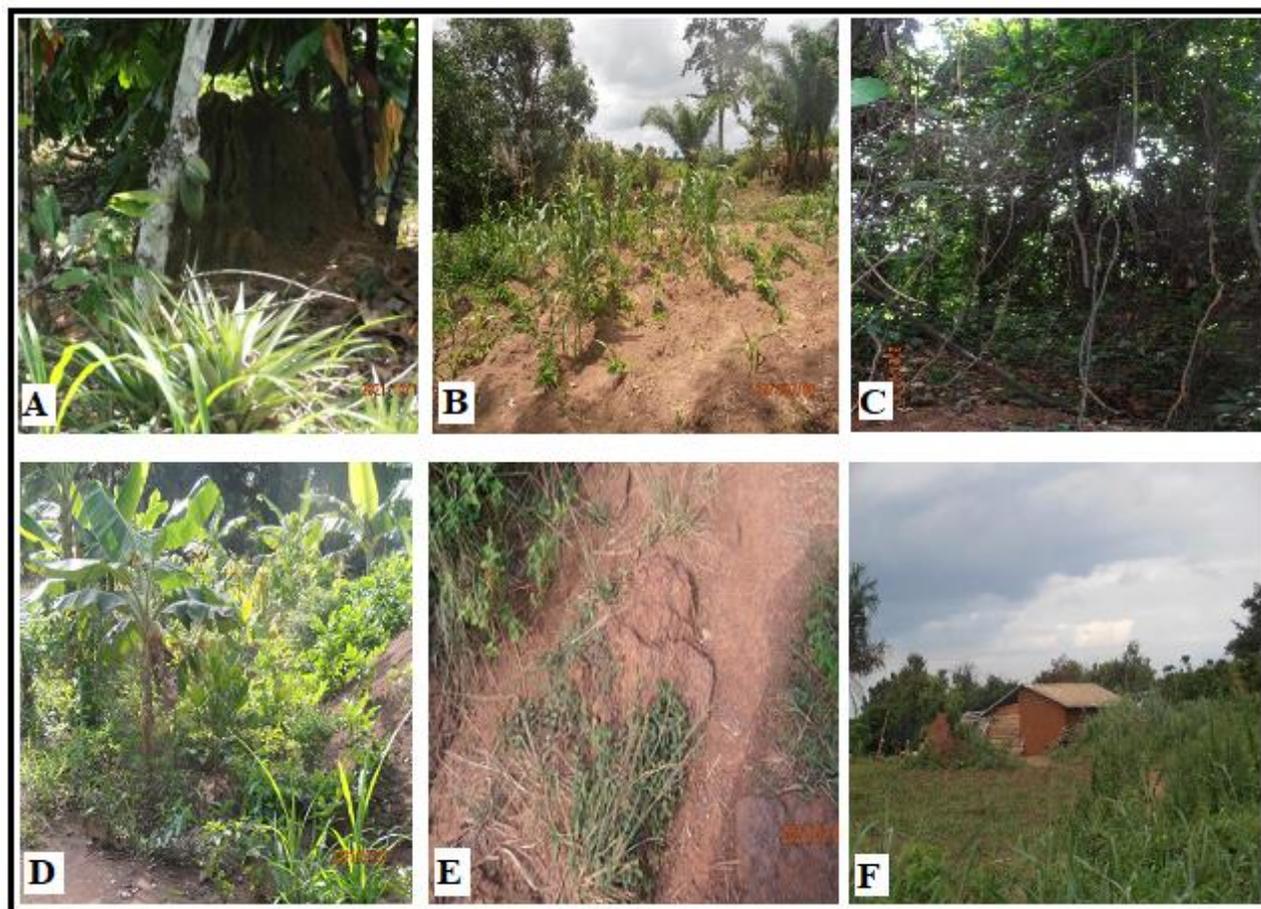


Figure 16 : Quelques occupations du sol de l'environnement des parcelles

A : cacaoyère ; B : cultures d'igname associées au maïs ; C : forêt secondaire ; D : cultures d'anacardier associées au bananier ; E : affleurement de cuirasse latéritique ; F : campement.

II.1.2. Matériel utilisé

II.1.2.1. Matériel édaphique

Le matériel édaphique a rassemblé 63 échantillons de sol, soit neuf (9) échantillons par parcelle, qui ont servi à déterminer les propriétés physico-chimiques des sols au laboratoire. Certains de ces échantillons sont représentés sur la figure 17.



Figure 17 : Quelques échantillons de sol collectés

II.1.2.2. Matériel technique

La collecte sur le terrain des échantillons de sol et de la macro faune du sol d'une part et l'analyse au laboratoire des échantillons de sol d'autre part, ont nécessité l'utilisation d'un matériel technique constitué de divers outils. Dans cet ensemble, figure aussi le matériel informatique utilisé pour traiter les données.

II.1.2.2.1. Matériel de terrain

Sur le terrain, un GPS (Système de positionnement mondial) Garmin 12 (Figure 18 A) a servi à relever les coordonnées géographiques (longitudes et latitudes) des parcelles et des fosses et un appareil photo numérique de marque Olympus (Figure 18 B) a été utilisé pour les prises de vue. Aussi, des machettes ont-elles permis non seulement d'ouvrir des layons et de délimiter les parcelles, mais aussi, de trancher les différentes strates des monolithes de sol. Pour creuser les fosses pédologiques et les monolithes de sol sur les parcelles, ce sont des pelles et des pioches (Figure 18 C) qui ont été utilisées. Un couteau de pédologue a permis de délimiter au besoin les horizons et de prélever les échantillons de sol.

Pour décrire les horizons, un ensemble d'outils a été utilisé, notamment un code Munsell (Figure 18 E) pour déterminer la couleur du sol, un décimètre (Figure 18 F) pour toutes les

opérations de mesure de distance et de l'eau pour humidifier des échantillons de sol en vue d'en apprécier la texture.

Par ailleurs, des quadra (50 cm x 50 cm) en bois (Figure 18 G) ont servi à délimiter les monolithes de sol, quand des plateaux (Figure 18 H) et des piluliers (Figure 18 I), de l'alcool (70 pc) et du formol (4 pc) (Figure 18 J) servaient à la collecte et à la conservation des macro-invertébrés des différentes strates des monolithes. Des gants et cache-nez ont servi d'équipements de protection contre les produits chimiques utilisés.



Figure 18 : Quelques outils et produits chimiques utilisés sur le terrain

A : GPS ; B : appareil photo ; C : pioche et pelle ; D : sachets plastiques ; E : code Munsell ; F : mètre ruban ; G : quadra ; H : plateau ; I : piluliers ; J : produits chimiques.

II.1.2.2.2. Matériel de laboratoire

Au laboratoire, le matériel utilisé est divers. Il comprend :

- du papier journal pour le séchage des échantillons de sols ;
- un tamis de maille 2 mm pour tamiser les échantillons séchés ;
- des sachets plastiques pour conditionner la terre fine et les éléments grossiers issus du tamisage des échantillons séchés ;

- une balance électronique pour déterminer les masses des différentes fractions de sol ;
- des produits chimiques, notamment : de l'acide sulfurique et l'examétophosphate de soude pour l'analyse granulométrique, le dichromate de potassium et l'acétate d'ammonium pour extraire les cations, l'acide chlorhydrique pour déterminer la teneur en carbonate ;
- des tubes à essai pour contenir les différents échantillons de sol à analyser ;
- des pipettes pour le prélèvement des produits chimiques ;

un spectromètre d'absorption atomique, un spectromètre de masse et une pipette de Robinson ont permis de déterminer respectivement les taux des bases échangeables, des oligo-éléments et la granulométrie.

II.1.2.2.3. Matériel informatique

Le traitement de l'ensemble des données collectées a été effectué en utilisant un ordinateur portable de marque LENOVO équipé d'un logiciel R version 3.6.3, d'un tableur Excel 2016 et d'un opérateur de saisie WORD 2016.

II.2. MÉTHODES

Cette partie de l'étude est consacré aux approches techniques et scientifiques adoptées pour l'obtention des résultats. L'exposé de ces démarches méthodologiques est fait en tenant compte de l'enchaînement des différentes activités menées au cours de l'étude.

II.2.1. Détermination des propriétés morphologiques, physico-chimiques et biologiques des sols

II.2.1.1. Caractérisation morphologique des sols

Cette étude a nécessité la mise en place d'un dispositif de prospection des sols sur chaque parcelle selon sa topographie. Des fosses pédologiques ont été positionnées, ouvertes puis décrites et enfin des échantillons de sol ont été prélevés de chaque fosse.

II.2.1.1.1. Description du dispositif de prospection des sols

L'étude pédologique a été réalisée dans chaque plantation prospectée sur une parcelle utile de 10000 m². La pente topographique (α) est calculée selon l'équation 1 en faisant le rapport de la différence d'altitudes des deux points extrêmes de la plantation (plus bas et plus haut) sur la distance horizontale séparant ces deux points (Figure 19) :

$$\alpha \text{ (pc)} = (\Delta h/l) \times 100 \quad (1)$$

Où :

- α est la pente topographique (pc) ;
- Δh est la différence d'altitudes entre les deux points extrêmes (en mètre) ;
- l la est la distance horizontale séparant les points extrêmes (en mètre).

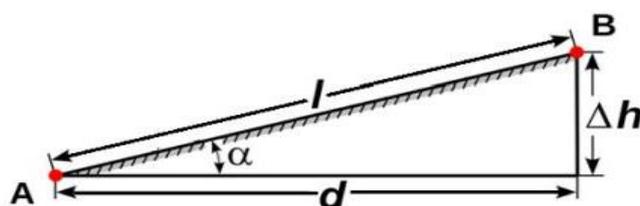


Figure 19 : Dispositif du calcul de la pente du topographique

Lorsque la topographie de la parcelle est quasi-plane (pente < 7 pc) et que l'histoire culturelle de celle-ci est identique en tout lieu, l'état de vigueur de la végétation (croissance, développement et état sanitaire, infestation en adventices ou en parasites) traduit en général

mieux la nature du sol sous-jacent (Freschet *et al.*, 2018). Les fosses pédologiques, au nombre de trois (3) par site, sont alors implantées dans la parcelle utile suivant une séquence déterminée par la diversité constatée au niveau du couvert végétal. Cette situation était conforme à l'état de surface de tous les sites de l'étude excepté celui de Loboguiguia. En effet, sur ce site caractérisé par une pente faible, mais non négligeable (7-8 pc), l'emplacement des trois fosses pédologiques était guidé par la méthode des toposéquences fondée sur le principe qu'il existe une relation étroite entre le modelé d'une région et les différents types de sols décrits (Yao-Kouamé, 2008). L'étude morpho-pédologique est donc réalisée le long d'une ligne perpendiculaire aux courbes de niveau. Dans le cas présent, les fosses ont été ouvertes suivant les positions préférentielles de haut de versant, de mi de versant et de bas de versant. Le tableau V fait la synthèse des niveaux de stratification du dispositif de prospection pédologique mis en place.

Tableau V : Niveaux de stratification du dispositif de prospection pédologique

Pentes	Critères d'emplacement des fosses	Emplacement des fosses
7-8 pc	Selon le niveau topographique	- F1 en haut de versant - F2 à mi versant - F3 au bas de versant
< 7 pc	Selon l'état de vigueur des plantes	- F1 dans un secteur où les plantes sont vigoureuses - F2 dans un secteur où les plantes sont peu vigoureuses - F3 dans un secteur où les plantes sont non vigoureuses

II.2.1.1.2. Emplacement et ouverture des fosses pédologiques

Quelle que soit la topographie du sol, les séquences des fosses, longues chacune de 140 m, ont été disposées suivant la diagonale de la parcelle utile de 10000 m² orientée dans le sens Est-Ouest. La première fosse (F1) était positionnée à 15 m de la limite de la parcelle pour éviter les effets de bordures, une distance de 55 m la séparait de la deuxième fosse (F2), elle-même distante aussi de 55 m de la troisième et dernière fosse (F3) (Figure 20).

Toutes les fosses positionnées ont été ouvertes. Chaque fosse ouverte était profonde, longue et large respectivement de 120, 100 et 100 cm en cas d'absence d'obstacles infranchissables, notamment au niveau de la profondeur (Figure 21).

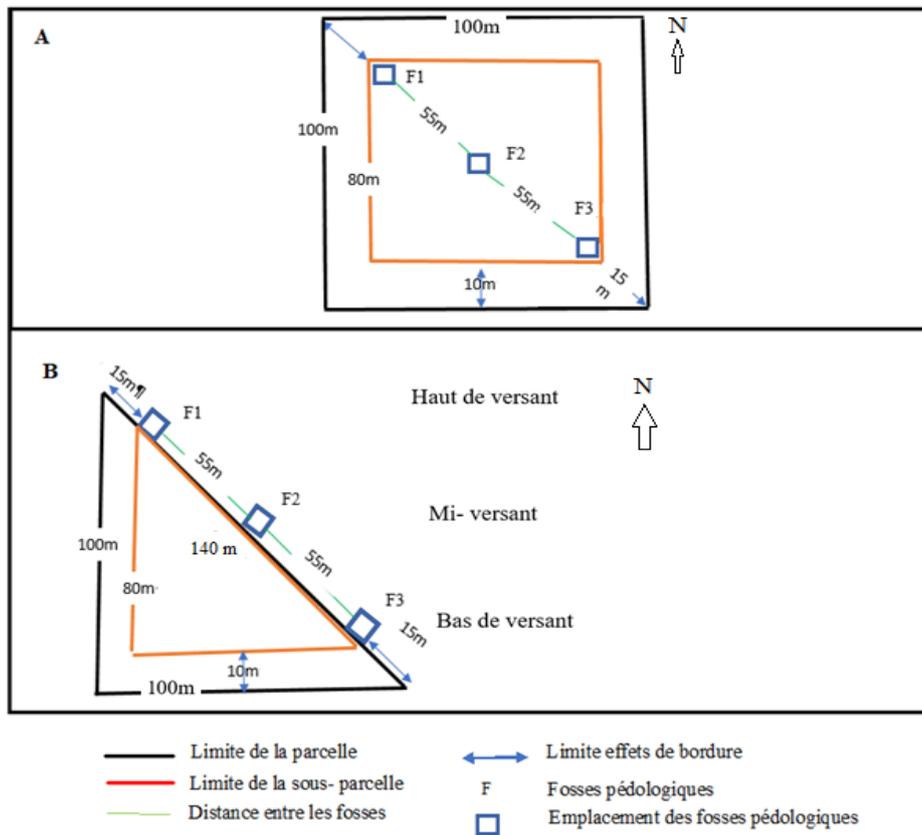


Figure 20 : Dispositifs utilisés pour l'emplacement des fosses

A : selon la séquence des couvertures végétales ; B : selon la toposéquence.

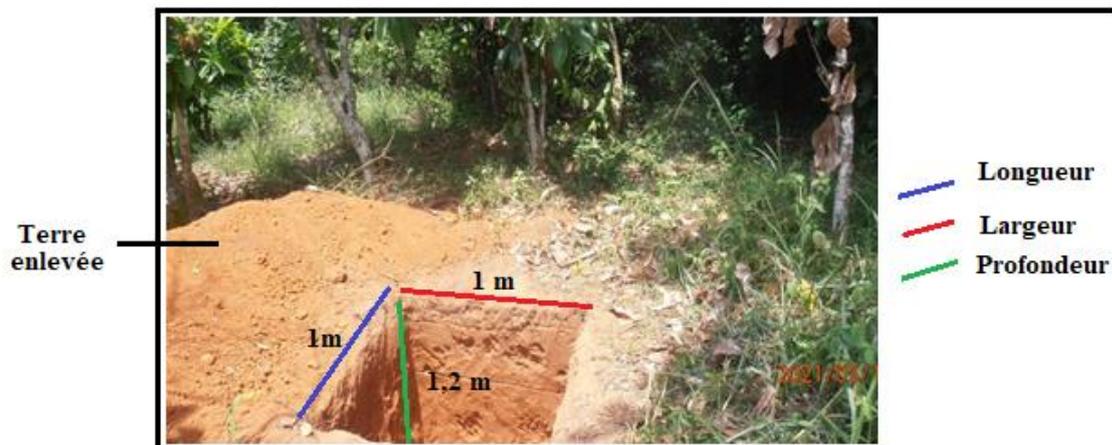


Figure 21 : Fosse pédologique

II.2.1.1.3. Description des propriétés morphologiques et échantillonnage du sol

Les observations au niveau de chaque fosse ont consisté à identifier visuellement les différents horizons. Pour chaque horizon, l'épaisseur a été déterminée à l'aide du décimètre, la couleur par le code Munsell, la texture par la méthode tactile en réalisant un boudin de terre

humide et un anneau avec le boudin : le sol est plus argileux quand le boudin se forme aisément et sableux quand on ne peut le former. La structure générale du sol et celle du débit de l'horizon a été déterminée également par observation visuelle des faces d'un échantillon de sol prélevé et cassé en morceaux. Par ailleurs, la compacité et la cohésion générale de l'horizon ont été estimées par le test de pénétration, qui consiste à enfoncer un couteau de pédologue au droit de l'horizon et à estimer la facilité avec laquelle le couteau pénètre le sol : le sol est plus compact quand l'opérateur fournit plus d'effort. Aussi, par une observation visuelle, la présence de matière organique a été appréciée dans le sol (l'horizon est plus humifère quand sa coloration est plus sombre) ainsi que la présence d'activité biologique (faune, racine). La porosité et la perméabilité de l'horizon ont été déterminées en appréciant la vitesse d'infiltration d'une goutte d'eau mise sur une motte de terre, le sol étant plus perméable quand l'eau s'infiltré plus rapidement. Par le repérage de taches de rouille au niveau de l'horizon, occasionnée par la stagnation de l'eau, la qualité de drainage y a été évaluée. Toutes les caractéristiques décrites au niveau d'un horizon donné ont permis de déduire son type : organique, organo-minéral ou minéral.

Cette première phase de terrain a été réalisée de mi-Septembre à mi-Novembre (période de la petite saison des pluies), profitant de l'humidité du sol pour faciliter l'ouverture des fosses pédologiques. Il s'est agi aussi au cours de la description des fosses, de constituer trois (3) échantillons composites de sol par fosse, prélevés du fond de la fosse vers la surface, entre 120 et 80 cm, 80 et 40 cm et 40 et 0 cm. Ainsi, neuf (9) échantillons de sol par parcelle, soit 63 échantillons sur l'ensemble des sept (7) parcelles, ont été constitués. Ces échantillons séchés ont été étiquetés et conservés dans des sachets en plastique pour des analyses physico-chimiques.

II.2.1.2. Détermination des propriétés physico-chimiques des sols

II.2.1.2.1. Préparation des échantillons des sols pour des analyses au laboratoire

La préparation des échantillons des sols pour les analyses a consisté à les sécher pendant sept (7) jours à l'air libre sous abri sur du papier journal. À l'aide d'une balance électronique, 1000 g de chaque échantillon séché ont été prélevés puis tamisés à l'aide d'un tamis de maille 2 mm pour séparer la terre fine des éléments grossiers. Ensuite, 500 g de terre fine de chaque échantillon tamisé ont été collectés dans un sachet en plastique étiqueté puis envoyés au laboratoire pour des analyses physico-chimiques.

Les refus restés dans le tamis ont permis de déterminer le taux en éléments grossiers (EG) de chaque échantillon en utilisant l'équation 2 :

$$EG (pc) = (MR/MT) \times 100 \quad (2)$$

Avec :

- EG : Taux ou charge en éléments grossiers (en pour cent) ;
- MT : Masse totale de l'échantillon séché (en gramme) ;
- MR : Masse du refus après tamisage (en gramme).

II.2.1.2.2. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont porté sur les 63 échantillons composites constitués au cours de la phase de terrain. Elles ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Végétaux et des Sols (LAVESO) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro. Les paramètres et leurs méthodes de détermination sont consignés dans le tableau VI.

Tableau VI : Paramètres physico-chimiques et méthodes de détermination

Paramètres	Méthodes
pH (1 : 2,5; Sol : Eau)	pH-mètre à électrode de verre (Diack & Loum, 2014)
Carbone organique (C)	Walkley & Black (Hilhort & Balendonck, 1999)
Matière organique	MO = 1,72xC
Azote total (Nt)	Kjeldahl modifiée (Diack & Loum, 2014)
Phosphore assimilable	Olsen modifiée (Hilhorst & Balendonck, 1999)
Calcium (Ca ²⁺)	Spectrométrie d'absorption atomique (Pansu & Gautheyrou, 2003)
Magnésium (Mg ²⁺)	
Potassium (K ⁺)	
Sodium (Na ⁺)	
Somme des bases (Sbe)	Sbe = Ca ²⁺ +Mg ²⁺ + K ⁺ +Na ⁺
Taux de saturation en bases (V)	V = Sbe/CEC
CEC	Kjeldahl modifiée (Diack & Loum, 2014)
Fer (Fe ²⁺)	Spectrométrie de masse (Lund <i>et al.</i> , 1999)
Cuivre (Cu ²⁺)	
Manganèse (Mn ³⁺)	
Zinc (Zn ³⁺)	
Sable	Granulométrie Pipette de Robinson (Douzals, 2000)
Limons	
Argile	

À la fin de ce processus, les taux de sables, de limons et d'argiles obtenus ont été projetés sur le triangle textural du sol de l'USDA (Figure 22) pour déterminer de façon précise les textures des sols.

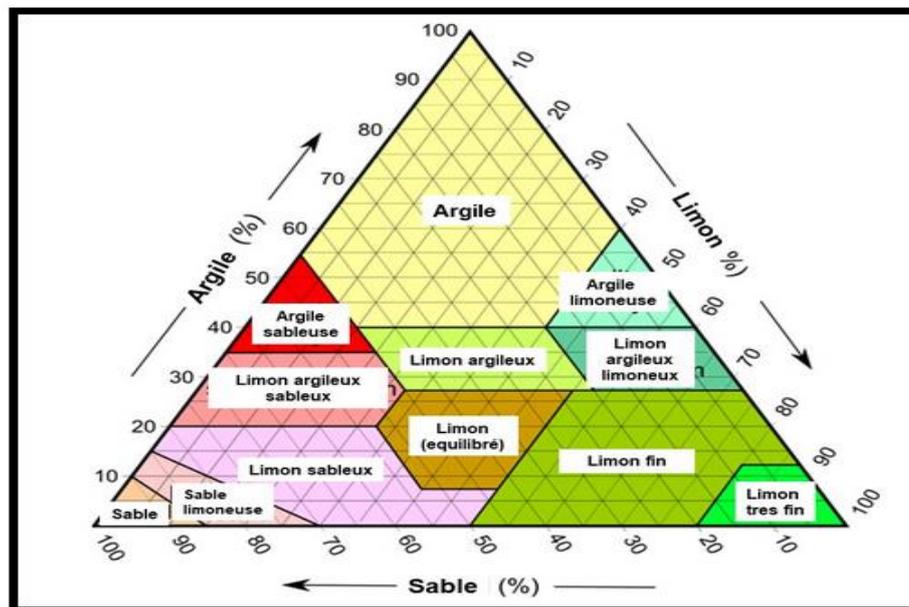


Figure 22 : Triangle textural de l'USDA

Source : <https://smallholder-sha.org/bienvenue/soil-texture/>

II.2.1.3. Etude de la macrofaune du sol

L'étude de la macrofaune du sol a débuté par une phase de terrain, juste une semaine après l'étude pédologique de terrain. Elle a duré environ un mois et demi. Les parties qui suivent décrivent le dispositif de collecte mis en place ainsi que le mode de collecte employé.

II.2.1.3.1. Description du dispositif de collecte

Pour la collecte de la macrofaune du sol, le dispositif représenté par la figure 23 a été installé à l'intérieur de chaque parcelle utile de 10000 m² ayant servi précédemment à l'étude pédologique. Ce dispositif couvre une sous parcelle de 80x80 m² afin de minimiser les effets de bordure.

Un transect, long de 20 m et débutant à un (1) m de la première fosse pédologique (F1), est tracé suivant la séquence des fosses pédologiques pour servir de ligne directrice à l'implantation de quatre (4) monolithes. Une distance de 10 m sépare les deux premiers monolithes (M1 et M2) tandis que les autres (M2 à M4) sont distants de 5 m, à l'image de la stratégie d'échantillonnage appliquée par Guéi *et al.* (2019), laquelle stratégie est inspirée de la méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility). Le principe de cette méthode est de réaliser un échantillonnage de la macrofaune (larves ou adultes) du sol comprise dans un

monolithe de sol (Figure 24) de 50 cm de côté et 40 cm de profondeur, scindé en trois (3) strates de 13,33 cm d'épaisseur.

Le monolithe est d'égale épaisseur avec la première couche du sol échantillonnée et analysée au laboratoire Ceci, dans le but de confirmer la description de certains caractères morphophysiques sur cette partie du sol, mais aussi, pour aider à apprécier sur ces 40 premiers cm du sol, l'impact de l'activité de la macrofaune sur la fertilité du sol.

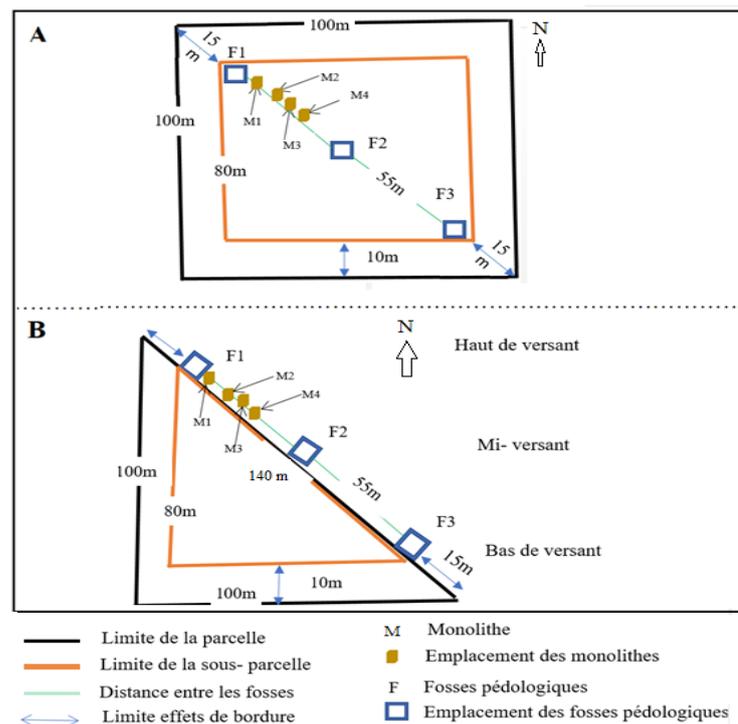


Figure 23 : Dispositifs mis en place pour la collecte de la faune

A : sur les parcelles à topographie plane (pente < 7 pc) ; B : sur la parcelle à pente faible (pente comprise entre 7 et 8 pc).

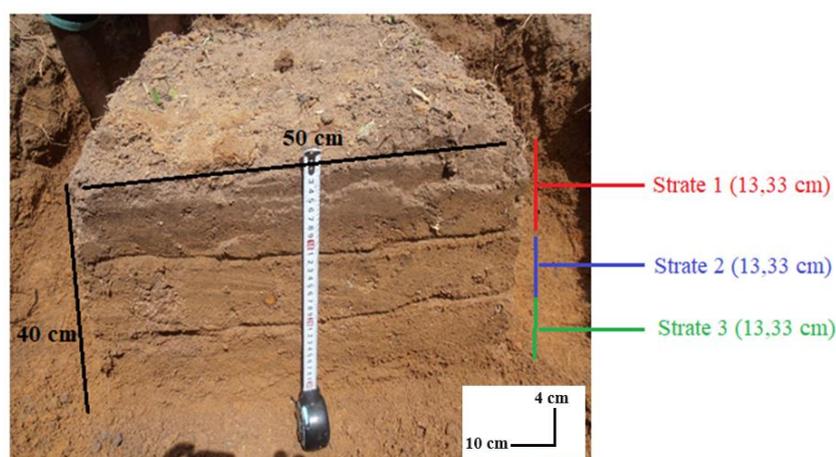


Figure 24 : Monolithe de sol (50x50x40 cm³) scindé en trois strates

II.2.1.3.2. Mode de collecte

Le sol de chaque strate a été recueilli dans un sachet afin d'éviter la fuite des organismes. Les organismes ont été extraits par tri manuel direct (Lavelle, 1978 ; Guéi *et al.*, 2019). Pour ce faire, de petites quantités de terre collectée au niveau d'une strate donnée sont versées progressivement jusqu'à épuisement et étalées sur un plateau en plastique pour faire apparaître la faune du sol qu'elle renferme. Tous les individus aperçus sont prélevés à l'aide d'une pince et conservés dans des piluliers contenant du formaldéhyde dilué à 4 pc pour les vers de terre et de l'alcool à 70 pc pour les autres taxons (termites, fourmis etc.). Les piluliers sont ensuite marqués d'une étiquette renseignant le nom de la parcelle, la date de l'échantillonnage, les numéros du monolithe et de la strate. L'échantillonnage a été réalisé pendant la saison des pluies, période de grandes activités des organismes du sol.

II.2.1.3.3. Isolement et dénombrement

Parmi les macroinvertébrés collectés, seuls les individus des grands groupes taxonomiques des vers de terre, des fourmis et des termites ont été isolés. Les autres macroinvertébrés récoltés et non isolés ont été mis ensemble et ont constitué le groupe des "autres macro invertébrés".

La densité (nombre d'individus par mètre carré) de tous les macroinvertébrés collectés a été déterminée par site en utilisant la formule de l'équation 3 :

$$D = d \times 4 \quad (3)$$

Avec :

- D : Nombre d'individus par mètre carré (individus/m²) ;
- d : nombre d'individus par surface de monolithe (individus/0,25 m²).

II.2.2. Classifications des sols et correspondances CPCS-WRB

La classification selon la CPCS (Aubert, 1965) et la correspondance à la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) des sols ont été faites suite à une synthèse de l'ensemble des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols. Les sols identifiés au niveau d'une même fosse selon les deux types de classifications appliqués ont été considérés comme corrélés ou concordants.

II.2.2.1. Classification CPCS des sols

La classification CPCS a été étendue jusqu'au sous-groupe des sols, après avoir déterminé la classe, la sous-classe et le groupe des sols.

La détermination des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes des sols est survenue suite à une synthèse de l'ensemble des caractéristiques des sols déterminées, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Pour le cas spécifique des sols ferrallitiques dont la présence a été signalée sur les plateaux dans la zone d'étude par Dabin *et al.* (1960), la classification s'est basée sur les critères diagnostics de la classification des sols ferrallitiques (Annexe 1).

Ces critères diagnostics de la classe des sols sont constitués essentiellement par des caractéristiques morphologiques du sol. Les sous-classes (trois au total) sont déterminées exclusivement par des propriétés chimiques du sol. Comme les classes du sol, les groupes (six au total) et les divers sous-groupes du sol sont déterminés essentiellement à partir des critères morphologiques du sol. Certains groupes sont spécifiques à des sous-classes précises des sols.

II.2.2.2. Classification WRB des sols

L'étape 1 de la classification WRB qui en comporte trois (3) au total (Figure 25) consiste à identifier, lors de la description du sol sur le terrain, les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques (Annexe 2) en se servant de la Clé WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). Dans un premier temps, une liste de tous les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques observés est dressée, puis, dans un second temps, seul le critère diagnostique le plus pertinent est retenu. Toutefois, quand une couche satisfait aux critères de plus d'un horizon, propriétés ou matériaux diagnostiques, tous sont considérés comme chevauchants ou concomitants.

Dans l'étape 2, la synthèse obtenue avec les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques est mise en regard de la Clé WRB pour attribuer le sol au Groupe de sols de référence (RSG) approprié (Annexe 3). La première édition de la WRB, publiée en 1998, comprenait 30 RSG ; la seconde publiée en 2006 en comportait 32, tout comme la troisième édition publiée en 2014 et révisée en 2015 que nous avons appliquée.

La dernière étape consiste à attribuer des qualificatifs au RSG.

Le diagramme de la figure 25 montre l'enchaînement des différentes étapes de la classification selon la WRB.

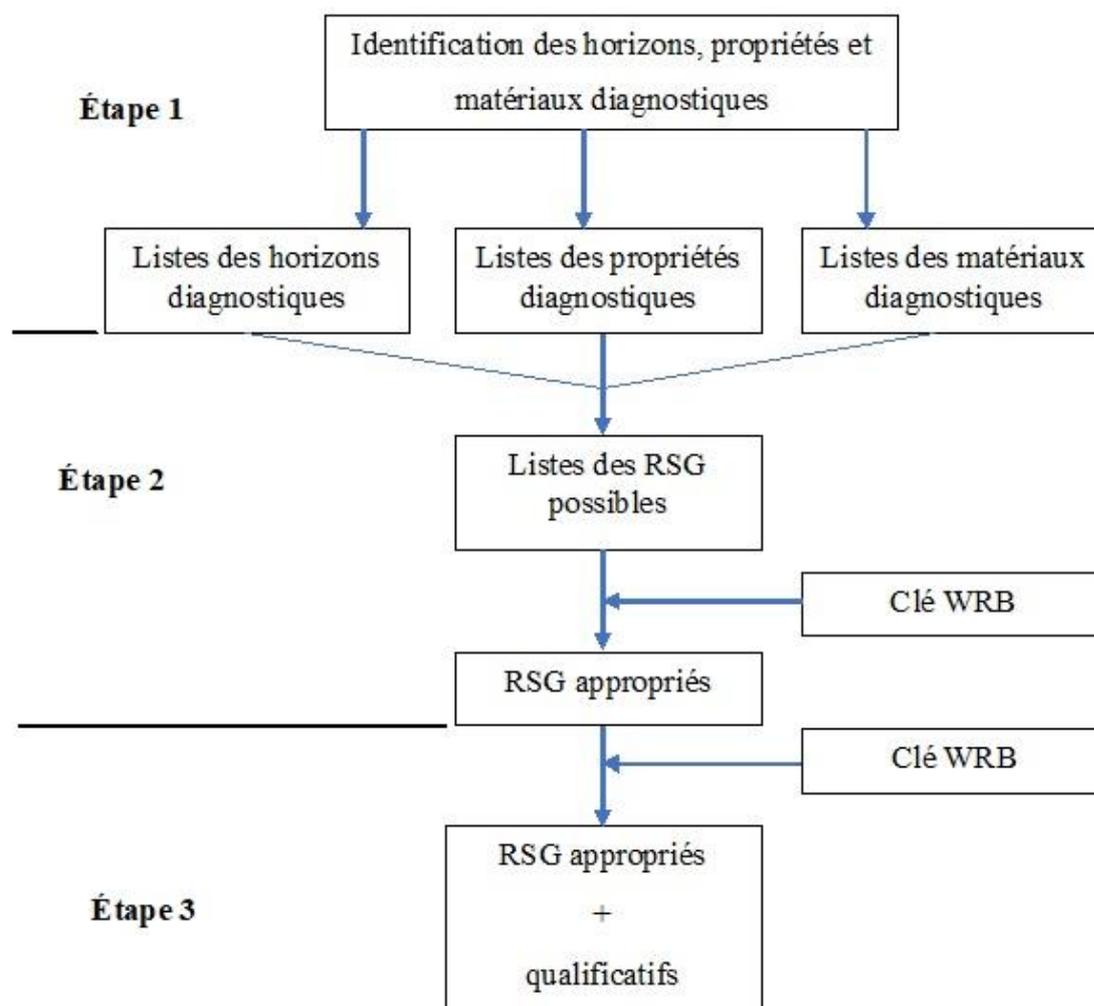


Figure 25 : Diagramme de synthèse du mode d'application de la classification WRB

II.2.3. Analyse du potentiel de fertilité des sols

La présente analyse du potentiel de fertilité des sols étudiés est basée sur le fait que la fertilité du sol en général tient compte de l'expression de ses composantes morpho-physiques, chimiques, biologiques et de l'interaction de ces différentes composantes (Recous *et al.*, 2015).

II.2.3.1. Analyse au regard des propriétés morpho-physiques et du pH du sol

Pour Boyer (1982), parmi les contraintes agronomiques des sols en général, la pente, la profondeur, le taux d'éléments grossiers, le régime hydrique et le pH du sol peuvent impacter la fertilité du sol de façon prépondérante. C'est ainsi que ces propriétés occupent une place de choix dans la présente étude. Les seuils de ces variables fixés par Sys & Verheye (1978) sont présentés dans l'annexe 4.

II.2.3.2. Analyse au regard des teneurs d'éléments minéraux

Les échantillons des sols tropicaux analysés ne libèrent le plus souvent, sous l'action des divers réactifs chimiques, que de faibles quantités d'éléments nutritifs (Pieri & Moreau, 1986). Cette défaillance pouvant être corrigée par des apports de fertilisants chimiques ou organiques, n'est aujourd'hui pas perçue comme un problème majeur à la mise en valeur agronomique. Toutefois, cet aspect de la fertilité des sols a été abordé en étudiant la somme des bases échangeables et le taux de saturation en bases en se référant aux seuils reportés dans le tableau VII. Cependant, la détermination des corrélations ou équilibres existant entre les minéraux du sol peut s'avérer importante pour apprécier le mode de fonctionnement du sol, dont dépend sa fertilité (Zro *et al.*, 2016). En effet, lorsque l'état des équilibres de saturation des minéraux, celui des bases notamment, est non souhaité, des antagonismes et blocages d'absorption de ces minéraux peuvent subsister dans le sol (Doucet, 2006).

La fertilité des sols étudiés, au regard de leurs propriétés chimiques, a été analysée principalement d'une part, relativement aux corrélations existant entre les variables indicatrices de la fertilité chimique des sols (pHeau, carbone, azote total, phosphore, calcium, magnésium, potassium, sodium, cuivre, zinc, manganèse et fer) et les variables explicatives de la fertilité des sols en général (CEC et texture) (Genot *et al.*, 2012).

Tableau VII : Valeurs indicatrices d'interprétation de la somme et du taux de saturation en bases échangeables des sols

Propriétés chimiques	Valeurs des propriétés chimiques et limitation correspondantes				
Sbe (cmol.kg ⁻¹)	< 1,5	1,5 à 3	3 à 6	6 à 12	> 12
	Très faible	Faible	Moyenne	Bonne	Très bonne
V (pc)	-	< 50	50 à 70	> 70	-
	-	Désaturé	Moyennement saturé	Saturée	-

Sources : Keita (2000) et Assa (2005).

D'autre part, l'analyse de la fertilité chimique des sols étudiés a porté sur l'état des équilibres de saturation des bases échangeables dont les seuils sont présentés dans le tableau XIII. L'état de minéralisation et donc de la disponibilité de la matière organique dans le sol a été aussi pris en compte à travers le calcul du rapport C/Nt ; les seuils de ces paramètres sont reportés également dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Equilibres entre minéraux du sol

Rapports	Equilibres entre les minéraux				
	Insuffisant	Acceptable	Optimal	Fort	Trop fort
Ca/Mg	< 1	1-2	2-9	10-30	> 30
Plantes acidiphiles			0,8-5		
K/Mg	< 0,05	0,05-0,10	0,10-0,50	0,5-1	> 1
(Ca+Mg) /K	< 12	12-15	15-30	30-40	> 40
Plantes acidiphiles			6-8		
C/Nt	< 9		9-12	> 12-25	> 25

Sources : Keita (2000), Assa (2005) et Doucet (2006).

II.2.3.3. Analyse de la fertilité au regard de la macrofaune du sol

Les résultats du dénombrement de la macrofaune du sol pour lesquels des seuils n'ont pas été trouvés, ont été considérés comme favorables lorsque les densités calculées sont de plus en plus élevées. La faune étant donc un indicateur de la fertilité des sols, les corrélations qui existent entre elle et les variables explicatives de la fertilité des sols en général (CEC et texture) ont été déterminées.

II.2.3.4. Analyse globale des données et détermination des classes de sols d'égale fertilité

Les traitements statistiques réalisés sont, dans l'ordre : l'analyse de variance ANOVA (analyse de variance univariée), les matrices de corrélations, l'analyse en composante principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique. Tous ces traitements ont été réalisés sous le logiciel R (Version 3.6.3).

II.2.3.4.1. Analyses de variances

Les analyses de variances ou analyses factorielles sont des techniques permettant de savoir si plusieurs variables dépendantes (variables endogènes ou variables à expliquer) sont en relation avec une ou plusieurs variables dites indépendantes (variables exogènes ou variables explicatives). Pour ce faire, toutes les données collectées sur le terrain (pédologiques et biologiques) ont été saisies et codifiées à l'aide du tableur Excel 2016. Ensuite la normalité des distributions des échantillons ainsi que l'homogénéité de leurs variances ou résidus ont été vérifiées respectivement par les tests de Shapiro-Wilk et celui de Levene. Lorsque la variable dont provient l'échantillon suit une loi normale et qu'il y a une homogénéité des variances, une

ANOVA est réalisée. Dans le cas contraire, c'est le test non paramétrique de Kruskal-Wallis qui est appliqué.

Chaque fois que les variables apparaissaient différentes de manière significative, le test « post-hoc » LSD de Tukey était appliqué pour déterminer les groupes homogènes.

II.2.3.4.2. Matrices de corrélations

Les matrices de corrélations ont été réalisées pour identifier les variables significatives intrinsèques au sol qui influencent le fonctionnement des sols étudiés. En d'autres termes, il s'est agi de déterminer le mode de fonctionnement des sols à travers les interactions de leurs différentes variables qui ont été scindées pour l'occasion en deux groupes (Genot *et al.*, 2012) : les variables indicatrices de la fertilité des sols regroupant les éléments fertilisants minéraux et organiques dosés, le pH_{eau} et la densité de la macrofaune collectée et les variables explicatives de la fertilité des sols constituées la CEC et la granulométrie du sol (teneurs en argile, limon et sable). Les corrélations ont été calculées à partir des variables mesurées dans les 40 premiers cm du sol, vu que les couches sous-jacentes n'ont pas fait l'objet d'étude de la faune du sol.

II.2.3.4.3. Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées entre elles, et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales (Baccini, 2010). Ainsi :

- le graphe des variables, permet de visualiser rapidement les corrélations entre les variables de l'étude ;
- le graphe des individus (projection des individus sur le plan factoriel 1x2) permet, quant à lui, de visualiser les corrélations entre les sols des différents sites de l'étude, permettant ainsi à l'opérateur de regrouper ces sols en des sous-ensembles homogènes ; les sols d'un même sous-ensemble présentent des valeurs semblables dans la plupart des variables analysées ;

- la projection, à la fois, des variables et des individus sur le plan factoriel (1x2) permet de déterminer les variables caractéristiques du fonctionnement de chaque sous-ensemble de sol.

II.2.3.4.4. Classification Ascendante Hiérarchique et classes de sols d'égale fertilité

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a, quant à elle, pour principe de créer une partition obtenue en agrégeant deux à deux les éléments les plus proches dans un ensemble d'observations. Les individus sont progressivement réunis selon leur ressemblance mesurée à l'aide d'un indice de similarité ou de dissimilarité (Duchez & Loy, 2005). Au final, la méthode fournit une hiérarchie de partitions se présentant sous la forme de dendrogramme (Aguilar Ibarra, 2004).

L'ACP et la CAH ont porté sur toutes les propriétés du sol déterminées (les propriétés morpho-physiques, minérales et biologiques) sur toute la profondeur des sols étudiés.

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. RÉSULTATS

Le présent paragraphe rapporte les principaux résultats obtenus. Il s'agit : des caractères généraux (morpho-physiques, chimiques et biologiques) des sols étudiés, des classes de sols correspondantes selon la CPCS et la WRB et des classes d'égale fertilité des sols ressorties des différentes analyses de l'ensemble des propriétés de ces sols.

III.1.1. Caractères généraux des sols étudiés

III.1.1.1. Caractéristiques morpho-physiques

Les profils de sols sur tous les sites (sols d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers) ont en général le même niveau du développement (Figure 26). En effet, il s'agit de sols profonds (120 cm au moins) avec des horizons très différenciés (plus de 3 horizons) caractérisés par une altération totale des minéraux primaires pour ce qui concerne les horizons superficiels et subsuperficiels et par la présence d'oxydes de fer et d'aluminium dans l'horizon B. Les horizons superficiels et/ou humifères de ces sols sont en général peu développés (10 à 20 cm) avec une coloration gris-rougeâtre variant de 10R 5/1 à 10R 6/2. Ils sont surmontés d'une litière très mince de feuilles. Ces horizons ont une structure polyédrique à tendance grumeleuse et une texture sablo-argileuse au toucher. Les horizons de profondeur sont plus épais avec des colorations très variées (rouge : 10R 4/8 à 10R 5/6 ; brun rouge clair à rose : 5YR 6/4 à 2,5YR 8/4 ; gris clair : 10R 7/1) et une texture argilo-sableuse ou limono-sableuse au toucher. Leur structure d'ensemble est polyédrique à tendance grumeleuse en surface (horizons A) et subanguleuse en profondeur (horizons B).

Particulièrement à Daloa et à Bla, les horizons subsuperficiels des sols, respectivement, A₁₂ et AB (Figure 26 A) et B₁ (Figure 26 B), sont fortement chargés en éléments grossiers, avec respectivement 83±3,93 pc pour le premier sol et 73±3,22 pc pour le second sol (Tableau XIV). Les horizons sous-jacents de ces couches concrétionnées apparaissent vers 50 à 60 cm de profondeur avec une texture très fine et une structure compacte jusqu'au fond de la fosse située à 120 cm. De grandes taches rouges traduisant une concentration de fer ou de manganèse sont visibles sur leurs faces, mais aussi, sur les faces des horizons concrétionnés à 60 cm de profondeur.

L'horizon B₂ du sol de Wandaguhé (Figure 26 C) situé vers 80 cm de profondeur, a une épaisseur de 40 cm. Il renferme une nappe de gravats quartzeux recouverte par un sol de texture

plus fine. Le taux d'éléments grossiers de cet horizon est estimé à $80 \pm 3,08$ pc. L'horizon B₁ sous-jacent de l'horizon humifère du sol de Loboguiguia (Figure 26 F) est une couche très épaisse à texture plus fine (limono-argileuse). Cet horizon surmonte une couche BC de structure polyédrique subanguleuse, argileuse et épaisse de 45 cm qui commence à 75 cm de la surface du sol. C'est également une couche graveleuse. Les horizons sous-jacents observés à Zépréguhé (Figure 26 G) présentent une charge élevée en concrétions ferrugineuses estimée à $75 \pm 4,00$ pc environ sur 85 cm d'épaisseur (Horizon A₃ à B_{1g}). Le toit de la partie concrétionnée se situe à 35 cm de profondeur. La couche B_{1g} qui apparait vers 60 cm de profondeur présente des signes d'oxydation du fer (taches rouilles) caractéristique d'une hydromorphie temporaire.

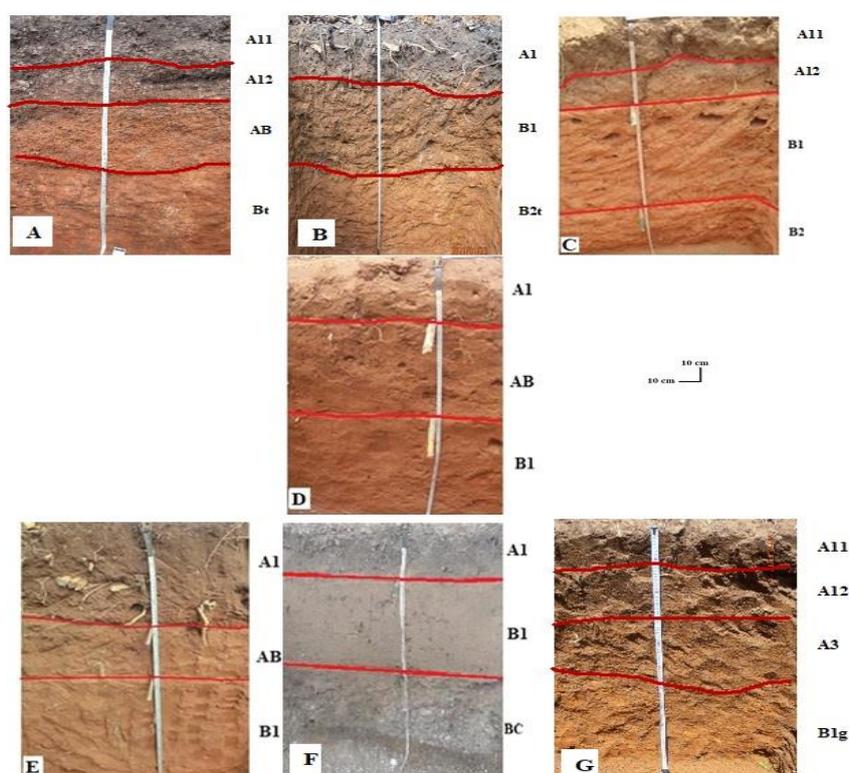


Figure 26 : Profils de sols de plateaux étudiés

- A : sol d'un ancien verger de caféier à Daloa ; B : sol d'un ancien verger de caféier à Bla ; C : sol d'un ancien verger de cacaoyer à Wandaguhé ; D : sol d'un ancien verger de cacaoyer à Gonaté ; E : sol d'un ancien verger de caféier à Madoguhé ; F : sol d'un ancien verger de caféier à Loboguiguia ; G : sol d'un ancien verger de cacaoyer à Zépréguhé.
- A1 ; A11 ; A12 ; A3 ; AB ; B1 ; B2 ; BC ; B1g et Bt : horizons des sols étudiés.

Aussi, l'apparition de la muscovite (minéral primaire) en voie d'altération au fond de la fosse situé à 120 cm est-elle remarquable. Au contraire, sur les sites de Gonaté (Figure 26 D) et Madoguhé (Figure 26 E), les sols sont presque dépourvus de concrétions et de gravats ou

d'autres processus tels que l'hydromorphysation de profondeur et l'induration signalées dans les sols précédents.

Les teneurs moyennes en éléments minéraux fins (sables, limons et argiles) et en éléments grossiers de l'ensemble de ces sols sont reportées dans l'annexe 5. Le tableau IX laisse transparaître les variations de ces paramètres physiques des sols avec la profondeur.

Contrairement aux éléments grossiers, les sables et limons sont concentrés quelques fois différemment de manière significative d'une profondeur à une autre du même sol. Sur tous les sites, et à toutes les profondeurs des sols, les limons suivis par les sables sont dominants, d'où la texture limoneuse ou limono-sableuse (Tableau IX).

Tableau IX : Granulométrie des sols étudiés

Sites	Profondeurs (cm)	Granulométrie				Texture
		Eléments grossiers (pc)	A (pc)	L (pc)	S (pc)	
Bla	0-40	13±0,21b	19,15±0,17a	19,91±2,09a	66,86±1,03b	Limon sableux
	40-80	73±3,22a	19,92±0,31a	21,75±0,9a	58,30±0,3a	Limon sableux
	80-120	6±2,0c	19,26±0,07a	20,11±1,2a	60,29±3,05a	Limon sableux
Dal	0-40	33±2,01b	21,89±5,46a	37,40±2,0a	40,63±13,41a	Limoneuse
	40-80	83±3,93a	11,70±0,6a	38,60±9,12a	48,57±0,3a	Limoneuse
	80-120	3±0,55c	20,46±4,6 a	35,75±5,31a	43,68±23,7a	Limoneuse
Gon	0-40	0,3±0,01a	19,01±0,91a	18,45±0,98a	62,52±1,89b	Limon sableux
	40-80	0,0±0,0a	19,62±1,1a	27,68±0,59b	52,64±0,39a	Limoneuse
	80-120	0,5±0,05a	19,15±0,9a	36,85±2,01c	43,86±3,5a	Limoneuse
Lob	0-40	15±2,0b	20,92±0,44a	18,91±2,33a	60,15±1,03b	Limon argilo-sableux
	40-80	8±1,0b	19,82±0,51a	32,18±0,9a	47,98±2,36a	Limoneuse
	80-120	91±7,0a	19,77±0,6a	36,98±1,20a	43,20±9,56a	Limoneuse
Mad	0-40	74±2,0a	20,46±0,52a	17,96±0,9a	61,56±13,05b	Limon argilo-sableux
	40-80	0,0±0,0b	21,10±0,31a	28,95±11,02ab	49,92±0,3a	Limoneuse
	80-120	0,7±0,03b	19,66±0,31a	37,23±2,6b	42,99±3,6a	Limoneuse
Wan	0-40	10±4,0c	18,15±0,59a	14,89±2,09a	66,92±10,3b	Limon sableux
	40-80	24±2,0b	19,26±0,22a	23±0,9a	57,73±3,90a	Limon sableux
	80-120	80±3,08a	18,90±0,19a	22,97±1,2a	58,10±5,98a	Limon sableux
Zép	0-40	15±4,0b	19,00±0,74a	19,91±10,45a	56,68±0,3b	Limon sableux
	40-80	74±2,0a	19,64±0,26a	21,75± 0,77a	53,34±13,45a	Limon sableux
	80-120	76±4,0a	19,19±0,01a	20,11±1,39a	54,83±0,13a	Limon sableux

- Dal : Daloa ; Gon : Gonaté ; Lob : Loboguiguia ; Mad : Madoguhé ; Wan : Wandaguhé ; Zép : Zépréguhé ; A : Argile ; L : Limon ; S : Sable.
- Pour un site donné, les moyennes d'une même colonne affectée par des lettres différentes sont différentes au seuil de 5 pc.

Sur tous les sites, les sols ne présentent aucune variation significative des taux d'argile en fonction de la profondeur. C'est le cas aussi avec les taux de limon à Bla, à Daloa, à Loboguiguia, à Wandaguhé et à Zépréguhé. Ces mêmes observations ont été faites pour les taux sable à Bla et à Daloa.

Au contraire, les taux de limon varient significativement avec la profondeur à Gonaté et à Madoguhé, tout comme les taux de sable à Gonaté, à Loboguiguia, à Madoguhé, à Wandaguhé et à Zépréguhé.

À Gonaté, les taux de limon augmentent avec la profondeur. Ils sont estimés à $18,45 \pm 0,98$ pc, $27,68 \pm 0,59$ pc et $36,85 \pm 2,01$ pc respectivement pour les profondeurs de 0-40 cm, 40-80 cm et 80-120 cm. En ce qui concerne le site de Madoguhé, ces taux, pour les mêmes profondeurs, valent : $17,9 \pm 0,9$ pc, $28,95 \pm 11,02$ pc et $37,23 \pm 2,6$ pc.

Quant au sable, les taux diminuent avec la profondeur : $62,52 \pm 1,80$ pc ont été dosés dans les 40 premiers cm du sol à Gonaté contre $52,64 \pm 0,39$ pc et $43,86 \pm 3,5$ pc entre 40 et 80 cm, puis entre 80 et 120 cm. Dans le sol de Loboguiguia, ces taux moyens respectifs sont : $60,15 \pm 1,03$ pc, $47,98 \pm 2,36$ pc et $43,20 \pm 9,56$ pc. Dans les sols de Madoguhé et de Wandaguhé, ce sont respectivement $61,56 \pm 13,05$ pc, $49,92 \pm 0,3$ pc et $42,99 \pm 3,6$ pc de sable d'une part, d'autre part, $66,92 \pm 10,3$ pc, $57,73 \pm 3,90$ pc et $58,10 \pm 5,98$ pc de sable qui sont ressortis des horizons 0-40 cm, 40-80 cm et 80-120 cm.

III.1.1.2. Caractéristiques chimiques

Les valeurs moyennes des caractéristiques chimiques de l'ensemble des sols étudiés sont reportées dans l'annexe 6 alors que les variations de ces paramètres avec la profondeur figurent dans le tableau X.

Il ressort que la somme des bases échangeables (Sbe) ne varie pas significativement avec la profondeur surt tous les sites excepté celui de Zépréguhé où l'on a constaté une diminution, à savoir : $2,01 \pm 9,02$; $1,58 \pm 0,21$ et $1,62 \pm 9,02$ cmol.kg⁻¹, respectivement pour les couches 0-40 cm, 40-80 cm et 80-120 cm. Les taux de saturation en bases correspondants (V) sont presque similaires pour les différentes couches du sol de Bla au contraire des sols des autres sites. En général, tous les taux ressortis des couches sont inférieurs à 50 pc sauf la couche 40-80 cm du sol de Daloa qui a affiché un taux de saturation moyen estimé à $58,30 \pm 0,12$ pc.

Les variations (régressions) de l'acidité (pH_{eau}) avec la profondeur sont significatives à Bla et à Zépréguhé. En effet, les pH_{eau} mesurés dans les couches 0-40 cm de ces sols ($5,1\pm 0,05$ à Bla et $5,0\pm 0,05$ à Zépréguhé) font état de sols très acides tandis que pour les couches 40-80 cm et 80-120 cm ($5,25\pm 0,15$ et $5,05\pm 5,00$ à Bla et $5,15\pm 0,01$ et $5,20\pm 2,05$ à Zépréguhé), les sols sont acides. Sur les autres sites d'étude, l'acidité ne varie pas significativement avec la profondeur.

Tableau X : Caractéristiques chimiques des sols de Bla et de Daloa en fonction de la profondeur d'échantillonnage

Sites	Profondeur (cm)	pHeau	Matière organique (%)				P.ass (g.kg ⁻¹)	Complexe absorbant					Oligo-éléments (g.kg ⁻¹)					
			C	Nt	C/Nt	M.O		CEC (cmol.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	V (pc)	Fe ²⁺	Mn ³⁺	Cu ²⁺	Zn ³⁺
Bla		5,10	2,07	0,15	12,81	3,56	44,00	17,00	1,64	0,54	0,06	0,05	2,29	13,47	59,15	93,25	3,10	5,65
	0-40	±0,05	±0,28	±0,08	±1,58	±0,48	±0,52	±1,75	±0,16	±0,05	±0,00	±0,30	±1,75	±0,02	±6,85	±7,16	±0,6	±2,32
		ab	b	c	a	b	b	b	c	a	a	a	a	a	a	a	b	a
	40-80	5,25	0,89	0,08	10,38	1,54	42,22	10,40	1,00	0,46	0,06	0,05	1,57	15,09	53,65	73,15	4,10	6,15
		±0,15	±0,12	±10,0	±1,05	±4,8	±2,50	±5,13	±3,16	±0,09	±0,90	±10,22	±2,13	±0,01	±8,5	±1,6	±0,84	±0,85
		b	a	b	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	b	a
Dal		5,05	0,47	0,05	9,56	0,82	40,80	9,68	0,43	0,40	0,06	0,69	1,58	16,32	45,75	81,80	0,95	2,35
	80-120	±5,00	±0,15	±0,83	±0,87	±0,04	±0,2	±1,75	±1,10	±9,12	±0,01	±0,60	±3,58	±1,20	±5,00	±0,63	±0,31	±3,12
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		5,95	2,63	0,14	18,92	4,53	41,92	10,76	3,05	1,55	0,08	0,07	4,53	42,10	259,70	176,25	5,85	4,90
	0-40	±0,18	±0,33	±0,03	±3,85	±0,58	±1,35	±1,91	±0,11	±0,31	±0,03	±0,00	±0,13	±0,24	±6,54	±7,51	±1,34	±0,04
		a	b	a	a	b	a	a	c	a	a	a	a	b	a	b	a	ab
Dal		5,85	1,63	0,11	15,74	2,81	42,42	7,10	2,65	1,36	0,06	0,07	4,14	58,30	253,80	170,10	6,10	5,03
	40-80	±8,17	±3,31	±0,03	±5,81	±0,00	±5,19	±9,31	±0,19	±0,39	±0,33	±0,50	±0,00	±0,12	±5,46	±5,10	±1,49	±0,46
		a	ab	a	a	ab	a	a	b	a	a	a	a	ab	a	b	a	b
		6,05	1,27	0,14	10,30	2,19	40,55	6,00	1,66	0,81	0,08	0,07	2,62	43,66	241,75	142,05	6,75	4,76
	80-120	±0,81	±6,11	±0,03	±0,18	±3,78	±6,22	±19,13	±0,45	±1,31	±4,03	±0,86	±0,51	±12,3	±0,54	±1,38	±3,40	±10,78
		a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a

- Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable ; Sbe : Somme des bases échangeables ; V : Taux de saturation en bases.

- Dal : Daloa.

- Pour chaque site, les moyennes d'une même colonne affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc pour le test de Tukey.

Tableau XI : Caractéristiques chimiques des sols de Gonaté et de Loboguiguia en fonction de la profondeur d'échantillonnage

Sites	Profondeur (cm)	pHeau	Matière organique (%)				P.ass (g.kg ⁻¹)	Complexe absorbant					Oligo-éléments (g.kg ⁻¹)					
			C	Nt	C/Nt	M.O		CEC (cmol.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	V (pc)	Fe ²⁺	Mn ³⁺	Cu ²⁺	Zn ³⁺
Gon		4,60	1,14	0,12	9,13	1,96	46,72	18,00	1,52	0,55	0,06	0,05	2,18	12,11	89,05	73,65	3,95	8,80
	0-40	±0,21a	±0,17	±0,01	±1,21	±0,29	±1,36	±1,08	±0,18	±0,12	±0,00	±0,00	±0,38	±1,11	±8,92	±15,27	±0,38	±0,59
			b	b	a	b	b	b	a	a	a	a	a	a	b	b	a	a
	40-80	5,05	0,39	0,04	10,07	0,68	42,65	8,08	1,05	0,36	0,06	0,05	1,52	18,81	67,60	20,85	4,45	7,67
		±0,41	±7,17	±0,61	±2,13	±0,29	±1,64	±0,83	±0,00	±0,19	±0,30	±0,90	±0,05	±4,02	±9,29	±2,71	±0,81	±0,92
		a	a	a	a	a	ab	a	a	a	a	a	a	b	ab	a	a	a
Lob		5,15	0,19	0,02	7,31	0,33	42,05	9,70	1,06	0,55	0,07	0,05	1,73	17,83	58,50	41,05	4,25	8,14
	80-120	±1,21	±0,32	±0,10	±1,10	±0,29	±6,45	±2,35	±0,11	±2,09	±5,12	±0,73	±12,8	±6,01	±0,28	±5,17	±2,43	±0,01
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	b	a	ab	a	a
	0-40	5,70	1,15	0,10	11,16	1,97	42,85	19,00	0,90	0,54	0,05	0,04	1,53	8,05	51,75	80,15	4,60	4,72
		±0,27	±0,22	±0,02	±0,11	±0,39	±1,55	±6,82	±0,22	±0,04	±0,00	±0,09	±3,51	±0,89	±3,22	±14,92	±0,64	±0,76
		a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
Lob	40-80	5,75	0,57	0,06	9,62	0,98	41,65	11,58	0,81	0,46	0,05	0,04	1,36	11,82	44,20	123,70	3,75	5,43
		±0,74	±2,20	±0,12	±0,51	±3,95	±5,52	±8,28	±0,92	±0,14	±0,32	±6,01	±0,31	±1,3	±3,08	±1,27	±0,64	±0,61
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a
	80-120	5,65	0,51	0,05	9,60	0,88	40,02	20,00	0,85	0,47	0,05	0,04	1,41	7,05	45,65	84,30	2,95	6,04
	±1,29	±0,17	±9,02	±3,11	±1,15	±1,32	±0,82	±1,02	±4,04	±0,10	±10,00	±5,36	±1,18	±0,22	±9,28	±0,65	±0,16	
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	

- Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable ; Sbe : Somme des bases échangeables ; V : Taux de saturation en bases.
- Gon : Gonaté ; Lob : Loboguiguia.
- Pour chaque site, les moyennes d'une même colonne affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc pour le test de Tukey.

Tableau XII : Caractéristiques chimiques des sols de Madoguhé et de Wandaguhé en fonction de la profondeur d'échantillonnage

Sites	Profondeur (cm)	pHeau	Matière organique (%)				P.ass (g.kg ⁻¹)	Complexe absorbant					Oligo-éléments (g.kg ⁻¹)					
			C	Nt	C/Nt	M.O		CEC (cmol.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	V (pc)	Fe ²⁺	Mn ³⁺	Cu ²⁺	Zn ³⁺
Mad	0-40	4,90	0,92	0,08	11,31	1,59	43,45	6,40	0,97	0,53	0,06	0,04	1,60	2,51	92,65	42,75	4,50	8,64
		±0,08	±0,07	±0,00	±1,90	±0,12	±0,12	±1,38	±0,05	±0,01	±0,09	±0,11	±1,02	±8,01	±5,38	±17,36	±0,41	±0,28
		a	b	b	a	b	c	a	b	b	b	a	a	a	a	a	a	a
	40-80	5,05	0,59	0,04	14,18	1,02	39,55	6,68	0,90	0,48	0,06	0,04	1,48	22,15	82,00	34,50	4,20	8,83
		±0,81	±0,01	±0,00	±9,04	±0,13	±0,42	±3,18	±4,05	±0,13	±0,80	±0,00	±0,01	±0,07	±0,82	±1,37	±0,11	±0,12
		a	a	a	a	a	b	a	b	ab	a	a	a	ab	a	a	a	a
80-120	5,15	0,38	0,037	11,45	0,65	38,67±	8,92	0,69	0,44	0,06	0,04	1,23	13,78	80,20	16,95	5,25	9,05	
	±10,8	±9,27	±0,00	±1,01	±0,86	0,03	±0,08	±0,06	±1,13	±0,07	±0,90	±0,95	±14,05	±3,18	±3,65	±0,02	±8,02	
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	
Wan	0-40	5,00	1,12	0,08	12,85	1,92	41,87	3,80	0,62	0,49	0,07	0,03	1,21	31,84	112,35	36,8	6,15	7,64
		±0,15	±0,08	±0,00	±1,06	±0,14	±0,98	±0,52	±0,09	±0,01	±0,00	±0,07	±6,11	±0,10	±6,89	±7,73	±0,99	±0,18
		a	b	b	a	b	a	a	a	a	a	a	a	b	a	b	a	a
	40-80	5,15	0,53	0,04	11,14	0,92	42,70	5,32	0,79	0,51	0,07	0,03	1,4	26,31	101,15	17,8	6,20	7,67
		±1,5	±0,01	±0,31	±1,63	±0,44	±0,98	±0,22	±0,07	±0,91	±0,21	±0,18	±2,81	±3,15	±1,83	±3,3	±10,19	±0,8
		a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	ab	a	a
80-120	5,20	0,33	0,03	11,16	0,57	43,65	4,92	0,62	0,48	0,07	0,19	1,36	27,64	45,65	6,1	5,25	7,86	
	±0,35	±0,25	±0,28	±0,62	±1,19	±9,85	±0,22	±3,05	±1,01	±0,09	±0,73	±0,00	±0,32	±0,96	±0,36	±0,01	±3,82	
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	

- Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable ; Sbe : Somme des bases échangeables ; V : Taux de saturation en bases.
- Mad : Madoguhé ; Wan : Wandaguhé.
- Pour chaque site, les moyennes d'une même colonne affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc pour le test de Tukey.

Tableau XIII : Caractéristiques chimiques du sol de Zépréguhé en fonction de la profondeur d'échantillonnage

Sites	Profondeur (cm)	pHeau	Matière organique (%)				P.ass (g.kg ⁻¹)	Complexe absorbant						Oligo-éléments (g.kg ⁻¹)				
			C	Nt	C/Nt	M.O		CEC (cmol.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	V (pc)	Fe ²⁺	Mn ³⁺	Cu ²⁺	Zn ³⁺
Zép	0-40	5,00	1,12	0,10	11,37	1,92	43,07	16,25	1,26	0,61	0,07	0,07	2,01	12,40	260,55	149,5	6,90	4,57
		±0,05	±0,07	±0,01	±0,54	±0,13	±1,80	±3,32	±0,12	±0,08	±0,00	±0,02	±9,02	±3,31	±6,02	±11,96	±0,90	±0,10
		b	a	a	ab	b	a	a	a	a	b	a	b	a	b	b	a	a
	40-80	5,15	0,55	0,05	10,20	0,95	43,17	9,7	0,92	0,53	0,06	0,07	1,58	16,28	247,05	97,4	6,90	4,52
		±0,01	±0,00	±0,73	±0,64	±0,36	±1,00	±0,30	±0,18	±8,02	±0,32	±0,10	±0,21	±0,07	±0,27	±9,16	±0,10	±0,12
	80-120	5,20	0,45	0,03	13,08	0,78	40,07	7,1	0,89	0,56	0,06	0,11	1,62	22,81	239,50	132,0	6,95	4,46
±2,05		±5,01	±6,01	±0,41	±1,36	±1,10	±1,01	±8,10	±3,02	±1,04	±2,30	±9,02	±1,10	±1,02	±1,09	±4,10	±1,0	
a		b	a	b	a	a	a	a	a	ab	a	a	b	ab	a	a	a	

- *Nt* : Azote total ; *MO* : Matière organique ; *P.ass* : Phosphore assimilable ; *Sbe* : Somme des bases échangeables ; *V* : Taux de saturation en bases.
- *Zép* : Zépréguhé.
- Les moyennes d'une même colonne affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc pour le test de Tukey.

III.1.1.3. Caractéristiques biologiques

Les groupes taxonomiques des macro-invertébrés identifiés sont les vers de terre, les termites et les fourmis. Les groupes taxonomiques non identifiés constituent les "Autres macro-invertébrés". Les densités de ces différents macro-invertébrés sont reportées dans le tableau XIV. Elles sont toutes statistiquement similaires entre les sites. Cependant, les tendances suivantes peuvent être soulignées :

- la densité des termites varie de $48 \pm 20,85$ à $152 \pm 29,74$ ind.m⁻², la plus importante densité ayant été obtenue dans le sol de Daloa ($152 \pm 29,74$ ind.m⁻²), suivi des densités des sols de Gonaté ($112 \pm 1,72$ ind.m⁻²), Loboguiguia ($96 \pm 46,63$ ind.m⁻²), Bla ($88 \pm 11,76$ ind.m⁻²), Madoguhé ($64 \pm 34,21$ ind.m⁻²), Wandaguhé ($64 \pm 19,43$ ind.m⁻²) et de Zépréguhé ($48 \pm 20,85$ ind.m⁻²) ;
- la densité des vers de terre est comprise entre $40 \pm 19,35$ et $136 \pm 12,65$ ind.m⁻² ; le sol de Zépréguhé abritant la forte plus densité ($136 \pm 12,65$ ind.m⁻²) et les sols de Gonaté et Loboguiguia, les plus faibles densités avec respectivement $40 \pm 19,35$ ind.m⁻² et $40 \pm 32,5$ ind.m⁻². Entre les deux extrêmes suivent les densités des sols de Wandaguhé ($116 \pm 1,44$ ind.m⁻²), Madoguhé ($104 \pm 1,05$ ind.m⁻²), Bla ($84 \pm 27,77$ ind.m⁻²) et Daloa ($80 \pm 3,65$ ind.m⁻²).
- le sol de Zépréguhé abrite la plus forte densité de fourmis estimée à $88 \pm 42,66$ ind.m⁻², suivi des sols de Madoguhé, Loboguiguia avec des densité respectives de $60 \pm 23,86$, de $48 \pm 10,45$ et de $32 \pm 25,57$ ind.m⁻². Les autres sols (Daloa, Gonaté et Wandaguhé) qui abritent une densité de 20 ind.m⁻² de fourmis sont les moins fournis en cette faune ;
- les "Autres macro-invertébrés" (coléoptères, myriapodes etc.) présentent des densités plus importantes dans les sols de Daloa ($36 \pm 7,45$ ind.m⁻²) et Bla ($28 \pm 8,54$ ind.m⁻²) alors que leur densité est moins marquée à Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé et surtout à Gonaté ($12 \pm 4,29$ ind.m⁻²) et Loboguiguia ($8 \pm 6,14$ ind.m⁻²).

Tableau XIV : Densités des taxons des macro-invertébrés collectés dans les 40 premiers cm des sols

Taxons collectés	Densités des taxons collectés (ind.m ⁻²) par sites							P
	Bla	Daloa	Gonaté	Loboguiguia	Madoguhé	Wandaguhé	Zépréguhé	
Termites	$88 \pm 11,76a$	$152 \pm 29,74a$	$112 \pm 1,72a$	$96 \pm 46,63a$	$64 \pm 34,21a$	$64 \pm 19,43a$	$48 \pm 20,85a$	0,05
Vers de terre	$84 \pm 27,77a$	$80 \pm 3,65a$	$40 \pm 19,35a$	$40 \pm 32,56a$	$104 \pm 1,05a$	$116 \pm 1,44a$	$136 \pm 12,65a$	0,05
Fourmis	$32 \pm 25,57a$	$20 \pm 12,22a$	$20 \pm 11,74a$	$48 \pm 10,49a$	$60 \pm 23,86a$	$20 \pm 14,25a$	$88 \pm 42,66a$	0,05
Autres macro-invertébrés	$28 \pm 8,54a$	$36 \pm 7,45a$	$12 \pm 4,29a$	$8 \pm 6,14a$	$16 \pm 4,22a$	$20 \pm 10,01a$	$16 \pm 4,77a$	0,05

Les moyennes alignées et affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc pour le test de Tukey ; ind.m⁻² : individus par m² de sol ; p : probabilité.

III.1.1.4. Variabilité des propriétés des sols

La variabilité des propriétés des 40 premiers cm des sols est présentée dans le tableau XV. Le tableau montre que le taux d'éléments grossiers et certaines propriétés chimiques des sols (C ou MO, Ca, Na, V, Fe et Mn) sont particulièrement très variables spatialement, autant que les densités de fourmis. En effet, les coefficients de variation de ces différents paramètres des sols étudiés sont tous supérieurs à 50 pc.

À la suite de ces variables, le magnésium, la somme des bases échangeables, la CEC et le taux de cuivre présentent des coefficients de variation évoluant de 30 à 50 pc. Le sable, l'azote, le rapport C/Nt, le zinc, les densités des termites et des vers de terre sont caractérisées par des variabilités moins élevées (CV compris entre 10 et 30 pc) que les paramètres précédents, mais plus importantes que celle de l'argile, du pH_{eau} , du phosphore et du potassium (CV inférieur à 10 pc).

Dans les cas particuliers de propriétés avérées comme faisant partie des plus et moins variables spatialement, à savoir, C ou MO du sol, V, Ca et Na, Fe, Mn et la densité des fourmis d'un côté, puis l'argile, le pH_{eau} , le phosphore et le potassium de l'autre côté, il ressort des résultats précédents que, relativement aux concrétions, les sols de Daloa, Loboguiguia, Bla, Wandaguhé et Zépréguhé constituent le groupe le plus fourni (taux ≥ 75 pc) quand ceux de Gonaté et Madoguhé forment le groupe le moins fourni (taux ≤ 10 pc). Les taux de matière organique (MO) décroissent respectivement du sol de Daloa de $3,18 \pm 1,21$ pc pour atteindre $1,28 \pm 0,66$ à $0,99 \pm 0,80$ pc dans le groupe constitué par les sols de Gonaté, Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé. Le sol de Bla ($1,97 \pm 1,33$ pc) se situe à une position intermédiaire de ces deux groupes de sols. Cette distinction est peu différente des observations faites avec le pH_{eau} et les teneurs en phosphore assimilable du sol, qui ont révélé deux groupes homogènes chacun.

Le sol de Daloa, avec un pH_{eau} de $5,9 \pm 0,21$, s'avère être significativement moins acide que les autres sols (Bla, Gonaté, Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé) dont les pH_{eau} évoluent de $4,9 \pm 0,34$ à $5,7 \pm 0,29$. Pour le phosphore assimilable, les deux groupes homogènes constitués comprennent les sols de Daloa et Gonaté plus fournis ($43,96 \pm 3,0$ et $43,80 \pm 2,63$ g.kg⁻¹) et les autres sols (Bla, Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé) où les teneurs vont de $40,55 \pm 2,20$ à $42,74 \pm 1,29$ g.kg⁻¹. En fonction du taux de saturation en bases échangeables (V), quatre groupes de sols ont été distingués, le sol de Daloa étant le plus saturé ($V=53,47 \pm 21,49$ pc), suivi respectivement par le sol de Wandaguhé ($V=29,29 \pm 5,81$ pc), les sols de Madoguhé, Zépréguhé, Gonaté et Bla ($V=15,01 \pm 3,08$ à $22,14 \pm 16,29$ pc), puis le sol de Loboguiguia ($10,84 \pm 6,77$ pc).

Tableau XV : Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des propriétés dans les 40 premiers cm des sols

	Variables	Moyennes	Ecart-Types	CV (pc)	
Granulométrie	A (pc)	19,34	0,88	4,55	
	L (pc)	26,10	5,68	21,76	
	S (pc)	52,99	5,92	11,17	
	EG (pc)	58,68	32,04	54,60	
Propriétés chimiques	pHeau	5,27	0,38	7,21	
	C (pc)	0,90	0,45	50,32	
	Nt (pc)	0,07	0,02	28,57	
	C/Nt	11,49	1,92	16,71	
	MO (pc)	1,55	0,78	50,32	
	P.ass (g.kg ⁻¹)	42,43	1,21	2,85	
	Ca (cmol.kg ⁻¹)	1,16	0,59	50,86	
	Mg (cmol.kg ⁻¹)	0,60	0,28	46,66	
	K (cmol.kg ⁻¹)	0,06	0,00	0,00	
	Na (cmol.kg ⁻¹)	0,09	0,07	77,77	
	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	1,93	0,87	45,07	
	CEC (cmol.kg ⁻¹)	10,29	3,99	38,77	
	V (pc)	24,08	14,23	59,09	
		Fe (g.kg ⁻¹)	122,94	89,06	72,44
		Mn (g.kg ⁻¹)	80,81	52,55	65,02
		Cu (g.kg ⁻¹)	4,90	1,49	30,40
	Zn (g.kg ⁻¹)	6,33	1,85	29,22	
Densité des macros-invertébrées	Termites (ind.m ⁻²)	89,14	20,49	22,98	
	Fourmis (ind.m ⁻²)	41,14	25,64	62,32	
	Vers de terre (ind.m ⁻²)	85,71	21,16	24,68	
	Autres macro-invertébrés (ind.m ⁻²)	19,42	10,47	53,91	

CV : coefficients de variation ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable ; Sbe : Somme des bases échangeable ; ind.m⁻² : individus par m² de sol ; CEC : Capacité d'échange cationique ; V : Taux de saturation en bases ; A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; C/Nt : Ratio carbone et azote total.

Egalement, quatre groupes de sols sont à signaler avec le fer et le manganèse. Pour le premier, les sols de Daloa et Zépréguhé sont plus fournis (teneurs variant de $249,03 \pm 11,22$ à $251,75 \pm 10,53$ g.kg⁻¹) que les sols de Gonaté et Madoguhé (teneurs variant de $71,31 \pm 16,55$ à $84,95 \pm 8,16$ g.kg⁻¹), eux-mêmes devançant les sols de Bla et Loboguiguia (teneurs variant de $47,2 \pm 4,8$ à $52,85 \pm 9,31$ g.kg⁻¹); le sol de Wandaguhé est le moins fourni (teneur égale à $20,23 \pm 15,72$ g.kg⁻¹). Les groupes constitués par le manganèse ne sont pas très différents de ce qui précède. Ce sont, plus précisément et ce, dans l'ordre décroissant des teneurs : le sol de Daloa (teneur égale à $163,8 \pm 18,20$ g.kg⁻¹), le sol de Zépréguhé (teneur égale à $126,3 \pm 26,23$ g.kg⁻¹), les sols de Bla et Loboguiguia (teneurs variant de $82,73 \pm 11,57$ à $96,05 \pm 26,14$ g.kg⁻¹) et les sols de Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé (teneurs variant de $20,23 \pm 15,72$ à $45,18 \pm 28,18$ g.kg⁻¹). Les sols sont tous homogènes relativement à leurs densités de fourmis, vers de terre et autres macro-invertébrés.

Au total, les profils de sols de tous les sites ont des caractéristiques morphologiques similaires : il s'agit de sols profonds avec des horizons très différenciés. Concernant les caractéristiques physiques, ces sols ont une structure polyédrique à tendance grumeleuse et une texture qui varie de limoneuse à limon argilo-sableuse. En ce qui concerne leurs caractéristiques chimiques prise en compte dans la détermination de la fertilité, notamment le taux de saturation en bases, la somme des bases échangeables et le pH_{eau} , les valeurs mesurées sont différentes d'un site à l'autre. Quant aux groupes taxonomiques des macro-invertébrés identifiés (vers de terre, termites et fourmis) et non identifiés (autres macroinvertébrés), les densités sont toutes statistiquement similaires entre les sites. Cependant, le taux de concrétions, les densités de fourmis et certaines propriétés chimiques des sols (C ou MOS, Ca, Na, V, Fe et Mn) sont, dans les 40 premiers cm, très variables spatialement ($CV > 50$ pc) alors que le sable, l'azote, le rapport C/Nt, le zinc, les termites et les vers de terre sont caractérisés par les variabilités les moins élevées ($CV < 10$ pc).

III.1.2. Classes des sols et correspondances entre CPCS et WRB

Les principales caractéristiques morphologiques et chimiques ayant permis de classer les sols sont synthétisées dans les tableaux XVI à XX. Il ressort que l'ensemble de ces sols de plateaux appartient à la classe des sols ferrallitiques et à la sous-classe des sols ferrallitiques moyennement désaturés de la CPCS. Des phénomènes pédogénétiques secondaires les ayant affectés différemment, font qu'ils appartiennent à plusieurs groupes et sous-groupes. Les correspondances de ces sols et de leurs critères diagnostiques trouvés dans la WRB figurent également dans les mêmes tableaux. Ainsi :

- les sols ferrallitiques moyennement désaturés, concrétionnés ou remaniés et indurés observés à Daloa et Bla correspondent dans la WRB à des Ferritic Plinthic Ferralsols (Densic, Dystric) (Tableau XVI) ;

- l'équivalent dans la WRB du sol ferrallitique moyennement désaturé et faiblement remanié avec recouvrement observé à Wandaguhé est un Retic Ferralsol (Dystric, Loamic) (Tableau XVII) ;
- les sols ferrallitiques moyennement désaturés typiques décrits à Madoguhé et Gonaté sont quant à eux des Ferralsols (Dystric, Loamic) (Tableau XVIII) alors que le sol ferrallitique moyennement désaturé remanié avec faciès de recouvrement décrit à Loboguiguia est un Retic Ferralsol (Dystric, Loamic) (Tableau XIX) dans la WRB ;
- pour le sol ferrallitique moyennement désaturé, concrétionné ou remanié, à hydromorphie de profondeur observé à Zépréguhé, la correspondance dans la WRB est un Plinthic Ferralsol (Dystric, Endostagnic) (Tableau XX).

Tableau XVI : Principales caractéristiques CPCS du sol d'anciens vergers de caféiers à Daloa et Bla et correspondances dans la WRB

Nom du sol	Classification CPCS				Principales caractéristiques décrites	Correspondances dans la classification WRB			Nom du sol
	Autre processus évolutif secondaire (sous-groupe)	Autre processus évolutif secondaire (groupe)	Processus évolutif secondaire (sous-classe)	Processus évolutif principal (classe)		Horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques	Qualificatifs principaux	Qualificatifs supplémentaires	
				Ferrallitisation	Sol présentant une couche subsuperficielle très altérée riche en oxydes de fer et d'aluminium.		Horizon ferrallique		
			Désaturation		Sol faiblement pourvu ($S = 1,76 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faiblement saturé ($V = 22,14 \text{ pc}$) en bases échangeables.			Dystric	
Sol ferrallitique, moyennement désaturé, concrétionné ou remanié, induré		Concrétionnement ou remaniement			Sol ayant une épaisse couche très chargée en concrétions ferromanganiques apparaissant à partir de 20 cm du sol. Les concentrations de fer ou de manganèse se présentent aussi sous forme des taches rouges sur les faces des profils		Plinthic Ferritic		Ferritic Plinthic Ferralsol (Densic, Dystric)
			Induration		Les horizons sous-jacents des couches concrétionnées ont une texture plus fine et sont compactés.			Densic	

Tableau XVII : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de cacaoyers à Wandaguhé et correspondances dans la WRB

Nom du sol	Classification CPCS				Principales caractéristiques décrites	Correspondances dans la classification WRB			
	Autre processus évolutif secondaire (sous-groupe)	Autre processus évolutif secondaire (groupe)	Processus évolutif secondaire (sous-classe)	Processus évolutif principal (classe)		Horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques	Qualificatifs principaux	Qualificatifs supplémentaires	Nom du sol
				Ferrallitisation	Sol présentant une couche subsuperficielle très altérée riche en oxydes de fer et d'aluminium.			Horizon ferrallique	
Sol ferrallitique, moyennement désaturé, faiblement remanié avec recouvrement			Désaturation		Sol faiblement pourvu ($S = 1,45 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faiblement saturé ($V = 30 \text{ pc}$) en bases échangeables.			Dystric	Retic Ferralsol (Dystric, Loamic)
			Faible remaniement		Sol renfermant une nappe de gravats quartzeux d'environ 40 cm d'épaisseur.			Retic	
			Recouvrement		La nappe de gravats est couverte par une couche de texture plus fine (limoneuse) de plus de 80 cm.			Loamic	

Tableau XVIII : Principales caractéristiques CPCS du sol d'anciens vergers de cacaoyers à Madoguhé et Gonaté et correspondances dans la WRB

Nom du sol	Classification CPCS				Principales caractéristiques décrites	Correspondances dans la classification WRB				
	Autre processus évolutif secondaire (sous-groupe)	Autre processus évolutif secondaire (groupe)	Processus évolutif secondaire (sous-classe)	Processus évolutif principal (classe)		Horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques	Qualificatifs principaux	Qualificatifs supplémentaires	Nom du sol	
Sol ferrallitique, moyennement désaturé, typique, modal				Ferrallitisation	Sol présentant une couche subsuperficielle très altérée riche en oxydes de fer et d'aluminium			Horizon ferrallique		
			Désaturation		Sol faiblement pourvu ($S = 1,45 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faiblement saturé ($V = 21,17 \text{ pc}$) en bases échangeables				Dystric	Ferralsol (Dystric, Loamic)
	Modal	Typique			Sol profond de texture fine limoneuse, bien drainé, cohérent, non induré et non remanié.					Loamic

Tableau XIX : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de caféier à Loboguia et correspondances dans la WRB

Nom du sol	Classification CPCS				Principales caractéristiques décrites	Correspondances dans la classification WRB			
	Autre processus évolutif secondaire (sous-groupe)	Autre processus évolutif secondaire (groupe)	Processus évolutif secondaire (sous-classe)	Processus évolutif principal (classe)		Horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques	Qualificatifs principaux	Qualificatifs supplémentaires	Nom du sol
Sol ferrallitique, moyennement désaturé, remanié avec faciès de recouvrement				Ferrallitisation	Sol présentant une couche subsuperficielle très altérée riche en oxydes de fer et d'aluminium.				
								Horizon ferrallique	
			Désaturation			Sol faiblement pourvu ($S = 1,76 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faiblement saturé ($V = 10,84 \text{ pc}$) en bases échangeables.			Dystric
				Remaniement		Présence d'une nappe de gravats quartzeux, épaisse de 45 cm.			Retic
					La nappe de gravats est couverte par une couche de texture fine (limoneuse) épaisse d'environ 70 cm.				Loamic
			Faciès de recouvrement						

Tableau XX : Principales caractéristiques CPCS du sol d'un ancien verger de cacaoyer à Zépréguhé et correspondances dans la WRB

Nom du sol	Classification CPCS				Principales caractéristiques décrites	Correspondances dans la classification WRB			
	Autre processus évolutif secondaire (sous-groupe)	Autre processus évolutif secondaire (groupe)	Processus évolutif secondaire (sous-classe)	Processus évolutif principal (classe)		Horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques	Qualificatifs principaux	Qualificatifs supplémentaires	Nom du sol
					Sol présentant une couche subsuperficielle très altérée riche en oxydes de fer et d'aluminium.				
			Ferrallitisation					Horizon ferrallique	
Sol ferrallitique, moyennement désaturé, concrétionné, à pseudogleys			Désaturation		Sol faiblement pourvu ($S = 1,76 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faiblement saturé ($V = 22,14 \text{ pc}$) en bases échangeables.			Dystric	Plinthic Ferralsol (Dystric, Endostagnic)
			Concrétionnement ou remaniement		Sol ayant une épaisse couche très chargée en concrétions ferromanganiques apparaissant à 20 cm du sol.			Plinthic	
					Apparition de signes d'hydromorphie temporaire vers 80 cm de profondeur.			stagnic	
			Hydromorphisation temporaire de profondeur						

III.1.3. Potentiel de fertilité des sols étudiés

III.1.3.1. Propriétés agronomiques des sols

III.1.3.1.1. Au regard de la morphologie des sols

Le tableau XXI présente la synthèse des caractéristiques morphologiques des sols étudiés ainsi que leurs principales contraintes agronomiques.

À Bla, Daloa, Gonaté, Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé, les sols ont une pente variant de 7 à 8 pc ; ces sols renferment plus de 75 pc d'éléments grossiers à partir de 10 à 15 cm ou à partir de 75 cm, exceptés les sols de Gonaté et Madoguhé, où cette charge en éléments grossiers est négligeable (moins de 10 pc). Ces particules grossières sont constituées essentiellement de concrétions ferrugineuses dont la taille varie de 2 à 3 cm ; elles sont cimentées à Bla par la silice, entraînant la compaction du sol vers 60 cm de profondeur ; le profil cultural du sol s'en trouve réduit à 15 ou 75 cm.

À Wandaguhé particulièrement, cette couche grossière se situe 90 à 120 cm. Aucune tache d'hydromorphie n'a été observée dans le profil pour l'ensemble de ces sols. Le sol exploré à Daloa a aussi la particularité d'être très fourni en concrétions ferrugineuses qui occupent tout le volume du sol situé en dessous de 10 à 15 cm. Ces concrétions sont en plus cimentées vers 30 cm de profondeur. Il en dérive que la profondeur utile du sol soit réduite à 30 cm.

Tableau XXI : Propriétés morphologiques des sols et contraintes agronomiques associées

Sites	Pente du terrain (pc)	Eléments grossiers (pc)	Position du toit de l'horizon gravillonnaire (cm)	Position du sommet de l'horizon d'hydromorphie (cm)	Contraintes
Bla	2-8	70-75	30-40	Néant	Très forte charge en concrétions ferrugineuses et compaction du sol entre 50 et 60 cm.
Dal	2-8	> 80	10-15	Néant	Très forte charge en concrétions ferrugineuses et compaction du sol à 30 cm.
Gon	2-8	< 10	> 120	Néant	Aucune contrainte
Lob	2-8	> 80	75	Néant	Apparition de blocs de roches à 75 cm de profondeur.
Mad	2-8	< 10	> 120	Néant	Aucune contrainte.
Wan	2-8	> 75	90	Néant	Très forte charge en concrétions ferrugineuses à partir de 90 cm.
Zép	2-8	> 75	30	60	Très forte charge en concrétions ferrugineuses à partir de 30 cm et hydromorphie temporaire à 60 cm.

Dal : Daloa ; Gon : Gonaté ; Lob : Loboguiguia ; Mad : Madoguhé ; Wan : Wandaguhé ; Zép : Zépréguhé.

III.1.3.1.2. Au regard des interactions entre les variables physico-chimiques des sols

Les tableaux XXII à XXVIII laissent transparaître au niveau de chaque site les corrélations, existant entre variables indicatrices de la fertilité chimique des sols (le pH_{eau} , le carbone, l'azote total, le phosphore, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, le cuivre, le zinc, le manganèse et le fer) et les variables explicatives de cette fertilité (la texture et CEC). Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

Dans le sol de Bla (Tableau XXII), on a enregistré une corrélation fortement positive entre le taux de sable et les taux de carbone ou de matière organique, d'azote total, du phosphore assimilable et du calcium, ainsi qu'entre ces mêmes variables indicatrices de la fertilité chimiques des sols et la CEC. Par contre, ces corrélations sont fortement négatives entre le limon et ces mêmes variables indicatrices de la fertilité chimiques des sols.

Tableau XXII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Bla entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité chimique des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pH_{eau}	0,04	-0,03	0,05	-0,47
C	0,01	-0,89	0,92	0,92
Nt	-0,15	-0,93	0,95	0,89
MO	0,01	-0,89	0,92	0,92
P.ass	0,17	-0,96	0,97	0,81
Ca ²⁺	0,08	-0,96	0,97	0,83
Mg ²⁺	-0,45	-0,56	0,59	0,41
K ⁺	-0,18	0,36	-0,41	0,09
Na ⁺	-0,20	0,59	-0,63	-0,16
Fe ²⁺	-0,58	-0,45	0,46	0,45
Mn ³⁺	-0,30	-0,43	0,38	0,67
Cu ⁺	0,04	-0,52	0,53	-0,01
Zn ³⁺	-0,49	-0,28	0,31	0,05

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.
A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

À Daloa (Tableau XXIII), le sol est caractérisé par une corrélation fortement positive entre le taux de sable et les teneurs en C, MO, Ca²⁺ et Mn³⁺. Ce constat est identique entre la CEC et le C, la MO et le Ca²⁺. Toutefois le taux de limon est fortement lié négativement aux teneurs de C, MO, Ca²⁺ et Mn³⁺.

Tableau XXIII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Daloa entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité chimique des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	0,06	0,06	-0,04	0,49
C	-0,12	-0,82	0,84	0,73
Nt	-0,33	0,09	-0,10	-0,42
MO	-0,12	-0,82	0,84	0,73
P.ass	0,21	0,66	-0,68	0,18
Ca ²⁺	-0,20	-0,92	0,94	0,75
Mg ²⁺	-0,21	-0,49	0,52	-0,02
K ⁺	-0,17	0,20	-0,23	-0,62
Na ⁺	0,54	0,41	-0,47	-0,59
Fe ²⁺	-0,12	-0,61	0,60	0,04
Mn ³⁺	-0,02	-0,72	0,77	0,54
Cu ⁺	-0,12	0,03	0,08	0,24
Zn ³⁺	-0,55	-0,41	0,46	0,30

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

Dans le sol de Gonaté (Tableau XXIV), la valeur élevée de la CEC, les forts taux de sable et d'argile ont entraîné respectivement une abaisse de l'acidité du sol, ainsi que sa teneur en K^+ et Ca^{2+} . Par ailleurs, le taux élevé de limon a aussi causé une baisse du C, Nt, MO et P.ass. Cependant, la matière organique et/ou le carbone organique, l'azote total et le phosphore assimilable ainsi que le fer, le manganèse et le zinc élèvent la valeur de la CEC et le taux de sable.

Tableau XXIV : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Gonaté entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	-0,33	0,60	-0,58	-0,78
C	-0,46	-0,89	0,92	0,78
Nt	-0,40	-0,89	0,91	0,84
MO	-0,46	-0,89	0,92	0,78
P.ass	-0,45	-0,81	0,82	0,88
Ca^{2+}	-0,77	-0,64	0,70	0,60
Mg^{2+}	-0,22	0,03	-0,04	0,26
K^+	0,21	0,67	-0,72	0,19
Na^+	0,28	0,48	-0,46	-0,17
Fe^{2+}	0,28	-0,69	0,68	0,78
Mn^{3+}	-0,31	-0,56	0,57	0,83
Cu^+	-0,42	0,14	-0,11	-0,53
Zn^{3+}	0,34	-0,42	0,37	0,76

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

À Madoguhé (Tableau XXV), l'augmentation du taux de limon, à l'opposé du sable, est associée à un abaissement dans le sol des niveaux du carbone organique, d'azote total, du phosphore assimilable, du calcium, du magnésium et du potassium. Une teneur élevée de ce sol

en argile entraîne une augmentation du taux de manganèse. La CEC, par ailleurs, est améliorée par le cuivre. L'effet contraire sur la CEC est observé avec le magnésium.

Tableau XXV : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Madoguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	-0,05	0,68	-0,66	0,68
C	0,35	-0,82	0,85	-0,64
Nt	0,34	-0,76	0,81	-0,46
MO	0,35	-0,82	0,85	-0,64
P.ass	0,18	-0,91	0,91	-0,47
Ca ²⁺	0,51	-0,93	0,91	-0,69
Mg ²⁺	0,33	-0,88	0,87	-0,80
K ⁺	0,34	-0,86	0,89	-0,63
Na ⁺	0,08	-0,23	0,22	0,42
Fe ²⁺	0,32	-0,48	0,53	0,69
Mn ³⁺	0,79	-0,52	0,58	-0,68
Cu ⁺	-0,68	0,32	-0,37	0,76
Zn ³⁺	0,06	0,35	-0,34	0,56

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

Les corrélations ressorties dans le sol de Wandaguhé (Tableau XXVI) suivent la même tendance que celles observées à Zépréguhé (Tableau XXVII). En effet, pendant l'augmentation du taux de limon abaisse dans ces sols les niveaux de carbone organique, d'azote total, de calcium, de magnésium, de potassium et de manganèse, celle du taux de sable relève les niveaux de ces variables. La corrélation entre la CEC et l'azote total est quant à elle négative.

Tableau XXVI : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Wandaguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	0,14	0,40	-0,43	0,18
C	-0,50	-0,82	0,87	-0,69
Nt	-0,46	-0,87	0,88	-0,70
MO	-0,50	-0,85	0,89	-0,69
P.ass	0,50	0,69	-0,69	0,09
Ca ²⁺	0,14	-0,12	0,12	0,51
Mg ²⁺	0,17	-0,49	0,52	-0,03
K ⁺	-0,58	-0,72	0,70	-0,46
Na ⁺	0,17	0,60	-0,57	0,11
Fe ²⁺	-0,36	-0,54	0,54	-0,46
Mn ³⁺	-0,34	-0,90	0,88	-0,62
Cu ⁺	0,60	-0,16	0,24	-0,61
Zn ³⁺	-0,12	0,21	-0,23	0,30

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

Tableau XXVII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Zépréguhé entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	0,14	0,40	-0,43	0,18
C	-0,50	-0,85	0,86	-0,70
Nt	-0,46	-0,86	0,88	-0,70
MO	-0,50	-0,85	0,86	-0,70
P.ass	0,50	0,69	-0,69	0,09
Ca ²⁺	0,14	-0,12	0,12	0,51
Mg ²⁺	0,17	-0,49	0,52	-0,03
K ⁺	-0,58	-0,70	0,70	-0,46
Na ⁺	0,17	0,60	-0,57	0,11
Fe ²⁺	-0,36	-0,54	0,54	-0,46
Mn ³⁺	-0,34	-0,88	0,91	-0,62
Cu ⁺	0,60	-0,16	0,24	-0,71
Zn ³⁺	-0,12	0,21	-0,23	0,30

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

Contrairement aux autres sites, aucune corrélation significative n'a été observée entre variables indicatrices de la fertilité des sols et la CEC à Loboguiguia (Tableau XXVIII). Cependant, au niveau de la texture, l'augmentation du taux de l'argile, relève les taux de carbone organique, de matière organique, d'azote total, de magnésium et de potassium et fait baisser celui du zinc. Avec le sable, ce sont les niveaux de C/Nt, de phosphore assimilable et celui du cuivre qui sont relevés tandis que le taux élevé de limon baisse ces mêmes variables.

Tableau XXVIII : Corrélations dans les 40 premiers cm du sol de Loboguiguia entre variables indicatrices et variables explicatives de la fertilité chimique des sols

Variables indicatrices de la fertilité des sols	Variables explicatives de la fertilité des sols			
	Granulométrie			CEC
	A	L	S	
pHeau	-0,61	-0,23	0,24	0,11
C	0,93	-0,59	0,58	0,01
Nt	0,93	-0,51	0,50	-0,07
C/Nt	0,67	-0,86	0,87	0,24
MO	0,93	-0,59	0,58	0,01
P.ass	-0,04	-0,77	0,73	0,18
Ca ²⁺	0,67	0,08	-0,10	-0,17
Mg ²⁺	0,80	-0,36	0,34	0,45
K ⁺	0,88	-0,45	0,50	0,37
Na ⁺	0,27	-0,38	0,47	0,04
Fe ²⁺	0,56	-0,46	0,51	-0,13
Mn ³⁺	-0,03	-0,20	0,17	-0,05
Cu ⁺	0,11	-0,81	0,84	0,12
Zn ³⁺	-0,85	0,41	-0,41	0,35

Les valeurs en gras dans le tableau indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable.

III.1.3.1.3. Au regard des équilibres entre quelques éléments nutritifs du sol

Le tableau XXIX présente la variance de quelques rapports couramment calculés entre les cations (Ca/Mg, K/Mg, (Ca + Mg) /K) et entre le carbone et l'azote (C/Nt) du sol.

Le rapport Ca/Mg dont les moyennes sont comprises entre $2,57 \pm 0,76$ à Gonaté et $1,36 \pm 0,14$ à Wandaguhé sont ainsi statistiquement similaires sur tous les sites. Cependant, en tenant compte des seuils, ces valeurs sont acceptables à Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé et optimales à Bla, Daloa et Gonaté.

Concernant le rapport K/Mg, trois groupes homogènes de sols peuvent être signalés. En effet, ce rapport estimé à $0,05 \pm 3,09$ dans le sol de Daloa est acceptable alors que ceux ressortis des sols de Loboguiguia, Madoguhé, Gonaté et Bla qui oscillent entre $0,10 \pm 0,54$ et $0,12 \pm 0,90$

sont optimaux ; pour le sol de Zépréguhé, la valeur obtenue, à savoir, $26,66 \pm 2,04$ est trop fort. Le rapport K/Mg de $16,71 \pm 0,98$ affiché par le sol de Wandaguhé est intermédiaire aux valeurs ressorties des trois groupes de sols précédents ; il est toutefois jugé trop fort comme à Zépréguhé.

Les groupes de sols distingués selon le rapport (Ca+Mg)/K sont constitués par les sols de Madoguhé et Wandaguhé, sols de Bla, Zépréguhé et Gonaté et le sol de Daloa. Les rapports moyens respectifs ressortis de ces sols sont de l'ordre de $16,00 \pm 0,00$ à $16,71 \pm 0,00$, $24,83 \pm 0,003$ à $28,16 \pm 0,00$ et $52,71 \pm 0,00$. L'ensemble de ces rapports cadrent avec des équilibres optimaux pour les deux (2) premiers groupes et trop fort pour le sol de Daloa.

Les rapports C/Nt calculés ont pour valeurs $14,98 \pm 5,56$ dans le sol de Daloa, $8,84 \pm 1,76$ dans celui de Gonaté et 10 à 12 dans les sols Bla, Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé. Ces rapports sont ainsi, dans l'ordre, élevés, normaux et encore, normaux.

Tableau XXIX : Équilibres entre éléments nutritifs dans les 40 premiers cm des sols

Sites	Ca/Mg	K/Mg	(Ca+Mg) /K	C/Nt
Bla	$2,19 \pm 0,42a$	$0,12 \pm 0,90b$	$24,83 \pm 0,00b$	$10,92 \pm 2,23ab$
Daloa	$2,09 \pm 0,65a$	$0,05 \pm 3,09c$	$52,71 \pm 0,00a$	$14,98 \pm 5,56a$
Gonaté	$2,57 \pm 0,76a$	$0,12 \pm 1,08b$	$28,16 \pm 0,00b$	$8,84 \pm 1,76b$
Loboguiguia	$1,72 \pm 0,42a$	$0,10 \pm 0,54b$	$26,80 \pm 0,00b$	$10,12 \pm 0,78ab$
Madoguhé	$1,76 \pm 0,74a$	$0,12 \pm 1,07b$	$16,00 \pm 0,00c$	$12,31 \pm 2,45ab$
Wandaguhé	$1,36 \pm 0,14a$	$16,71 \pm 0,98ab$	$16,71 \pm 0,00c$	$11,71 \pm 1,41ab$
Zépréguhé	$1,80 \pm 0,04a$	$26,66 \pm 2,04a$	$26,66 \pm 0,00b$	$11,55 \pm 1,42ab$

- Les valeurs affectées de lettres différentes dans une même colonne sont significativement différentes au seuil de 5 pc.
- Nt : Azote total.

III.1.3.1.4. Au regard de l'acidité et de la désaturation du complexe adsorbant du sol

Selon les valeurs des propriétés chimiques des sols étudiés :

- le sol de Gonaté a un pHeau très acide ($pHeau = 4,9$), une faible somme des bases ($Sbe = 1,82 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et un taux faible de saturation en bases ($V = 16,64 \text{ pc}$) ;
- avec un pHeau de 5,1, une somme des bases échangeables variant de 1,33 à 1,44 méq/100g et un taux de saturation en bases situé entre 29,29 et 10,84 pc, les sols de Wandaguhé et Bla sont acides, faiblement pourvus et faiblement désaturés en bases échangeables. Ces caractéristiques sont du même ordre que celles des sols de Madoguhé ($pHeau = 5$; $Sbe = 1,45 \text{ cmol.kg}^{-1}$ et $V = 21,17 \text{ pc}$) et de Zépréguhé ($pHeau = 5$; $Sbe = 1,76 \text{ cmol.kg}^{-1}$ et $V = 22,14 \text{ pc}$) ;

- les sols de Daloa et de Loboguiguia sont, tous les deux, moyennement acides ($pH_{eau} = 5,9$ et $5,7$). Le sol de Daloa est plutôt moyennement pourvu en bases échangeables ($S_{be} = 3,86 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et saturé ($V = 53,47 \text{ pc.}$). Quant à l'autre, il est faiblement pourvu ($S_{be} = 1,83 \text{ cmol.kg}^{-1}$ en bases échangeables et faiblement et saturé ($V = 15,01 \text{ pc.}$).

III.1.3.1.5. Au regard des interactions entre la densité des macro-invertébrés et les variables explicatives de la fertilité des sols

Le tableau XXX présente les corrélations existant entre les densités de macro-invertébrés collectés dans la couche 0-40 cm des sols et les variables explicatives de la fertilité des sols en général (texture, CEC).

Au niveau de la texture du sol, des corrélations significatives existent entre la densité de la macrofaune collectée et les fractions fines du sol, en particulier, le limon et le sable, exception faite du sol de Daloa. À Bla, ces corrélations sont établies entre les termites et le limon (corrélations positives), puis entre les termites et le sable (corrélations négatives), et dénotent ainsi une abondance de cette faune selon que le sol soit de plus en plus fourni en limon et pauvre en sable. Un constat inverse se dégage avec les vers de terre dans le sol de Madoguhé. Dans le sol de Gonaté, tandis que les termites d'une part, puis les vers de terre et les "autres macro-invertébrés" d'autre part, prolifèrent, dans cet ordre, en présence de limon et de sable, de faibles densités des vers de terre et des "autres macro-invertébrés" sont corrélées à des taux élevés de limon. Cette dernière relation illustre aussi celle qui existe entre les vers de terre et les sols de Loboguiguia, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé. À Zépréguhé, particulièrement, la densité des termites s'avère importante aussi bien en présence du limon que du sable alors que seul le sable induit un effet similaire sur la densité des "autres macro-invertébrés".

Avec la CEC du sol, les corrélations significatives marquées avec la densité des faunes collectées concernent les seuls sols de Daloa et de Gonaté : elles traduisent une abondance des fourmis et des vers de terre dans le sol quand la CEC du sol s'élève.

Tableau XXX : Corrélations macro-invertébrés-texture et macro-invertébrés-CEC dans les 40 premiers cm des sols

Sites	Macro-invertébrés	Texture			CEC
		A	L	S	
Daloa	Fourmis	-0,03	-0,62	0,66	0,73
	Termites	0,53	0,36	0,38	-0,49
	Vers de terre	0,68	0,05	-0,03	0,33
	Autres macro-invertébrés	0,01	-0,29	0,27	0,19
Bla	Fourmis	0,19	-0,39	0,41	0,57
	Termites	0,17	0,75	-0,78	-0,32
	Vers de terre	-0,39	-0,42	0,39	0,68
	Autres macro-invertébrés	-0,09	0,57	0,57	0,66
Madoguhé	Fourmis	-0,16	0,09	-0,07	0,56
	Termites	0,41	0,11	0,17	-0,33
	Vers de terre	0,36	-0,86	0,87	-0,53
	Autres macro-invertébrés	0,01	-0,57	0,58	0,09
Gonaté	Fourmis	-0,39	-0,50	0,54	0,06
	Termites	-0,16	0,70	0,69	-0,32
	Vers de terre	-0,29	-0,83	0,84	0,87
	Autres macro-invertébrés	-0,23	-0,70	0,70	0,60
Loboguiguia	Fourmis	-0,23	0,20	-0,14	0,13
	Termites	0,01	0,55	-0,48	-0,08
	Vers de terre	0,62	-0,78	0,80	0,11
	Autres macro-invertébrés	0,28	-0,63	0,64	-0,14
Wandaguhé	Fourmis	0,01	-0,31	0,34	-0,67
	Termites	0,23	0,85	-0,87	0,28
	Vers de terre	-0,34	-0,86	0,87	-0,43
	Autres macro-invertébrés	-0,29	-0,69	0,71	-0,29
Zépréguhé	Fourmis	-0,01	-0,31	0,34	-0,29
	Termites	0,23	0,85	0,87	0,28
	Vers de terre	-0,34	-0,86	0,87	-0,43
	Autres macro-invertébrés	-0,29	-0,69	0,71	-0,67

- Les valeurs en gras indiquent les corrélations significatives marquées à $p < 0,05$.

- A : Argile ; L : Limon ; S : Sable ; CEC : Capacité d'échange cationique.

En somme, les propriétés agronomiques des sols étudiés au regard de leur morphologie présentent des contraintes agronomiques d'une part dues à la compaction du sol liées à la très forte charge en concrétions ferrugineuses et aux cuirasses latéritiques en profondeur, et d'autre part à la présence d'hydromorphie temporaire en profondeur également. En ce qui concerne les

interactions entre les variables, il ressort que le sable joue le rôle de réservoir de nutriments dans les sols, quand la matière organique mobilisée par le sable contribue à relever la CEC du sol. Ceci est à l'origine des équilibres entre les éléments nutritifs observés au niveau des sols, dont les valeurs évoluent d'acceptables à très fortes. Toutefois, l'acidité des sols varie de moyennement acide très acide. Au regard des interactions entre la densité des macro-invertébrés et les variables explicatives de la fertilité des sols, on remarque à Bla, Loboguiguia, Zépréguhé et Wandaguhé une abondance de faune dans les sols selon que les taux de limon y sont élevés et que les taux de sable sont, au contraire, bas. Un constat inverse se dégage avec les vers de terre dans le sol de Madoguhé.

III.1.3.2. Composantes Principales de l'ACP, nuage des variables des sols et classes de sols d'égale fertilité

III.1.3.2.1. Composantes Principales de l'ACP

Le jeu de données utilisé pour réaliser l'Analyse en Composantes Principales (ACP) contient sept (7) individus et 21 variables réparties entre les variables morphologiques, chimiques et biologiques des sols. Les quatre (4) premières composantes principales obtenues expriment ensemble 92,28 pc de l'inertie totale (Tableau XXXI). Les deux (2) premières composantes qui déterminent le premier plan, en expriment 72,46 pc. En d'autres termes, 72,46 pc de la variabilité totale du nuage des individus (ou des variables) sont exprimés par ce premier plan. Ce pourcentage étant assez important, montre que ce plan peut bien représenter la variabilité contenue dans l'ensemble du jeu de données utilisé pour l'étude.

Tableau XXXI : Pourcentage d'inertie expliqué par les quatre (4) premiers axes de l'ACP

Composantes principales	Valeur propre	Pourcentage de la variance	Pourcentage cumulé de la variance
Composante 1	11,32	56,60	56,60
Composante 2	3,17	15,86	72,46
Composante 3	2,56	12,83	85,29
Composante 4	1,39	6,99	92,28

III.1.3.2.2. Nuage des variables des sols

Le nuage des variables de l'étude représenté sur la figure 27 permet de visualiser les corrélations entre ces variables du sol. Les points les plus corrélés avec l'axe 1 ou 2 sont les points explicatifs pour l'axe concerné : il s'agit des points qui sont assez proches de l'axe tout

en étant assez loin de son origine. Par ailleurs, les points qui sont assez proches du cercle des corrélations sont aussi bien représentés sur le mapping de l'ACP.

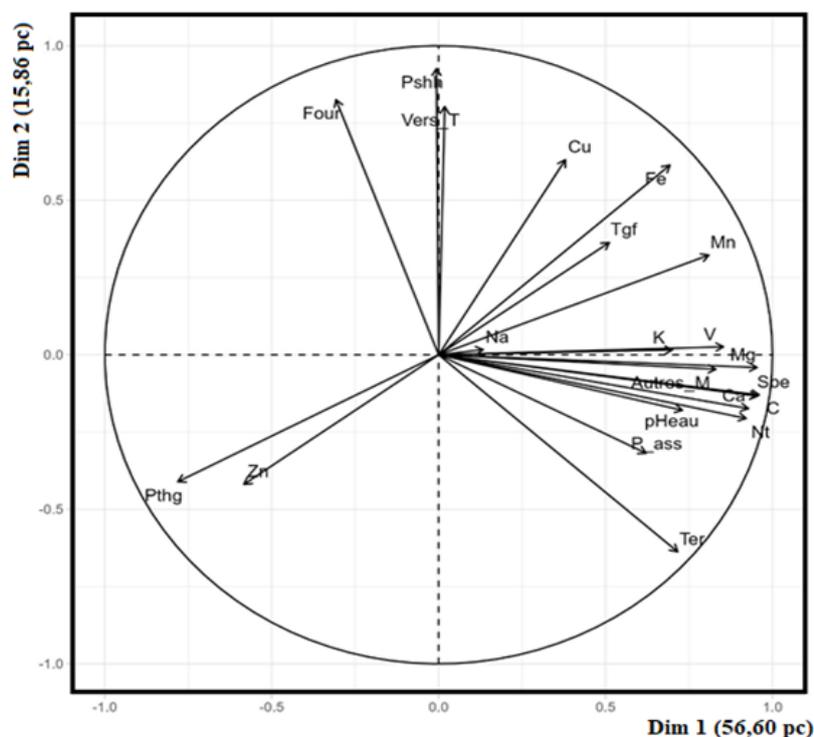


Figure 27 : Nuage des variables de l'ACP.

Autres_M : Densité des autres macro-invertébrés ; *Four* : densités des fourmis ; *Ter* : densités des termites ; *Vers_T* : densités des vers de terre ; *Pshh* : profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie ; *Pthg* : profondeur du toit de l'horizon gravillonnaire ; *Sbe* : somme des bases échangeables ; *Tgf* : taux de gravillons ferrugineux.

Les taux de magnésium (Mg), de calcium (Ca), d'azote total (Nt), de carbone organique (C), la somme des bases échangeables (Sbe) et le taux de saturation en bases (V) sont les principales variables explicatives de l'axe 1. Dans une moindre mesure, les termites (Ter) et la profondeur du toit de l'horizon gravillonnaire (Pthg), puis les taux de fer (Fe) et de manganèse expliquent aussi cet axe. L'axe 1 est donc à la fois l'axe des propriétés chimiques, des termites et des concrétions ferromanganiques des sols. Relativement à cet axe, l'angle presque fermé (en partant de l'origine) que forme la droite du calcium (Ca) et celle de la somme des bases échangeables (Sbe) dénote la prédominance au niveau complexe du sol, du calcium sur les autres cations majeurs. Pareillement, le potassium (K) et le magnésium (Mg) sont à l'origine du relèvement du taux de saturation (V) du complexe adsorbant du sol quand le pH est associé à l'immobilisation de la matière organique (C et Nt) dans le sol.

Pour l'axe 2, les variables explicatives sont constituées par la profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie (Pshh) principalement et, ensuite, par la densité des vers de terre

(Vers_T) et celle des fourmis (Four). Cet axe est donc celui des propriétés hydrodynamiques, des vers de terre et des fourmis du sol. L'angle très étroit formé par les droites de la profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie (Pshh) et de la densité des vers de terre (Vers_T) exprime une condition d'humidité plus accentuée dans les sols. Il en découle que les vers de terre et les fourmis prolifèrent dans ces sols.

III.1.3.2.3. Classes de sols d'égale fertilité

La figure 28 A présente la projection sur le plan factoriel (1x2) de l'ACP aussi bien des sols que leurs variables. Le sol de Daloa étant corrélé positivement à l'axe 1 ou axe des propriétés chimiques, des termites et des concrétions ferromanganiques, se distingue des autres sols par une meilleure fertilité chimique traduite par des taux de magnésium (Mg), calcium (Ca), azote total (Nt) et carbone organique (C) plus élevés ; la somme des bases échangeables (Sbe) ainsi que le taux de saturation en bases (V) de ce sol. Ce sol sous les anciens vergers de caféiers présente aussi une forte charge de concrétions ferromanganiques (plus de 80 pc) jusqu'à 50 cm de profondeur. Le sol de Zépréguhé sous un ancien verger de cacaoyers étant corrélé positivement à l'axe 2, axe des propriétés hydrodynamiques, des fourmis et des vers de terre, se distingue essentiellement par la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire à 60 cm de profondeur et d'une densité importante des vers de terre et des fourmis. Ces deux sols qui ont ainsi des propriétés caractéristiques totalement différentes, ont été classés à juste titre dans deux classes différentes de fertilité (figure 28 B) : classe 1 pour le sol de Zépréguhé et classe 2 pour le sol de Daloa.

Les sols sous les anciens vergers de cacaoyers à Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé, regroupés dans la classe 4, sont opposés relativement à l'axe 1 (axe des propriétés chimiques, des termites et des concrétions ferromanganiques) au sol sous l'ancien verger de caféiers de Daloa ou sol de la classe 2. La corrélation négative affichée de cet axe avec les sols de la classe 4 traduit dans ces sols de faibles valeurs des variables liées à l'axe 1. Au contraire, les sols sous les anciens vergers de caféiers étant corrélés positivement à l'axe 1, sont caractérisés par les plus grandes valeurs des teneurs des éléments chimiques fertilisants, des densités des termites et des taux des concrétions ferromanganiques. Les sols des classes 4 et 2 ont donc en général des caractéristiques contraires. Par ailleurs, les sols sous des anciens vergers de caféiers à Bla et Loboguiguia regroupés dans la classe 3, ont des valeurs moyennes dans l'ensemble des variables avérées déterminantes pour la fertilité des sols étudiés (variables corrélées à la fois aux axes 1 et 2 de l'ACP).

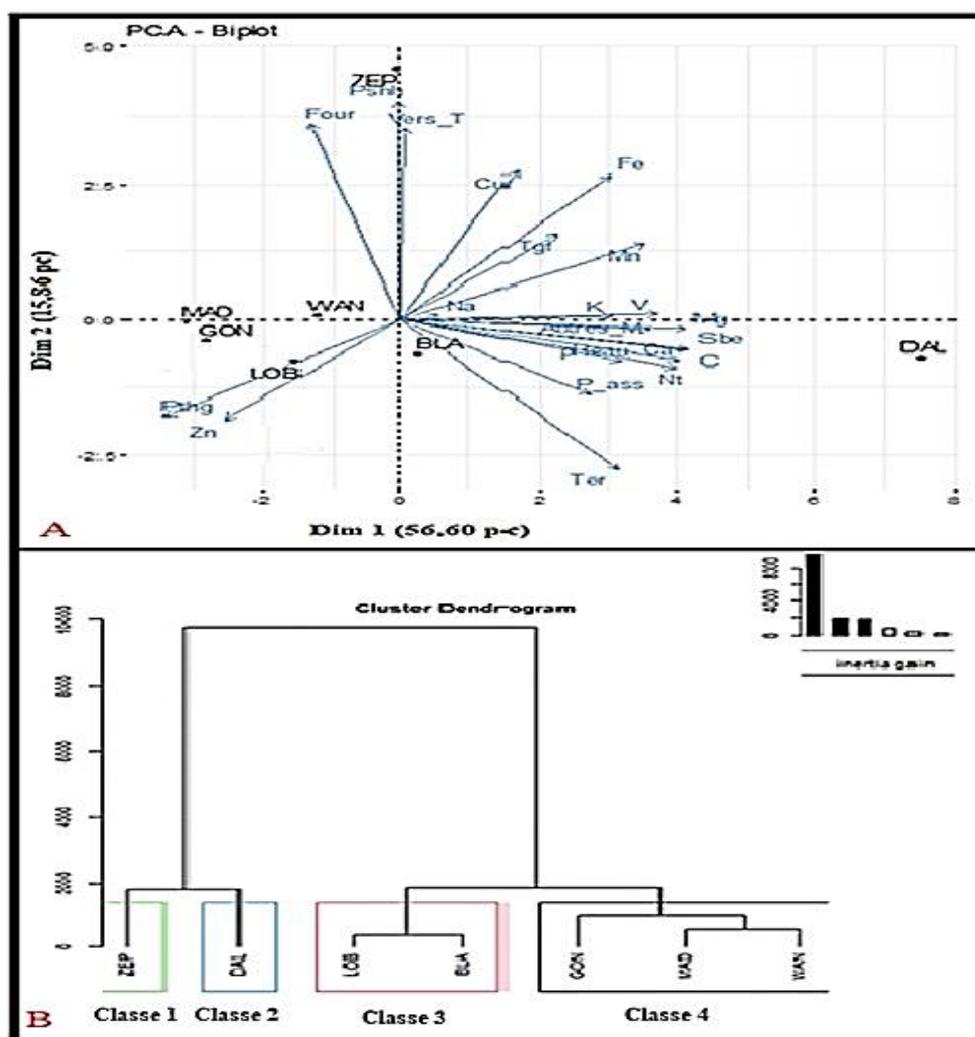


Figure 28 : Projection des variables et des individus sur le plan factoriel (1x2) (A) et classes de fertilité des sols (B)

- *DAL* : Daloa ; *GON* : Gonaté ; *LOB* : Loboguiguia ; *MAD* : Madoguhé ; *WAN* : Wandaguhé ; *ZEP* : Zépréguhé.
- *Autres_M* : Densité des autres macro-invertébrés ; *Four* : densités des fourmis ; *Ter* : densités des termites ; *Vers_T* : densités des vers de terre ; *Pshh* : profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie ; *Pthg* : profondeur du toit de l'horizon gravillonnaire ; *Sbe* : somme des bases échangeables ; *Tgf* : taux de gravillons ferrugineux.

En résumé, les sols d'anciens vergers de cacaoyers sont caractérisés par les plus faibles teneurs en concrétions ferromanganiques, des propriétés hydrodynamiques défavorables par endroits et des densités de fourmis et de vers de terre les plus élevées. Les sols sous des anciens vergers de caféiers présentent quant à eux les taux de concrétions les plus élevés avec des toits d'apparition très proches de la surface du sol (10 à 15 cm par endroits), les meilleures propriétés chimiques ainsi que les densités les plus élevées des termites.

III.2. DISCUSSION

L'objet de ce paragraphe est d'analyser les résultats obtenus en les confrontant aux analyses faites sur des travaux similaires antérieurs, de sorte à aboutir à des interprétations pertinentes, pour l'approfondissement des connaissances sur les sujets traités.

III.2.1. Processus majeurs de la pédogenèse et variabilité des propriétés des sols de Daloa

La ferrallitisation est considérée comme la phase terminale de l'évolution et de l'altération des sols sous climat chaud et humide (Duchaufour, 1977). Ce processus principal d'évolution des sols qui est le plus répandu en Côte d'Ivoire, a été effectivement observé à Daloa lors de cette recherche comme Dabin *et al.* (1960) avaient prédit. Pour ces auteurs, les phénomènes secondaires actifs qui affectent les sols ferrallitiques en général sont : le remaniement, l'induration, l'appauvrissement et le rajeunissement.

Le remaniement se caractérise par la présence d'un horizon riche en éléments grossiers dont l'épaisseur, la profondeur, l'abondance et la nature sont liées d'une part à la nature de la roche mère, d'autre part à la position topographique dans le modelé. Ils sont de dimensions variables et se composent d'éléments ferrugineux et/ou alumino-ferrugineux de forme nodulaire de la taille de graviers (2 à 20 mm) ; des cailloux et/ou blocs de cuirasse ou de carapace ferrugineuse (ou alumino-ferrugineuse) ; des graviers et/ou cailloux et/ou blocs de quartz, des fragments de roche plus ou moins altérée ; ferruginisée et/ou aluminisée. Selon Sys & Verheye (1978), le taux d'éléments grossiers à plus de 30 pc par rapport au poids du sol, ou à environ 75 pc par rapport à son volume, limite le sol utile. Ce seuil est largement observé, sinon dépassé par endroits, notamment à Bla, Daloa et Zépréguhé, où le toit de la nappe des gravats se situe au plus à 20 cm de la surface du sol.

L'induration du sol qui a été observée à Daloa et à Bla est due en général à une concentration de sesquioxydes de fer : les concrétions ferrugineuses et d'alumine contenues dans ces oxydes forment alors des carapaces ou des cuirasses, suite non seulement à une mobilité possible de ces éléments, mais aussi à de sévères alternances de dessiccation et d'humidification des profils et de fortes variations du potentiel redox (Dabin *et al.*, 1960 ; Koko *et al.*, 2009 ; Yoboué *et al.*, 2022).

L'appauvrissement du sol se caractérise par l'exportation de l'argile et du fer hors des profils par circulation latérale (vraisemblablement par érosion superficielle), sans accumulation

corrélative des matériaux entraînés dans des horizons de profondeur. Vu qu'on a plutôt observé ici une accumulation de ces éléments en profondeur, il est inapproprié d'évoquer des cas d'appauvrissement des sols. En clair les sols étudiés ont été épargnés de l'appauvrissement car leur couverture végétale a été plus ou moins maintenue, ce qui a permis d'amoindrir les phénomènes d'érosion, qui en sont les principales causes (Boulet *et al.*, 1982).

En somme, les changements qui auraient affecté les principaux caractères morphologiques des sols dans la zone d'étude depuis les premières études pédologiques qui y ont été menées par Dabin *et al.* (1960) sont encore peu visibles. Ce constat est la preuve que la pédogenèse qui, en réalité résulte de la sommation des résultats des dynamiques journalières, saisonnières et annuelles, demeure toutefois une évolution très lente (centaines ou des milliers d'années), entièrement située dans le passé, et qui, de ce fait, échappe à l'observateur (Baize, 2021). Il découle aussi en partie de la protection du sol assurée par les cultures pérennes, surtout quand elles sont arbustives comme le caféier et le cacaoyer et que leurs systèmes de culture sont caractérisés par l'absence ou par un minimum de travail du sol pendant plusieurs années consécutives. Cependant, les travaux de défrichement, surtout lors des opérations de dessouchage, peuvent conduire à remanier la partie superficielle des sols. Aussi, durant l'exploitation des plantations, le sol subit-il régulièrement des exportations d'éléments minéraux du fait des récoltes, ce qui aboutit après plusieurs années, à son appauvrissement, et ensuite à l'abandon des plantations à l'image des anciens vergers de cacaoyers et de caféiers dont les sols ont fait l'objet dans cette recherche. Après une longue période sans récolte et sans travail du sol, une reconstitution des potentialités agricoles et de la biodiversité des sols étudiés a pu se produire, laissant apparaître que leurs caractéristiques initiales n'ont véritablement pas changé. Floret & Pontanier (2001) ont fait une analyse similaire.

Selon Hillel (2004), les propriétés morphologiques (le taux de concrétions dans cette étude) et hydrostatiques des sols présentent des changements en continu dans l'espace et dans le temps. Cette évolution peut être considérée comme une conséquence des différentes combinaisons possibles des facteurs affectant ces propriétés. Les causes de la variabilité dans le temps et dans l'espace peuvent être à la fois naturelles et anthropiques. La variabilité naturelle résulte de la nature intrinsèquement hétérogène du sol, quand la variabilité anthropique résulte des différentes techniques culturales appliquées sur le sol, tels que le travail du sol, la fertilisation, l'irrigation et le drainage, entre autres (Nano, 2015). Vraisemblablement, les sols abandonnés étudiés, de par leurs précédents culturels (caféiers et cacaoyers), ont eu des modes de travail similaires. Ainsi, la variabilité spatiale actuelle très importante du taux de concrétions

qui les caractérise serait naturelle, c'est-à-dire, liée aux différents microclimats développés sur chaque site de l'étude. En effet, certains de ces microclimats favoriseraient une accumulation du fer et du manganèse sous forme de concrétions, suivie de la redistribution de ces éléments dans le profil. Il va de soi que le fer et le manganèse, à partir desquels les concrétions se forment en général dans les sols ferrallitiques, aient présenté des variabilités similaires à celle des concrétions. La teneur en argile varie très peu car ces sols n'étaient non seulement pas travaillés régulièrement, mais encore, ils sont au repos depuis plus de dix ans. L'impact mécanique des outils, à savoir la fragmentation des particules minérales en éléments plus fins, notamment l'argile, a donc toujours été non significative sur ces sols (Thibault, 2005).

En ce qui concerne le carbone ou la matière organique (C ou MO), son rôle majeur dans la variabilité des sols en général a déjà été démontré par plusieurs auteurs. En effet, dans l'étude réalisée par Arrouays *et al.* (1997), les matières organiques étaient apparues comme les éléments les plus variables parmi quelques propriétés de sols sableux des Landes de Gascogne (France). Cette même observation a été faite par Williot (1995) pour des sols forestiers. Aussi, d'après la revue bibliographique réalisée par Wilding & Drees (1983) sur la variabilité spatiale des propriétés des sols, les matières organiques apparaissaient-elles comme un des caractères les plus variables au sein des surfaces de l'ordre d'un hectare ou moins. Ces disparités ont plusieurs origines. En effet, l'inventaire réalisé par Desjardins (1991) au Brésil qui concerne spécifiquement des sols ferrallitiques, a mis en évidence l'existence de plusieurs types de distribution du carbone total dans ces sols. Ces distributions ne sont pas avérées corrélées entre elles, même sous végétation identique et en considérant des horizons de même profondeur. Ainsi, a-t-il conclu que la distribution du carbone total semble s'expliquer par l'action d'un facteur climatique, en l'occurrence la température. Par ailleurs, en comparant les stocks de matières organiques dans les profils de trois sols rouges ferrallitiques appauvris en argile sur terres de barre sous forêt et sous différents systèmes de cultures (palmiers à huile, cultures vivrières annuelles et plantations forestières), Djégui *et al.* (1992) ont observé une diminution des teneurs en matière organique par rapport aux sols forestiers. Cette différence était plus marquée dans l'ensemble du profil des sols cultivés qui ne présentaient pas de brusques gradients texturaux. Dans le cas contraire, elle n'était importante que dans les horizons supérieurs. Ils en ont conclu que les fortes hétérogénéités spatiales des teneurs en matière organique sont à mettre en relation avec, non seulement les pratiques culturales propres aux cultures, mais aussi, le mode de gestion de la fertilité des sols sous cultures. Cette dernière explication de la variabilité des taux de carbone dans les sols, au contraire des observations

faites par Desjardins (1991), est peu probable dans la présente étude vue que les sols étudiés sont tous abandonnés depuis plus d'une dizaine d'année. Toutefois, en contribuant à la constitution de la CEC et/ou à l'accumulation des bases échangeables dans le sol, la MO, selon Fallavier (1995), apparaît comme le principal facteur explicatif de la somme des bases échangeables dans les sols ferrallitiques. En fait, la matière organique comporte plus de sites d'échanges que l'argile. Maintenir et augmenter sa quantité dans le sol permet de relever la CEC du sol (Bruulsema *et al.*, 2016), d'où la similarité avérée ici entre les variabilités spatiales de ces deux propriétés. Par ailleurs, le Ca et le Na ayant montré une variabilité élevée autant que le taux de saturation en bases échangeables (V), laisse penser que les deux premières variables citées sont les plus importantes de l'ensemble des bases échangeables contenues dans les sols étudiés.

Pour le phosphore (P) qui est un élément essentiel pour toute forme de vie aussi bien animale que végétale, sa seule source pour les végétaux est le sol. Cependant, dans le sol, il est très peu disponible puisqu'il est très souvent fixé par les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium ou précipité par les minéraux primaires (Al-P, Fe-P, Ca-P) limitant ainsi ses prélèvements par les plantes (Djégui *et al.*, 1992). Soutenant la même idée, Frossard *et al.* (2004) font remarquer que la production primaire des milieux terrestres est limitée par la faible disponibilité du phosphore pour les plantes. En effet, les plantes ne peuvent prélever leur phosphore que sous forme d'ions orthophosphate (PO_4^{3-}), soit directement par voie racinaire, soit par l'intermédiaire des champignons mycorhiziens. Etant donnée la forte affinité de cet ion pour les composants du sol et la faible vitesse de libération du phosphore par altération des roches, il n'est présent qu'à de très faibles concentrations dans la solution des sols non fertilisés (Rausch & Bucher, 2002). De ce fait, jusqu'à l'utilisation massive des engrais phosphatés (fin du XIX^e siècle), le phosphore constituait le nutriment limitant la production agricole nationale en France (Boulaine, 1992). Ce n'est donc pas étonnant que dans la présente étude réalisée sur des sols ferrallitiques en Côte d'Ivoire, le taux de phosphore assimilable soit non seulement bas, mais qu'il se présente comme une des propriétés du sol la moins variable spatialement. D'ailleurs, Messiga *et al.* (2010), Ouattara *et al.* (2017), puis Kouadio *et al.* (2018), qui ont réalisé des études similaires, avaient abouti à de faibles taux de phosphore dans des sols ferrallitiques au Brésil et en Côte d'Ivoire. Aussi, dans les sols agricoles, la quantité du phosphore disponible varie-t-elle en fonction de la quantité du phosphore du sol (Morel *et al.*, 2013), mais également en fonction de sa capacité de sorption (Ziadi *et al.*, 2013). La disponibilité varie donc en fonction des propriétés du sol telles que la nature des minéraux présents, la texture et le pH

jouant sur sa capacité de sorption, mais également en fonction de l'historique de fertilisation (Nobile, 2017). C'est ainsi que Zro *et al.* (2018) avaient lié la forte variabilité du phosphore (environ 50 pc) observée dans des sols hydromorphes (gleysols) utilisés en riziculture irriguée ou inondée dans la région du Bélier (centre de la Côte d'Ivoire) à la fertilisation minérale. Ici, la faible variabilité du phosphore observée dans les sols étudiés traduit l'absence de fertilisation sur ces sols non exploités depuis plus de dix ans. L'absence de fertilisation expliquerait aussi la faible variabilité constatée au niveau de potassium.

En affichant une densité plus variable que les autres macrofaunes étudiés, les fourmis font montre de leur plus grande mobilité que les vers de terre et termites. Cette analyse est concordante avec la remarque faite par Yéo (2001) lors de l'étude qui visait à caractériser la diversité biologique des fourmis terrioles dans la savane de Lamto en Côte d'Ivoire.

On peut retenir de cette discussion menée sur la variabilité des propriétés des sols étudiés, qu'à partir de la caractérisation quantitative de leur composition physico-chimique, il a été possible d'identifier les propriétés des sols les plus et les moins variables d'anciens vergers de cacaoyers et de caféiers de quelques localités du département de Daloa situé au Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. La prise en compte de ces connaissances locales de la variabilité des sols peut constituer un levier pour optimiser la production végétale et élaborer des stratégies de gestion durable des nouvelles cultures que ces sols peuvent supporter. En effet, leurs futurs utilisateurs devront porter un intérêt particulier sur les propriétés des sols avérées très variables car le potentiel agronomique du sol peut varier spatialement de manière significative, d'une parcelle à une autre, ou même à l'échelle intra parcellaire, selon que les teneurs de ces variables sont capables d'évoluer entre des valeurs optimales et contraignantes. Dans un tel cas, il convient de zoner les sites défavorables pour y apporter les corrections qui valent.

III.2.2. Potentiel de fertilité des sols étudiés

III.2.2.1. Fertilité chimique

Les sols étudiés ont des taux de MO qui oscillent entre 0,99 et 1,97 pc à Gonaté, Madoguhé, Wandaguhé, Bla, Loboguiguia et Zépréguhé sont globalement faibles quand celui du sol de Daloa (3,18 pc) est moyen. Par ailleurs, le rapport C/Nt compris entre 9 et 12, expression de la vitesse de minéralisation de la matière organique du sol (Luciens *et al.*, 2012), est bon sur tous les sites sauf à Daloa, où il est élevé (14,98) et signe d'une mauvaise assimilabilité de l'azote par les cultures ou les plantes en général (Martin, 1973). La tendance à l'évolution du taux de MOS dans les sols est similaire à celle de la somme des bases échangeables pour laquelle les sols de Gonaté, Madoguhé, Wandaguhé, Bla et Loboguiguia ont affiché des valeurs très faibles ($S_{be} < 1,5 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et faibles (S_{be} compris entre 1,5 et 3 cmol.kg^{-1}) alors que la valeur S_{be} obtenue à Daloa est moyenne et est ainsi la plus favorable. En termes de saturation du sol en bases (V), le taux est moyen ($53,47 \pm 21,49 \text{ pc}$) à Daloa et faible dans les sols des autres localités. Relativement au phosphore assimilable, tous les sols sont bien fournis, surtout le sol de Daloa dans lequel les teneurs avoisinent 44 g.kg^{-1} . Malgré leur faible teneur dans les sols traduite par les plus ou moins faibles sommes de bases échangeables observées, les cations sont en général en équilibre de saturation sur tous les sites, sauf pour les rapports K/Mg à Wandaguhé et Zépréguhé et (Ca+Mg)/K à Daloa, jugés trop forts.

Au vu de ce qui précède, le sol de Daloa est celui ayant présenté une meilleure caractéristique pour la plupart des variables chimiques évaluées. Ces bonnes dispositions chimiques observées de manière générale dans les sols étudiés peuvent s'expliquer par la longue durée du temps d'abandon des anciens vergers de caféiers et de cacaoyers. En effet, n'étant plus exploités, ces sols ne sont plus les sièges des exportations de nutriments du sol. Ceci a permis d'améliorer le stock organique des sols étudiés à partir duquel les éléments chimiques se sont reconstitués. Ce résultat est en accord avec celui de Yaméogo *et al.* (2001) en étudiant les jachères de longue durée.

III.2.2.2. Fertilité biologique

Selon Duponnois (2012), en Afrique tropicale humide, la macro faune du sol est représentée par des invertébrés dont certains bâtissent des structures organo-minérales. Leurs activités et les répercussions observées sur les caractéristiques du milieu environnant font que ces organismes sont appelés les « ingénieurs de l'écosystème ». Ils sont principalement

représentés par les termites, les vers de terre et les fourmis, qui constituent essentiellement les organismes collectés dans cette étude.

Les termites représentent le groupe dominant de la pédofaune en milieu tropical (Duponnois, 2012), ce qui est aussi le cas dans cette étude. Ces organismes sont surtout connus pour les dégâts qu'ils provoquent sur les plantes vivantes. Pourtant, ils ont aussi un rôle très important dans la structuration physique des sols (aération, porosité, agrégation), dans la dégradation de la matière organique (cellulolyse, ligninolyse) et la concentration et le stockage des nutriments (azote, phosphore) (Kifukiéto, 2014). Les vers de terre sont surtout abondants dans des zones humides où la pluviométrie dépasse 1000 à 1100 mm. En Afrique de l'Ouest, le groupe dominant est constitué par les vers de terre géophages qui ingèrent la matière organique du sol. Ces organismes ont un impact significatif sur la structure du sol et sur la dynamique de la matière organique. Ils augmentent la macroporosité du sol et l'infiltration de l'eau suite à la construction de galeries et, enfin, ils rejettent des déjections (turricules) qui sont en général riches en carbone organique, azote total et cations échangeables. Ces trois composantes de la macro faune du sol et des autres invertébrés collectés participent donc à la fertilisation de sol. C'est ainsi qu'ici, au plan biologique, les sols étudiés et surtout le sol de Daloa, pour abriter une forte densité de ces faunes, ont une valeur agronomique intéressante pour toutes sortes de cultures. Cette relative forte densité constatée est due à la mise au repos des sols pendant un long temps qui permet de développer des conditions favorables à la prolifération de la faune du sol constituées essentiellement en l'accumulation de la matière organique dans le sol qui leur sert de nourriture en général (Duponnois, 2012). Certains groupes trophiques étant très sensibles à l'effet de la pression anthropique, peuvent disparaître et réapparaître avec la durée d'abandon des sols, de sorte que leur présence dans le milieu est un indicateur pertinent des jachères âgées ou protégées (Duponnois, 2012). Si cette analyse est valable pour l'abondance de la faune du sol en général, alors le sol de l'ancien verger de caféiers de Daloa, qui abrite la population la plus importante de macrofaune du sol, a été abandonné longtemps avant les autres vergers

III.2.2.3. Propriétés morpho-physiques

La recherche agronomique tropicale française a attaché une importance grandissante à l'étude des facteurs morpho-physiques de la fertilité des sols dont la pente du terrain, la compacité, la profondeur utile et les états hydrostatiques du sol, qui permettent de délimiter le volume de sol exploitable par les racines des végétaux (Pieri & Moreau, 1986).

Concernant la pente du terrain, les limitations agricoles sont en général analysées sur le plan de l'érosion du sol (Morel *et al.*, 2005). Cette érosion ne se produit pas ou elle se produit peu sur sol bien couvert de végétation. Mais dès que le sol est mis en culture, elle peut se manifester avec intensité, surtout lorsque la surface du sol est rendue imperméable par le mode de travail adopté par l'utilisateur (Morel *et al.*, 2005). Les sols de l'ensemble des classes de fertilité déterminées offrent des conditions de pente variant de 2 à 8 pc. En tenant compte des seuils définis par Sys & Verheye (1978), ces conditions ne constituent pas de limite pour les cultures pérennes et pâturages, mais elles peuvent induire une faible contrainte pour les cultures vivrières. Ces dernières ayant en général des racines très peu profondes, peuvent être déracinées et emportées par le courant de l'eau de ruissellement, si faible soit-il.

Par contre, la présence de fortes quantités de concrétions ferromanganiques et d'autres éléments grossiers tels que les gravats dans les sols peut induire des effets négatifs, notamment, une gêne pour les semis et les plantations et du travail du sol en général, une diminution du volume prospectable par les racines et une diminution de la réserve en eau. Cette analyse de la fertilité physique du sol a été aussi évoquée par Boa (1989). Ainsi, pour être apparus très chargés en concrétions ferromanganiques (plus de 80 pc d'éléments grossiers), le sol de Daloa, par comparaison aux seuils définis par Sys & Verheye (1978), est très contraignant. C'est le cas aussi pour les sols de Bla et de Loboguiguia qui sont, à mi-profondeur (vers 50 à 60 cm), compacts ou graveleux par endroits.

Hormis les éléments grossiers qui impactent négativement la mise en valeur agricole des sols de Bla et de Loboguiguia, puis le sol de Daloa, la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire à 60 cm de profondeur dans le sol de Zépréguhé est le signe que dans ce sol, la macroporosité est insuffisante pour éviter les excès d'eau et donc les engorgements qui asphyxient les racines. Cela constitue un obstacle mécanique qui gêne l'enracinement des plantes sensibles à l'hydromorphie. À ce problème, Forestier (1964), à partir de constats faits sur le caféier en République Centrafricaine, ajoute que l'hydromorphie cause des troubles physiologiques chez la plante, notamment une carence en potassium associée à une absorption à doses toxiques de magnésium et de sodium. Comme le remaniement, la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire et parfois d'hydromorphie permanente est fréquente dans les sols ferrallitiques des régions à drainage imparfait (Petithuguenin, 1998). Le plus souvent, ces horizons se trouvent à plusieurs mètres de profondeur et ne gênent en rien les cultures. Il arrive toutefois que l'horizon d'hydromorphie temporaire soit, comme ici, proche de la surface et provoque alors un engorgement passager du sol.

Les sols de Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé n'ayant présenté aucune des contraintes signalées dans les sols précédents à moins de 120 cm de profondeur, sont *a priori*, très propices en agriculture. Aussi, leurs propriétés chimiques et biologiques sont avérées assez bonnes.

III.2.2.4. Effets des principales interactions entre les variables des sols sur leur fertilité

III.2.2.4.1. Interactions CEC-MO et CEC-nutriments du sol

La production végétale est possible en apportant aux plantes les éléments minéraux, l'eau, le CO₂ et l'énergie lumineuse qui leur sont nécessaires. La matière organique (MO) du sol facilite cette fourniture d'éléments aux plantes par plusieurs actions. Une de ces actions est de participer à la fonction de réservoir du sol en éléments indispensables aux plantes : la MO du sol contribue alors à la constitution de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols (Julien & Tessier, 2021). C'est ce rôle qui s'est traduit dans la présente étude par les corrélations significatives positives MO-CEC, surtout à Daloa, où elle était bien marquée, à l'instar de ce qui caractérise les sols ferrallitiques tropicaux en général, du fait que ces sols sont à argiles de type kaolinique, une argile à faible activité d'échange. La contribution de la MO du sol à la constitution de CEC dans un tel cas permet d'augmenter significativement la capacité du sol à contenir les cations basiques (K, Mg, Ca, Na) nécessaires aux plantes sous une forme facilement assimilable par elles (Fallavier, 1995). Ainsi, les corrélations significatives positives CEC-Nt et CEC-P_{ass} observées à Bla et Gonaté sont-elles l'expression d'une mise à disposition pour les plantes de l'azote et du phosphore. Ganry (1990), puis N'Dayegamiye (2007), en précisant que l'azote puisé par les plantes, même en cas d'apports importants par les engrais, provient en grande partie de la MO du sol minéralisée, confortent notre analyse.

Cependant, les corrélations significatives négatives MO-CEC à Zépréguhé et MO-Nt à Wandaguhé et Zépréguhé montrent que des augmentations de la MO du sol peuvent s'accompagner par une baisse de la CEC. Une explication de ce résultat peut être déduite des travaux de Fallavier (1995) qui, en étudiant la contribution des fractions granulométriques de la matière organique à la capacité d'échange cationique des sols lessivés de divers pays tropicaux, dont la Côte d'Ivoire, a montré que la fraction "argile" du sol est celle qui contribue de façon prépondérante à la CEC des sols. Mais, lorsque la MO du sol est corrélée positivement au sable et presque nullement au limon et à l'argile, comme c'est le cas dans la plupart des sols étudiés, elle est *a priori* grossière et ne participerait pas significativement à la constitution de la CEC du sol, mais plutôt à sa régression. Aussi, quand Boissezon (1973) fait remarquer que certains sols ferrallitiques, en particulier ceux situés en altitude comme dans cette étude, sont relativement riches en matières organiques à humus grossier. Les bases échangeables de ces sols, avec

l'argile, sont emportées par lixiviation, on comprend mieux l'absence de corrélation significative constatée entre la MO ou la CEC et les bases échangeables dans la présente étude. Par ailleurs, les corrélations positives significatives qui ont été observées entre la CEC et certains oligoéléments, notamment le fer, le manganèse et le zinc, seraient liées au fond pédogéochimiques (Baize, 2009).

Relativement aux états d'équilibre entre les minéraux dans les sols, il ressort que le rapport C/Nt, expression de la vitesse de minéralisation de la matière organique du sol, est bon sur tous les sites (C/Nt compris entre 9 et 12) sauf à Daloa, où il est élevé (C/Nt = 14,98) et signe d'une mauvaise assimilabilité de l'azote par les cultures ou les plantes en général (Martin, 1973). Les cations sont en général en équilibre de saturation sur tous les sites également, sauf pour les rapports K/Mg à Wandaguhé et Zépréguhé et (Ca+Mg)/K à Daloa, jugés trop forts. Ce déséquilibre peut provoquer des antagonismes et blocages d'absorption des minéraux concernés (Doucet, 2006). Globalement, les états d'équilibre entre les minéraux dans les sols étudiés sont favorables. Ces bonnes dispositions sont imputables à la longue durée de la jachère. En effet, les jachères ont pour effet principal d'augmenter avec le temps le stock organique à partir duquel un transfert de ces nutriments vers des formes assimilables (Feller *et al.*, 1993). Ainsi, les quelques déséquilibres observés entre minéraux pourraient se corriger naturellement avec le temps si la jachère est maintenue encore quelques années, sinon, il faudrait en tenir compte pour gérer la fertilité des sols étudiés en cas de leur récupération.

En somme, les principales corrélations significatives ressorties de cette étude lient à certains endroits, la matière organique et la capacité d'échange cationique (CEC) du sol de manière positive, quand, à d'autres endroits, cette relation est négative. Dans le premier cas, la matière organique contribue à la constitution de la CEC et participe à la fonction de réservoir du sol en éléments indispensables aux plantes. Le second cas survient en général dans les sols très lessivés, où la matière organique, parce qu'étant grossière et liée au sable accumulé dans les couches supérieures du sol, ne participe pas à la constitution de la CEC. Dans l'un ou l'autre des deux cas, les équilibres de stabilité entre les nutriments du sol sont avérés en général favorables, probablement du fait du maintien prolongé des sols au repos.

III.2.2.4.2. Interactions CEC-faune du sol et texture-faune du sol

Parmi les divers groupes taxonomiques des macro-invertébrés collectés, trois ont été identifiés : les vers de terre, les termites et les fourmis. Ces macro-invertébrés ont présenté une densité statistiquement similaire d'un site à un autre. Il existerait donc entre ces sites, des

conditions agro climatiques, pédologiques et surtout de nutrition (abondance de litière produite par la couverture végétale) peu variables, à l'image des observations faites par Moço *et al.* (2010) lors d'une étude consacrée à la faune du sol dans des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. Toutefois, le site de Daloa abritant une relative plus forte densité de macrofaune alors que le sol y est moins acide, laisse penser que la prolifération de la macro faune du sol est corrélée positivement aux faibles acidités des sols. C'est en cela que Ponge (2004) soutient que la majorité des organismes du sol prolifèrent dans des sols à pH neutre (pH = 7).

D'un autre côté, de nombreuses études mettent l'accent sur la texture ainsi que d'autres caractéristiques physico-chimiques des sols comme facteurs responsables de l'hétérogénéité des habitats de la macro faune du sol (Barros *et al.*, 2004 ; Ouédraogo *et al.*, 2006 ; Kifukiéto, 2014). Concernant les sols étudiés qui ont texture limono-sableuse, il ressort que les termites ont une préférence pour les horizons limoneux contrairement aux vers de terre qui préfèrent les sables et vice-versa. Aucune préférence pour les fourmis en lien avec les particules du sol n'a été observée.

En fait, les vers de terre sont réputés pour leur capacité à modifier profondément les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol en creusant des galeries et en ingérant du sol et des résidus organiques (Martin, 1991 ; Blanchart *et al.*, 1993). Les horizons sableux, à l'opposé des horizons limoneux plus compacts, se prêtent mieux à cette activité du fait des nombreux pores qui les parcourent. L'action des termites, mais aussi des fourmis, est également importante parmi les organismes de la macro faune ; elle consiste au fouissage, transport et accumulation d'éléments fins dans leur nid (Floret & Pontanier, 2001). Vu la texture limoneuse des sols étudiés, leurs éléments les plus fins sont constitués essentiellement par les limons, d'où la corrélation significative positive limon-termites observée à Bla, Gonaté, Wandaguhé et Zépréguhé.

Les traitements statistiques réalisés montrent que la densité de la macro faune, qui constitue les "ingénieurs du sol" pour leur rôle déterminant sur la fertilité du sol en général, varie très peu d'un site à un autre de l'espace étudié. Toutefois, cette faune maintient une dépendance soit avec les teneurs en sables ou limons du sol, soit avec la CEC du sol, ou les deux variables à la fois. La première corrélation détermine le type d'habitat de la macro faune quand la seconde renseigne véritablement sur la fertilité chimique du sol. Ainsi, les sols de Daloa et de Gonaté dans lesquels la CEC est bonifiée par l'action des fourmis et des vers de

terre ont un meilleur fonctionnement. Par conséquent, les fourmis et les vers de terre apparaissent comme la faune ayant une activité plus fertilisante dans les sols étudiés.

III.2.3. Facteurs ayant conduit à l'abandon du sol d'anciens vergers de cacaoyers et de caféiers dans la zone d'étude

De toutes leurs propriétés analysées dans le paragraphe précédent, il ressort que la profondeur du sol d'anciens vergers de cacaoyers et de caféiers étudiés est limitée sur plusieurs sites du fait des processus pédogénétiques secondaires qui les ont affectés. Ainsi, leur faible profondeur se présente comme la principale contrainte qui aurait concouru à leur abandon.

En effet, le sol de Daloa sous un ancien verger de caféiers dont plus de 80 pc du volume est occupé par les concrétions ferromanganiques, est très contraignant surtout que les gravillons ou concrétions ont leur toit se situant à faible profondeur (entre 10 et 15 cm) et sont quelques fois pris dans un ciment, constituant ainsi un obstacle mécanique à la pénétration des racines. La profondeur utile de ce sol se trouve alors limitée à la seule couche meuble épaisse de 10 et 15 cm qui surmonte la couche cimentée. Pour Leprun *et al.* (2001), l'apparition d'un tel horizon induré à faible profondeur, qualifié d'horizon compact de "comportement" ou de "consistance", est fréquente dans les sols ferrallitiques. Contrairement aux sols d'anciens vergers de cacaoyers à Gonaté, Madoguhé, Wandaguhé et Zépréguhé, les sols de Bla et de Loboguiguia, également qui sont des anciens vergers de caféiers, présentent des contraintes similaires vers 50 à 60 cm. Ils sont ainsi toutefois moins contraignants car leur couverture de terre meuble est suffisante pour permettre le développement de plantes annuelles cultivées. On note aussi que les sols gravillonnaires à teneur volumique supérieure à 30 pc ont en général une faible capacité de rétention en eau, et de ce fait, ont un comportement négatif sur le développement des cultures (Sys & Verheye, 1978).

Dans les faits, la présence des fortes charges d'éléments grossiers constitués de gravats dans les sols ferrallitiques traduit le remaniement du sol. Selon Schwartz & Lanfranchi (1990), ce remaniement provient en général du transport latéral de matériaux par colluvionnement, l'ablation, les apports éoliens, les perturbations d'origine anthropique et le brassage biologique, qui a attiré particulièrement notre attention. En effet, les termites et les fourmis dont les nids jonchent l'environnement immédiat des sites, en remontant vers la surface du sol de la terre fine (limon, argile, sable) en masse, créent à des profondeurs variables, des nappes de gravats (Feller *et al.*, 1993). Les vers de terre qui ont été également dénombré massivement sur les sites,

participent aussi, selon ces mêmes auteurs, au remaniement du sol par leur activité de brassage du sol.

Les concrétions ferrugineuses observées étaient situées juste en dessous ou dans le même horizon que les nappes de gravats. À la recherche de l'origine des concrétions ferrugineuses dans des sols ferrugineux au Togo, Lévêque (1970) avait fait la même remarque et malgré la proximité de ces deux types d'éléments grossiers dans le sol, avait abouti à une conclusion selon laquelle les concrétions ferrugineuses sont loin d'appartenir à la nappe de gravats. Pour lui, les concrétions ont très majoritairement une origine autochtone, quand Faure (1986) insiste sur l'origine allochtone des nappes de gravats dans les sols ferrallitiques et ferrugineux. La conclusion de Lévêque (1970) était fondée sur plusieurs arguments, à savoir, l'existence de :

- une liaison assez étroite des divers types de concrétions avec la pédogenèse ;
- une progressivité verticale dans les profils, des caractères d'ordre granulométrique ou (et) morphologique de la plupart des populations de concrétions ;
- une progressivité identique de la composition chimique de l'ensemble des concrétions de nombreux profils ;
- une parenté géochimique entre les divers types de concrétions d'un même profil ;
- une étroite liaison entre l'ensemble des concrétions d'un profil et le matériau de l'horizon C, autochtone.

Dans cette étude, les grandes quantités de fer dissous naturellement dans les solutions des sols ferrallitiques et ferrugineux peuvent précipiter après lessivage dès lors que les sols se retrouvent exposés à un rayonnement solaire de plus en plus intense, du fait, par exemple, de la destruction de leur couverture végétale naturelle (forestière), remplacée par des cultures, même si ces cultures (le cacaoyer et le caféier), assurent une couverture assez dense du sol. Avec le prolongement de l'exposition du sol au soleil, les précipités durcissent et se transforment progressivement en concrétions. Vraisemblablement, c'est la principale raison qui explique un concrétionnement plus ou moins accentué des sols présents sous caféiers cultivés en plein soleil à Daloa, Bla et Loboguiguia, contrairement aux sols sous cacaoyers des sites de Gonaté et Madoguhé, couverts par un ombrage important fourni par les cacaoyers et les arbres qui leurs sont souvent associés et qui, de ce fait, sont exemptes de concrétions. Cette analyse montre le rôle majeur que l'homme peut jouer dans le concrétionnement des sols, idée que Dabin & Maignien (1979) ont soutenue.

Hormis les éléments grossiers, la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire à faible profondeur sous les cacaoyers de Zépréguhé constitue aussi un obstacle qui gêne l'enracinement des plantes sensibles à l'hydromorphie. Effectivement, si les horizons profonds sont argileux ou présentent des structures continues (compaction du sol), les eaux de pluies ne s'évacuent que très lentement et stagnent alors dans les couches supérieures du sol créant un excès d'eau. Cela constitue un obstacle hydrique à l'enracinement de nombreuses cultures à cause des conditions d'hypoxie engendrées dans le sol (Concaret, 1981). A partir de constats faits sur le caféier en République Centrafricaine, Forestier (1964) ajoute à ce problème d'hypoxie causé par l'hydromorphie de faible profondeur, des troubles physiologiques chez la plante, notamment une carence en potassium associée à une absorption à doses toxiques de magnésium et de sodium.

Comme le remaniement, la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire et parfois d'hydromorphie permanente est fréquente dans les sols ferrallitiques des régions à drainage imparfait (Petithuguenin, 1998). Le plus souvent ces horizons se trouvent à plusieurs mètres de profondeur et ne gênent en rien les cultures. Il arrive toutefois que l'horizon d'hydromorphie temporaire soit, comme à Zépréguhé, pour ce qui concerne les sols étudiés, proche de la surface (60 cm) le signe que dans ce sol, la macroporosité est insuffisante pour éviter les excès d'eau et donc les engorgements qui asphyxient les racines.

Au final, les conditions dégradées en caféiculture et cacaoculture révélées dans cette recherche sont les mêmes que celles décrites par plusieurs auteurs dont, Yoro (2004) et Koko *et al.* (2006). Pour le premier auteur, la mise en valeur d'un sol en cacaoculture dépend surtout des caractères morphopédologiques. Le second auteur a quant à lui observé que les éléments grossiers, l'induration et le mauvais drainage interne du sol étaient les caractères morphopédologiques qui expliquaient la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, sur les sommets et les hauts de versants. Les sols de Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé qui n'ont présenté aucune contrainte morphologique majeure ont pu être affectés par ce déséquilibre minéral à un moment donné, ce qui a conduit à leur abandon. Mais, après le long temps de repos de l'ensemble des sols, leurs réserves minérales ont été reconstituées, d'où leurs actuelles bonnes dispositions au plan chimique.

III.2.4. Perspectives de revalorisation des sols étudiés

Les sols de Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé ou sols de la classe 4 ont pour principales contraintes leur plus forte teneur en zinc ($2,39 \text{ g.kg}^{-1}$) et leur acidité élevée ($\text{pH}_{\text{eau}} = 4,9 \pm 0,3$ à $5,1 \pm 0,1$). La première contrainte peut induire une toxicité au sol alors que la seconde peut freiner la disponibilité pour les plantes des éléments minéraux nutritifs (Deckers, 1993 ; Koulibaly, 2011). Cependant, leur plus grande profondeur des sommets des horizons gravillonnaires (plus de 120 cm à Gonaté et Madoguhé et 90 cm à Wandaguhé) associée à une absence de trace d'hydromorphie temporaire de profondeur font de ces individus, des sols assez profonds et bien drainés pouvant supporter toutes sortes de cultures pérennes ou annuelles et ligneuses (cacaoyer, caféier, théier, hévéa, anacardier, cotonnier, etc.) ou non ligneuses (palmier à huile, cocotier, igname, manioc, riz pluvial, etc.). En d'autres termes, ces sols sont aptes pour toute replantation ou reconversion. Leur acidité élevée peut se résoudre par un apport de chaux (Sato & Comerfort, 2005). Par ailleurs, en prolongeant la durée de non exploitation de ces parcelles de quelques années encore, un stock de carbone plus important pourrait y être constitué. La MO étant en mesure de complexer les oligoéléments, peut rendre ces éléments non assimilables par les cultures en formant de grosses molécules en association avec eux (Henry *et al.*, 2009).

Les sols de Bla et de Loboguiguia sont regroupés dans la classe 3. Ces sols ont une profondeur utile d'environ 50 à 60 cm. Cette profondeur est assez réduite et donc inappropriée pour des cultures arbustives telles que le cacaoyer, le caféier ou l'hévéa. Par contre, diverses cultures vivrières (les plantes annuelles à racines fasciculées : riz pluvial, maïs, sorgho arachide, haricot, courge, sésame etc., et les plantes annuelles à rhizomes et tubercules : manioc, igname, tarot, pomme de terre. et le bananier etc.) et cultures pérennes non ligneuses dont les racines ne sont pas profondes (le palmier à huile, le cocotier etc.) peuvent convenir à ce sol.

Représentée par le seul sol de Daloa, la classe 2 renferme les plus fortes concentrations de magnésium, calcium, carbone organique ou matière organique et azote total. De même, la somme des bases échangeables, le taux de saturation en bases et le pH_{eau} ressortis de ce sol sont les meilleurs. Cependant, ce sol demeure très contraignant à cause de sa forte charge de concrétions ferrugineuses (plus de 80 pc) à partir de 10 à 15 cm jusqu'à 50 cm de profondeur et de sa compaction à partir de cette même profondeur. Ces deux facteurs combinés réduisent le profil cultural de ce sol, au mieux, à ses quinze premiers centimètres : ce sol ne peut ainsi être utilisé durablement en agriculture, qu'elle soit vivrière ou pérenne (Sys, 1978).

La classe 1 est composée du seul sol de Zépréguhé distingué essentiellement par la présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire à 60 cm de profondeur. Si la plupart des plantes annuelles vivrières ou de rente (riz, igname, manioc, maïs, cultures maraîchères, coton, etc.) et pluriannuelles ou pérennes de rente (ananas, cotonnier, anacardier palmier à huile, bananier, cocotier etc.) supportent parfaitement l'hydromorphie de faible profondeur, il n'en est pas de même pour beaucoup de plantes pérennes, surtout le caféier, le cacaoyer et l'hévéa, qui exigent un plus grand volume de sol sain (Ruf, 2000 ; Yoro, 2004). Le sol de Zépréguhé a donc un potentiel intéressant pour une reconversion.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

La présente étude visait à constituer une base de données actualisée sur le sol d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers dans le département de Daloa à l'effet d'une réutilisation durable en agriculture. Il s'est agi aussi de rechercher les correspondances de ces sols initialement classés selon la CPCS, dans la WRB, système de classification universelle des sols.

Certaines des propriétés des sols mesurées sont apparues spatialement très variables (taux d'éléments grossiers, de matière organique, Ca, Na, Fe, Mn, taux de saturation et densité des fourmis notamment) quand d'autres, le *pHeau*, le taux d'argile et le taux phosphore surtout, l'étaient moins. Les propriétés des sols qui varient fortement peuvent être à l'origine de potentiels agronomiques différenciés. En les identifiant, il devient possible de les zoner dans l'optique de n'apporter des corrections que sur les parcelles ou sous-parcelles à problèmes et optimiser ainsi la conduite des cultures.

Par ailleurs, les principales corrélations significatives ressorties de cette étude entre les indicateurs et les variables explicatives de la fertilité des sols lient positivement ou négativement la matière organique à la CEC du sol. Les cations échangeables n'ont affiché en général aucune corrélation significative avec la CEC du sol, contrairement aux oligoéléments (fer, manganèse, zinc et cuivre). Au niveau des nutriments majeurs (azote, phosphore et potassium), l'azote et le phosphore ont révélé des corrélations significatives avec la CEC. Ces corrélations sont, pour l'azote, positives à certains endroits et négatives à d'autres. Quand elles existent, les corrélations significatives impliquant le phosphore et la CEC ou la texture du sol étaient toutes positives. Pour être apparues corrélées avec les limons (positivement avec les termites et négativement avec les vers de terre) alors que les sables étaient corrélés positivement avec les vers de terre et négativement avec les termites, les densités de faune collectées peuvent quant à elles, être expliquées par la texture du sol. L'analyse de l'ensemble des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols mesurées et des corrélations ressorties entre ces caractéristiques a abouti à regrouper les sols étudiés dans quatre (4) classes de fertilité : la classe 4 regroupe les sols des cacaoyères dégradées de Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé caractérisés par les taux de zinc et acidité les plus élevés, de même que les profondeurs des sommets des horizons gravillonnaires les plus grandes. Ces sols se présentent ainsi comme les moins contraignants au plan agronomique. Pour les sols des autres classes, certaines des contraintes observées peuvent être contournées par une reconversion des sols alors que d'autres ne peuvent l'être dans le cadre d'une mise valeur agricole durable.

Au total, la faible profondeur, du fait de l'induration et du concrétionnement, ainsi que le mauvais drainage interne des sols ont été identifiés comme les principales causes du déclin des plantations de caféiers et de cacaoyers dans le département. Ces facteurs, surtout le concrétionnement et l'induration du sol étaient plus accentués au niveau des sols sous les anciens vergers de caféiers à cause d'une plus faible couverture végétale en ces lieux, qui y provoque une faible densité d'ombrage, incapable de protéger suffisamment le sol contre les rayonnements solaires incidents. La pratique de l'agroforesterie aurait pu aider à préserver les cultures étudiées. Toutefois, l'absence de récoltes ou d'exportations sur l'ensemble de ces sols durant plus de dix ans y a favorisé une prolifération de la faune du sol due à l'amélioration du taux de carbone. Les taux d'éléments minéraux nutritifs majeurs et secondaires des plantes ont été également rehaussés tout en restant équilibrés en général. Les oligoéléments par contre sont apparus dans des proportions qui dépassent par moments les seuils optimaux. Tenant compte de l'ensemble des résultats acquis et, à l'heure de la revalorisation des sols étudiés, on retient que :

- les sols des anciens vergers de cacaoyers étudiés à Gonaté, Madoguhé et Wandaguhé n'ont présenté aucune contrainte majeure dans leurs 120 premiers centimètres. Ces sols peuvent convenir à toutes sortes de cultures pérennes ou annuelles, ligneuses ou non ligneuses, ce qui montre que la deuxième hypothèse de l'étude n'est pas vérifiée. En effet, cette hypothèse stipule que " les sols anciennement utilisés en cultures de caféiers et de cacaoyers dans le département de Daloa ne conviendraient plus à ces mêmes cultures" ;
- les sols des anciens vergers de caféiers de Bla et Loboguiguia et de cacaoyers de Zépréguhé, qui ont une profondeur utile d'environ 50 à 60 cm, peuvent supporter toute une panoplie de cultures vivrières et cultures pérennes non ligneuses dont les racines n'explorent pas les zones profondes du sol. Par ailleurs, le sol sous l'ancien verger de caféier à Daloa très concrétionné sur tout son volume et compacté à faible profondeur, ne peut convenir durablement à aucune culture. Ainsi, la troisième hypothèse de l'étude selon laquelle " les sols anciennement utilisés en cultures de caféiers et de cacaoyers dans le département de Daloa conviendraient à d'autres types de cultures pérennes et vivrières" est partiellement vérifiée et/ou non vérifiée.

Ces premiers résultats obtenus sont pertinents en termes de contribution à l'instauration d'une agriculture durable dans le département de Daloa.

Par ailleurs, l'étude a montré que les sols de plateaux dans le département de Daloa sont en général ferrallitiques. Les principaux processus évolutifs qui ont affecté ces sols sont : la désaturation du complexe adsorbant, le remaniement ou concrétionnement, l'induration et l'acidification du sol, puis, dans une moindre mesure, l'hydromorphysation à faible profondeur et le rajeunissement du sol. Ces résultats étant concordants avec la classification selon le système français CPCS réalisée d'antan

dans la zone, finissent par convaincre que cette première caractérisation des sols n'est pas encore caduque : la première hypothèse de l'étude, selon laquelle 'la classification des sols réalisée dans le département de Daloa serait devenue caduque' n'est donc pas été vérifiée.

Aussi, en Côte d'Ivoire, très peu d'études à ce jour ont-elles été consacrées à l'établissement de corrélations, à une échelle régionale, entre les principaux sols décrits selon la CPCS et la WRB. La présente étude qui s'y est essayée dans le département de Daloa, avec de bons résultats à la clé, peut servir de base à des études similaires dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire. En effet, les correspondances existant entre les critères diagnostics de ces deux systèmes de classification ont été clairement identifiées. Cela offre l'avantage d'établir très aisément les correspondances entre les classes de sol des deux systèmes. Les spécialistes de la science du sol pourront donc s'approprier cette étude pour mieux maîtriser la démarche nouvelle et universelle de classification des sols qu'est la WRB.

Ces autres résultats obtenus peuvent contribuer à l'avancée de la recherche scientifique en pédologie en Côte d'Ivoire.

PERSPECTIVES

Cette étude mérite être étendue d'abord à tous les autres départements de la région du Haut-Sassandra dont Daloa est le Chef-lieu. Ce faisant, c'est un plus grand nombre de sols abandonnés qui seraient récupérés et affectés à des cultures adéquates. Ainsi, les utilisateurs de ces sols n'auront pas à investir en vain. Par la suite, l'étude devra être implémentée dans les autres régions agricoles de la Côte d'Ivoire, de sorte qu'une base de données actualisée sur les sols y soit constituée et que la renommée du pays en tant que pays agricole soit renforcée.

La principale insuffisance de cette étude est l'absence d'une étude minéralogique qui aurait permis de préciser le type d'argile dans les sols, information pourtant nécessaire pour attester leur appartenance au Groupe de Référence des Sols "Ferralsol" de la WRB et à la classe des "sols ferrallitiques" de la CPCS. Nos prochaines études porteront également sur la correction de cette insuffisance.

RÉFÉRENCES

- Afrifa A. A., Ofori-Frimpong K., Appiah M. R., Acquaye S. & Snoeck D. (2006). Nitrogen, phosphorus and potassium budget under the cocoa ecosystem: Produce harvesting phase. *Communication à la 15^{ème} conférence internationale sur la recherche cacaoyère*. 9-14 Octobre 2006 San José, Costa Rica, pp 395-404.
- Aguilar-Ibarra A. (2004). Les peuplements de poissons comme outil pour la gestion de la qualité environnementale du réseau hydrographique de la Garonne. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse, France), 147 p.
- Aguilar P., Paulin D., Keho Y., N'Kamleu G., Raillard A., Deheuvels O., Petithuguenin P. & Gockowski J. (2003). L'évolution des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire entre 1995 et 2002. *In : Actes de la 14^{ème} conférence internationale sur la recherche cacaoyère*, 18-23 octobre 2003, Accra, Ghana, pp 1167-1175.
- Aké-Assi L. (1984). Flore de la Côte d'Ivoire : Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale (Abidjan, Côte d'Ivoire), 665 p.
- Aké-Assi L. (2002). Flore de la Côte d'Ivoire : Catalogue, Systématique, biogéographie et écologie, Mémoire de Botanique systématique. *Boissiera*, 58 : 154-170.
- Allaverdian C., Ferrand P., Kibler J.F & Reynaud L. (2014). Lagroécologie, un concept pour une diversité d'approches. *Grain de sel*, 63(66): 6-7.
- Alverson W. S., Whitlock B. A., Nyffeler R., Bayer C. & Baum D. A. (1999). Phylogeny of the core Malvales: evidence from sequence data. *American Journal of Botany*, 86 : 1474-486.
- Anthony F. & Lashermes P. (2005). Origin, evolution and diversity of coffee (*Coffea arabica* L.) genome. *In: Plant Genome, Biodiversity and Evolution*. Science Publishers Inc Plymouth, 1, New Hampshire (USA) : 208-228.
- Appiah M. R., Ofori-Frimpong K., Afrifa A. A., Abekoe M. K. & Snoeck. D. (2006). Improvement of soil fertility management in cocoa plantations in Ghana. FSP Regional Cacao scientific and technical final report. CRIG (Cocoa Research Institute of Ghana), Ghana, 22 p.

- Arrouays D., Vion I., Jolivet Cl., Guyon D., Couturier A. & Wilbert J. (1997). Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France) : Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Étude et Gestion des Sols*, 4(1) : 5-16.
- Assa A. (2005). Précis de pédologie à l'usage des étudiants du second cycle des études universitaires. *Editions Universitaires*, Abidjan (Côte d'Ivoire), 92 p.
- Assiri A.A. (2007). Identification des pratiques paysannes dans la conduite des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA, Option agro-pédologie, UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 56 p.
- Assiri A. A., Yoro GR., Deheuvels O., Kébé BI., Kéli ZJ & Adiko A. (2009). Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences* 2(1) : 55-66.
- Atila.G. (2010). Etude des avantages comparatifs des parcelles caféières par rapport aux parcelles de cultures vivrières en association, cas des palmes 1^{ère} session communale des Baradères. Mémoire de fin d'études (Ingénieur Agronome), Faculté d'Agronomie, Université Notre Dame d'Haïti, Haïti, 59 p.
- Aubert G. (1965). Classification des sols : Tableaux des classes, sous classes, groupes et sous-groupes des sols utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM. *Cahiers ORSTOM, Série pédologie*, 3(3) : 269-288.
- Aubert G. & Moulinier H. (1954). Observations sur quelques caractères des sols de cacaoyères en Côte d'Ivoire. *Agronomie Tropicale*, 9(4) : 428-437.
- Aubert G. & Segalen P. (1966). Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cahiers ORSTOM-Pédologie*, 4(4) : 97-112.
- Avenard J. M. & Deluz A. (1972). Milieu naturel de Côte d'Ivoire. In : *Etudes rurales. Mémoire de l'ORSTOM*, 50, Paris (France) : 185-186.
- Ayi K. A. (2017). Amélioration de la productivité des vergers de cacaoyers (*Theobroma cacao* Linn) pour une gestion forestière durable du togo, sciences des agroressources et genie de l'environnement, université de Lomé, Togo, 160 p.

- Baccini A. (2010). Statistique Descriptive Multidimensionnelle (pour les nuls) (version de mai 2010). Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse, Université Paul Sabatier, Toulouse (France), 33 p.
- Baize D. (2009). Eléments traces dans les sols. Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 57 : 39-54.
- Baize D. (2021). Naissance et évolution des sols. La pédogenèse expliquée simplement. Éditions Quæ, Paris (France), 160 p.
- Barros E., Grimaldi M., Sarrazin M., Chauvel A., Mitja D., Desjardins T. & Lavelle P. (2004). Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon. *Applied Soil Ecology*, 26 : 157-168.
- Bertrand B., Montagnon C., Georget F., Charmetant P. & Etienne H. (2012). Création et diffusion de variétés de caféiers Arabica : quelles innovations variétales. *Cahier Agriculteur*, 21: 77-88.
- Berthaud J. & Charrier A. (1988). Genetic resources of *Coffea*. In : Coffee Agronomy 4. Elsevier Applied Science, London (England) : 1-42.
- Blanchart E., Bruand A. & Lavelle P. (1993). The physical structure of casts of *Millsonia anomala* (Oligochaeta : Megascolecidae) in shrub savanna soils (Côte d'Ivoire). *Geoderma*, 56 : 119-132.
- Boa D. (1989). Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités agronomiques des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat-Ingénieur, Université d'Abidjan (Côte-d'Ivoire), 150 p.
- Boissezon D.P. (1973). Les matières organiques des sols ferrallitiques. In : Les sols ferrallitiques. Mémoire ORSTOM, 4, Paris (France) : 9-66.
- Bokonon-Ganta B.E., Ogouwalé E & Fakorédé N. (2003). Vulnérabilité de l'agriculture aux changements climatiques de la région (Centre du Bénin) : Quelles stratégies d'adaptation. Actes de l'atelier scientifique 1, Institut National des recherche agricoles du Bénin. 21-28 Octobre 2003 à Cotonou (Bénin), pp 188-204.
- Bonnin A. L. (2016). Autour du café. Thèse de Doctorat, UFR Santé (Département Pharmacie), Université Angers, France, 215 p.

- Boulaine J. (1992). Le phosphore moteur du progrès agricole dans l'Europe du 19^e siècle. *In*: Proceed 4th International conference, Phosphorus, life and environment, Ghent, Belgium, 8-11 Septembre 1992, Belgique : 169-198.
- Boulet R., Chauvel A., Humbel F.X. & Lucas Y. (1982) : Analyse structurale et cartographie en pédologie. 1. prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique. Les études de toposéquence et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cahier ORSTOM, Série Pédologique*, 19 (4) :309-321.
- Boyer J. (1982). Facteurs de Fertilité et utilisation des sols. *In* : Les sols ferrallitiques. Tome X. Initiations-documentations techniques, ORSTOM, 52, Paris (France) : 274-302.
- Braudeau J. (1969). Le cacaoyer. Editions G.P, *Maisonneuve et Larose*, Paris (France) : 207-209.
- Bruulsema T.W., Fixen P.E., El Gharous M. & Sulewski G.D. (2016). Améliorer la gestion des éléments nutritifs. *In* : Nutrition des plantes. International Plant Nutrition Institute, USA : 11-19.
- Cambrony H. R. (1982). Plan de développement des petites plantations de caféiers du Zimbabwe. Factibilité technique. IRCC, Paris (France), 17 p.
- Cambrony H. R. (2001). Le caféier. *Edition De Boeck*, Bruxelles (Belgique) : 27-92.
- Chaléard J.L. (1996). Temps des villes, temps des vivres. L'essor du vivrier marchand en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Sciences Humaines, Université de Paris X-Nanterre (Paris, France), 661 p.
- Chaléard J.L. (1997). L'essor du vivrier marchand : un contre modèle aux marges du modèle ivoirien ? Contamin Bernard (ed.), Paris (France) : 172-189.
- Champéroux G. (1991). Manuel du Planteur de café Laotien. Edition CIRAD-IRCC, Paris (France) : 54-70.
- Chaussod R. (1996). La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et Gestion des sols*, 3 : 261-278.
- Clement D., Risterucci A. M., Motamayor J. C., N'goran J. & Lanaud C. (2003). Mapping quantitative trait loci for bean traits and ovule number in *Theobroma cacao* L. *Genome*, 46 : 103-111.
- CNRA. (2005). Bien cultiver le cacaoyer en Côte d'Ivoire. Fiche Technique. Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Côte d'Ivoire, 4 p.

- CNRA. (2015). Manuel technique de cacaoculture durable. A l'attention du technicien. Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Côte d'Ivoire, 166 p.
- CNTIG. (2016). Migration, étalement urbain et accès à la terre dans le péri-urbain à Daloa (Centre-Ouest Côte d'Ivoire). Rapport d'étude, Daloa, Côte d'Ivoire, 11 p.
- Cogneau D. & Mesplé-Somps S. (1999). La Côte d'Ivoire peut-elle devenir un pays émergent ? Programme d'étude "Afrique émergente". Etude Côte d'Ivoire. Centre de Développement, OCDE. Paris (France), 118 p.
- Colin J.P. (1990)a. La dynamique des systèmes productifs agricoles en basse Côte d'Ivoire. *In* : Dynamique des systèmes agraires. ORSTOM et CNRS, Paris (France) : 165-190.
- Colin J.P. (1990)b. La mutation d'une économie de plantation en basse Côte d'Ivoire. *Collection A travers champs*, ORSTOM, Paris (France), 284 p.
- Concaret J. (1981). Drainage agricole : Théorie et pratique. Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, Dijon (France), 509 p.
- Coste R. (1989). Caféiers et cafés. *Collection Techniques Agricoles et Productions Tropicales*, Maisonneuve et Larose et ACCT, Paris (France), 373 p.
- Cros J., Combes M.C., Chabrilange N., Duperray C., Monnot des angles A. & Hamon S. (1995). Nuclear DNA content in the sugenus *Coffea* (Rubiaceae): inter- and intra-specific variation in African species. *Canadian Journal of Botany*, 73 : 14-20.
- Dabin B. & Maignien R. (1979). Principaux sols d'Afrique de l'Ouest et leurs potentialités agricoles. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 15(4) : 235-257.
- 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.
- Dany S. L. (2014). Inventaire et caractérisation morphologique des cultivars de caféiers (*Coffea Spp*) à Baptiste. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Option : Ressources naturelles et environnement. Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire, Département des Ressources Naturelles et Environnement. Université d'Etat d'Haïti, (Haïti), 95 p.

- Davis A.P., Maurin O., Chester M., Mvungu E.F. & Fay M.F. (2006). Phylogenetic relationship in *Coffea* (Rubiaceae) inferred from sequence data and morphology. *Proceedings of the 21th international conference on coffee Science*, 11-15 Septembre 2006, Montpellier, France, pp 32-56.
- Davis A. P., Tadesse W. G., Baena S. & Moat J. (2012). The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting future Trends and Identifying Priorities. *Plos One*, 7 (11) : 47-98.
- Deckers J. (1993). La fertilité du sol et problème d'environnement dans différentes zones écologiques des pays en développement de l'Afrique sub-saharienne. In : Rôle de la fertilisation pour assurer une production durable des cultures vivrières en Afrique Subsaharienne. R. Van, and W.H. Prins (Eds.), Leidschendam (Pays-Bas) : 41-58.
- Demol J. (2002). L'amélioration des plantes. Application aux principales espèces cultivées en régions tropicales. *Presses Agronomiques de Gembloux*, Belgique, 560 p.
- Desjardins T. (1991). Variations de la distribution de la matière organique (Carbone total et ¹³C) dans les sols ferrallitiques du Brésil. Modifications consécutives à la déforestation et à la mise en culture en Amazonie orientale. Thèse de Doctorat, spécialité : Pédologie, Université de Nancy 1, France, 158 p.
- Deheuvels O. (2011). Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica. Thèse de Doctorat, spécialité : Agronomie, Université de Montpellier, France, 185 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 : 1-15.
- Djégui N. Boissezon P.D & Gavinelli E. (1992). Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 27(1) : 5-22.
- Doamba S.M.F., Naero H.B., Sanon A & Sedego M. (2011). Effet des cordons pierreux sur l'activité biologique d'un sol ferrugineux tropical lessivé (Province du Kouritenga au Burkina Faso). *International Journal of Biology and Chemical Science*, 5(1) : 304-313.

- Doucet R. (2006). Le climat et les sols agricoles. *Berger, Eastman*, Québec (Canada), 443 p.
- Douzals J.P. (2000). Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision. Editions Ingénieries-E AT, IRSTEA, France : 45-52.
- Dublin P. (1972). Polyembryonie et haploïdie chez *Theobroma cacao*. *Café, Cacao, Thé*, 16(4) : 295-311.
- Duchaufour P. (1977). Pédologie. 1. Pédogénèse et classification. Tome 1. Masson, Paris (France), 477 p.
- Duchez J. & Loy M. (2005). La classification ascendante hiérarchique. Projet d'analyse de données Insa. Rouen, 49 p.
- Duponnois R. (2012). La grande muraille verte : Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. Edition IRD, Paris (France) : 507-522.
- Eponon C., Snoeck D., Kassin E., Keli J. & Koné D. (2017). Diagnostic agronomique des pratiques culturales paysannes dans les vergers caféiers de Côte d'Ivoire. *Cahier Agriculteur*, 26 (4) : 2 - 9.
- Esso L. J. (2009). Dynamique des recettes du café et du cacao en Côte d'Ivoire. In : Cellule d'analyse de politiques économiques du CIRES. Politique économiques et développement, 10, Abidjan (Côte d'Ivoire) : 17-18.
- Fallavier P. (1995). Physico-chimie des sols tropicaux. In : Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. J. Pichot, N. Sibelet et J. J. Lacoëuilhe, Paris (France) : 23-39.
- Faure P. (1986). Les héritages ferrallitiques dans les sols jaunes du nord-Togo. Aspects micromorphologiques des éléments figurés. *Actes du VIIe congrès international de micromorphologie des sols*, 12-16 Avril 1986, Paris (France), 111-118.
- FAO-UNESCO. (1975). Carte mondiale des sols 1 : 5000000. Legend, UNESCO, Paris. 1 : 68p.
- FAO (2002). Rapport sur les ressources en sols du monde : Quatorzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols. Abomey, Bénin, 9-13 octobre 2000, 224 p.
- FAO (2006). Food and Agriculture Organisation of United Nations. Situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Rapport annuel. New-York (USA). Consulté le 25/02/2022.

- FAOSTAT (2020). Classement des états du monde par production de cacao (en tonne). Food and Agriculture Organization, United Nations. <https://atlasocio.com>. [Consulté le 23 Juillet 2023 à 23h22].
- FAOSTAT (2022). Classement des états du monde par production de cacao (fèves). Food and Agriculture Organization, United Nations. <https://atlasocio.com>. [Consulté le 28 janvier 2023].
- Feller C., Lavelle P., Albrecht A. & Nicolardot B. (1993). La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux : rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Editions Floret et Serpantie, France : 15-32.
- Floret Ch. & Pontanier R. (2001). La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. *John Libbey Eurotext*, Paris (France), 356 p.
- Forestier J. (1964). Relations entre l'alimentation du cafeier Robusta et les caractéristiques des sols. *Café Cacao Thé*, 8 (2) : 89-112.
- Freschet G.T., Violle C., Roumet C. & Garnier E. (2018). Interactions entre le sol et la végétation : structure des communautés de plantes et fonctionnement du sol. *In* : Les sols au cœur de la zone critique-écologie. ISTE éditions, Paris (France) : 83-99.
- Freud E. H., Pétithuguenin P. & Richard J. (2000). Les champs du cacao. *In* : Un défi de compétitivité Afrique-Asie. Editions Karthala et CIRAD, Paris (France) : 13-18.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.A. & Sinaj S. (2004). Le phosphore dans les sols : État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement*, 368 : 123-158.
- Ganry F. (1990). Application de la méthode isotopique à l'étude de bilans azotes en zone tropicale sèche. Thèse de Doctorat, spécialité : Sciences naturelles, Université de Nancy I. Nancy, France, 355 pp.
- Genot V., Renneson M., Colinet G., Goffaux M. J., Cugnon T., Toussaint B., Buffet D. & Oger R. (2012). Base de données sols de REQUASUD. Document technique, 36 p.
- Gigou J. (1987). L'adaptation des cultures dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Agronomie tropicale*, 42 : 1 - 11.

- Gnanglè C.P., Glèlè kakaï R., Assogbadjo A.E., Vodounnon S., Yabi J.A & Sokpon N. (2011). Tendances climatiques passées, modélisation, perceptions et adaptations locales au Bénin. *Climatologie*, 8 : 27-40.
- Guéi A. M., N'Dri J. K., Zro F. G., Bakayoko S. & Tondoh J. E. (2019). Relationships between soil morpho-chemical parameters and earthworm community attributes in tropical agro-ecosystems in the center-west region of Ivory Coast, Africa. *Tropical Ecology*, 60 : 209-218.
- Gyau A., Smoot K., Kouamé C., Diby L., Kahia J. & Ofori D. (2014). Farmer attitudes and intentions towards trees in cocoa (*Theobroma cacao* L.) farms in Côte d' Ivoire. *Agroforestry Systems*, 88(6) : 265-274.
- Haler P.N.G. (2013). Le café, les effets bénéfiques et néfastes sur la santé. Thèse de Doctorat, Faculté de Pharmacie, Université de Lorraine, France, 175 p.
- Harorimana D., Harebamungu M. & Bizimana J. P. (2007). Le café et la caféiculture au Rwanda : cas du district de Maraba (Butare) dans la province du sud. *Sciences Humaines et Sciences Sociales, EPU*, Paris (France), 194 p.
- Henry M., Valentini R. & Bernoux M. (2009). Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences for discussions*, 6 : 797-823.
- Hilhorst M.A. & Balendonck J. (1999). A pore water conductivity sensor to facilitate non-invasive soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (6) : 211-222.
- Hillel D. (2004). Soil physics and soil physical characteristics. *In: Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, USA : 3-17.
- Hudson B.D. (1992). The soil paradigm-based science. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3) : 836-841.
- ICEF & ENSEA (2002). L'économie locale du département de Daloa. Rapport d'étude, Programme ECOLOC 1, Daloa (Côte d'Ivoire), 144 p.
- ICCO. (2012). Rapport Annuel 2010/2011. ICCO. Londres WC1A. Royaume Uni : 13-26.
- ICCO. (2015). Quartely Bulletin of cocoa Statistics. Volume XII, N° 3, Cocoa year 2014 / 2015, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1 p. <http://www.icco.org/statistics/production.aspx>. Consulté le 12/11/2022.

- INS (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat en Côte d'Ivoire. Rapport d'activité de l'INS, Abidjan, Côte d'Ivoire, 49 p.
- IUSS Working Group WRB. (2015). Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapp. Sur Ressour. En Sols Monde N°106 FAO Rome. 151p.
- Jagoret P. & Jadin P. (1993). Recherche d'un itinéraire technique pour la replantation des cacaoyères au Togo : Contribution à une meilleure approche pédologique de la replantation des cacaoyères. *Café Cacao Thé*, Paris (France), 37 (4) : 313-320.
- Jadin P. & Snoeck J. (1985). La méthode du diagnostic sol pour calculer les besoins en engrais du cacaoyer. *Café Cacao Thé*, 29 (4), Paris (France) : 255-266.
- Jomonis W. (2015). Culture et production du café (*coffea canephora*) variété *robusta* dans la commune rurale de Nosiféno de la région Sud-Est. Mémoire en vue de l'obtention du certificat d'aptitude pédagogique de l'Ecole Normale. Département de formation initiale scientifique, spécialité : Sciences naturelles, Université d'Antananarivo, Madagascar, 95p.
- Julien J.L & Tessier D. (2021). Rôles du pH, de la CEC effective et des cations échangeables sur la stabilité structurale et l'affinité pour l'eau du sol. *Étude et Gestion des Sols*, 28 : 159-179.
- Kassin K.E. (2009). Étude 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 ès Science, Agropédologie, Université d'Abidjan- Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 167 p.
- Kassin K.E., Koko L., N'Goran K.E., Yao-KA & Yoro G.R. (2012). Sols favorables à la cacaoculture au centre-ouest de la Côte d'Ivoire dans un contexte d'assèchement climatique. *International Journal of Biology and Chemical Science*, 6(3) : 1148-1157.
- Katé S., Dagbenonbakin G.D., Agbangba C.E., de Souza J.F., Kpagbin G., Azontondé A., Ogouwolé E., Tinté S & Sinsin B. (2014). Perceptions locales de la modélisation des changements climatiques et mesures d'adaptation dans la gestion de la fertilité des sols dans la commune de Banikoara au Nord Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 82 : 7418-7435.

- Keita A. (2000). Diagnostic et proposition d'optimisation du système de fertilisation dans une bananeraie : cas de la plantation de Baha. Mémoire d'ingénieur des techniques agricoles, ESA Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 48 p.
- Kifukiéto C. (2014). Inventaire préliminaire des termites (Isoptera) des plateaux des Batékés en République Démocratique du Congo. *Entomologie Faunistique-Faunistic Entomology*, 67 : 49-57.
- Koffie-Bikpo C.Y. (2013). La région du Haut-Sassandra dans la distribution des produits vivriers agricoles en Côte d'Ivoire. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, 2 : 95-103.
- Koko L. K. (2014). Teractiv cacao as a new fertilizer based reactive phosphate rock for cocoa productivity in Côte d'Ivoire : A participatory approach to update fertilization recommendation. *Procedia Engineering*, 83 : 348-353.
- Koko L. K., Yoro R. G., N'Goran K., Assiri A. A. & Assa A. (2006). Identification des caractères morpho-pédologiques liés à la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. In : Actes de la 15^{ème} Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère. 9-14 Octobre 2006 San José, Costa Rica, 12 p.
- Koko L. K., Yoro R. G., Ngoran K. & Assa A. (2008). Evaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le sud-ouest de la côte d'ivoire. *Agronomie Africaine*, 20(1) : 81-95.
- Koko L.K., Kassin K.E., Yoro G., Ngoran K. & Yao-Kouamé A. (2009). Corrélation entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morpho pédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 24 : 1508-1519.
- Koua A.H.G. (2007). Situation de la production de café en côte d'ivoire : cas du département d'Aboisso. Mémoire de fin de cycle, Institut National Polytechnique, Ecole Supérieure d'Agronomie, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : 131 p.
- Kouadio K. H. (2022). Impact de la fertilisation minérale sur l'activité biologique et le stock de carbone dans les sols sous cacaoyers au Centre-Sud et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Côte d'Ivoire), 146 p.

- Kouadio N.E., Koffi K.E., Kouakou B.J., Messoum G.F., Kouamé B. & N'guessan B.D. (2018). Diagnostic de l'état de fertilité des sols sous culture cotonnière dans les principaux bassins de production de Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 14(33) : 221-238.
- Kouassi K.G. (2010). Analyse technique et socio-économique de l'exploitation agricole de M. Djato Emmanuel à Emmanuel-Bango (Département de San Pédro). Rapport de Stage, Ecole Supérieure d'Agronomie RDC- Diplôme d'Agronomie Générale. INPHB, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 45 p.
- Koukougnon W.G. (2020). Résilience des établissements hôteliers de DALOA à l'inconstance de la desserte en eau potable (Centre-ouest de la Cote d'Ivoire), *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 33(34) : 289-309.
- Koulibaly B. (2011). Caractérisation de l'acidification des sols et gestion de la fertilité des agrosystèmes cotonniers au Burkina Faso. Thèse de Doctorat unique, spécialité : Biologie et écologie végétales, Université de Ouagadougou, Burkina-Faso, 155 p.
- Lashermes P., Combes M. C., Trouslot P. & Charrier A. (1997). Phylogenetic relationships of coffee-tree species (*Coffea* L.) as inferred from ITS sequences of nuclear ribosomal DNA. *Theoretical and Applied Genetics*, 94 : 947-955.
- Lavelle P. (1978). Les vers de terre de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire) : Peuplements, Populations et Fonctions dans l'écosystème. Publication du Laboratoire Zoologique, ENS Abidjan, Côte d'Ivoire, N°12, 301 p.
- Leiter J. & Hadin S. (2004). Trinidad, Brazil and Ghana : Three Melting Moment in the History of Cocoa. *Journal of Rural Studies*, 20 (1) : 113-130.
- Leprun J.C., Misset M & Viala A.L. (2001). Guide de reconnaissance des principaux sols guyanais à l'usage des non pédologues, actualisation et valorisation des données pédologiques. Edition IRD, Paris (France), 25p.
- Léonard E. & Vimard P. (2005). Crises et recompositions d'une agriculture pionnière en Côte d'Ivoire. In : Dynamiques démographiques et changements économiques dans le Bas-Sassandra. IRD Éditions/Karthala, Paris (France) : 339-353.
- Lévêque C. (1970). L'origine des concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique au Togo. *Cahier ORSTOM*, série Pédologie, 8 : 321-348.

- 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.
- Ligban R., Goné D.L., Kamagaté B., Saley M. B. & Biémi J. (2009). Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa. *Journal of Biology and Chemical Science*, 3(1) : 38-47.
- Loor Solorzano R. G. (2007). Contribution à l'étude de la domestication de la variété de cacaoyer Nacional d'Équateur : recherche de la variété native et de ses ancêtres sauvages. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, France, 201 p.
- Luciens N. K., Yannick U. S., Michel M. M., David B. M., Emery K. L. & Louis B. 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.
- Lund M., Lametsch R., Hviid M., Jensen L & Skibsted L. (1999). High-oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine longissimus dorsi during chill storage. *Meat Science*, 77 : 295-303.
- Mahuka J. (2011). Le café. Rapport de stage effectué à la société PLAVUMA en RDC. Université Catholique du Graben, République Démocratique du Congo, 20 p.
- Martin A. (1991). Short- and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 11 : 134-138.
- Martin D. (1973). Les horizons supérieurs des sols ferrallitiques sous forêt et sous savane du Centre-Cameroun. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie, 11 (2) : 155-179.
- Messiga A.J., Ziadi N., Plénet D., Morel C. & Parent L.E. (2010). Soil phosphorus availability in no-till versus conventional tillage following freezing and thawing cycles. *Canadian Journal of Soil Science*, 90 : 419-428.
- Micheli F. (2009). Etude de l'interaction *Theobroma cacao*-*Moniliophthora perniciosa*. Mémoire pour Habilitation à diriger des Recherches, URF Scientifique d'Orsay, Université de Paris-Sud (XI), Paris (France), 85 p.

- MINAGRI (2003). Les « news » des journées portes ouvertes du café et du cacao. Abidjan, Côte d'Ivoire. 11 p.
- Moço M.K.S., Gama-Rodrigues E.F., Gama-Rodrigues A.C., Machado R.C.R. & Baligar, V.C. (2010). Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia. *Brazil Agroforest System*. 76 : 127-138.
- Monnier G., Stengel P. & Guerif J. (1981). Recherche de critères de la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de culture. In « Critère de fertilité des sols et d'évolution de cette fertilité en fonction des systèmes de cultures ». Séminaire CEE Agrimed, 28-29 septembre 1981, Bari (Italie), pp 233-245.
- Morel C., Schaub A., Valentin N. & Houot S. (2013). Dynamics of plant-available phosphorus for 11 years in a French loamy soil amended with biological sewage sludge amended or not with lime. Presented at 15^{eme}. *International Conference RAMIRAN: Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services*, 10-15 Février 2013 Versailles, France, pp 233-243.
- Morel J.L., Schwartz C & Florentin L. (2005). Urban soils. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 335 : 202-208.
- Mossu G. (1990). Le cacaoyer, Série : Le technicien d'Agriculture tropicale. Editions G.P ; Maisonneuve et Larose, Paris (France), 160 p.
- Mwangamwanga I. J., Imani G. M., Wabica D. P., Mushagalusa F. F. & Mangambu M. D. (2013). Contribution à la connaissance de la diversité endémismes Rubiaceae du Parc National de Kahuzi biega à l'est de la RD Congo. *Journal Biologic Chemical Science*, 7(5) : 2092-2105.
- Nano U.C.C. (2015). Etude de la variabilité des propriétés physiques et hydrodynamiques d'un sol argileux sous l'effet de conduites en protection intégrée contre les adventices. Thèse de Doctorat, spécialité : Science du sol-Agronomie, Université de Bourgogne, France, 172 p.
- N'Dayegamiye A. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Colloque sur l'azote, tenu à Drummondville (Canada), le 28 mars 2007, 11 p.

- Nobile C. (2017). Phytodisponibilité du phosphore dans les sols agricoles de La Réunion fertilisés sur le long-terme avec des résidus organiques : la dose d'apport est-elle le seul déterminant à prendre en compte ? Thèse de Doctorat, spécialité : Agrobiologie, Université de La Réunion, La Réunion, 181 p.
- Ouattara T.V., Kassin K.E., Koko L.J., Tahi G.N., Assi M.E., Amari G., Dick E. & Camara M. (2017). Effets de la fertilisation organo-phosphatée sur la biodisponibilité du phosphore, la teneur en aluminium et le pH des sols sous cacaoyers dans de Divo en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 118 : 11754-11767.
- Ouattara S. (2010). Ports et Commercialisation du binôme Café-Cacao en Côte d'Ivoire Thèse unique de Doctorat, spécialité : Géographie des mers et exploitation des océans. Institut de Géographie Tropicale (IGT), UFR SHS Sciences de l'Homme et de la Société Université d'Abidjan Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 373 p.
- Ouédraogo E., Mando A. & Bruissard L. (2006). Soil macrofauna affect nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. *European Journal of Soil Biology*, 42(1) : 275-277.
- Paeth H., Capo-chichi A & Endlicher W. (2008). Climate change and food security in tropical west Africa a dynamic-statistical modeling approach. *Erdkunde*, 62(2) : 101-115.
- Pansu M. & Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. Edition : Springer, Paris, 1012 p.
- Petithuguenin P. (1998). Les conditions naturelles de production du cacao en Côte d'Ivoire, au Ghana et en Indonésie. *Plantation, Recherche, Développement*, 5(6) : 393-411.
- Perraud A. (1971). Les sols de la Côte d'Ivoire. In : Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire. *Mémoire ORSTOM*, 50, Paris (France) : 269-389.
- Pieri C. & Moreau R. (1986). Fertilité des sols et fertilisation des cultures tropicales : l'expérience du CIRAD et de l'ORSTOM. Séminaire sur la recherche agronomique française en zone intertropicale, 15- 16 Mai 1986, Washington, USA : 67-92.
- Pieri C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Edition CIRAD-IRAT, Paris (France), 444 p.
- Pinard F. (2007). Sur les chemins des caféiers, Etudes rurales. *Open Edition Journals*, 180 :15-34

- Pinheiro T.T., Litholdo J.R. C. G., Sereno M. L., Leal J.R. G. A., Albuquerque P. S. B & Figueira A. (2011). Establishing references for gene expression analyses by RT-qPCR in *Theobroma cacao* tissues. *Genetics and Molecular Research*, 5(1) : 15-26.
- Pitcholo A. E. (1990). Essai d'utilisation des péricarpes de cabosses de cacao (*Theobroma cacao* L.) dans l'alimentation des poulets de chair au Togo. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Cheik Anta Diop (Dakar, Sénégal), 101 p.
- Pochet P. & Flémal R. (2001). Le caféier. In : Agriculture en Afrique tropicale. Edition RAEMAKER, Bruxelles (Belgique) : 978-1017.
- Ponge J.P. (2004). Effets des composés organiques sur la faune du sol : perturbation des communautés et recolonisation des substrats pollués. Rapport final, Muséum National d'Histoire Naturelle, France, 43 p.
- Rausch C. & Bucher M. (2002). Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. *Planta*, 216 : 23-37.
- Recous S., Chabbi A., Vertes F., Thiebeau T & Chenu C. (2015). La fertilité des sols : quels sont ses déterminants ? Quels approches et outils pour la qualifier ? *Fourrages*, 223 : 189-196.
- Roose E. (1994). Introduction à la GCES. Bulletin Pédologique FAO, Rome, 420 p.
- Roose E., Kaboré V. & Genat C. (1993). Le Zaï, fonctionnement, limite et améliorations d'une pratique traditionnelle africaine et réhabilitation de la végétation et restauration de la productivité des terres dégradées de la région soudano-sahélienne. *Cahier ORSTOM Pédologie*, 28(2) : 159-174.
- Roose E. (2015). Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : Contribution à l'agroécologie. IRD Editions, Version préliminaire, Montpellier (France), 543 p.
- Ruf F (1991). Les crises cacaoyères. La malédiction des âges d'or ? *Cahiers d'études africaines*, 31 (2) : 83-134.
- Ruf F. (2000). Déterminants sociaux et économiques de la replantation. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 7(2) : 189-196.
- Ruf F. (2012). L'adoption de l'hévéa en Côte d'Ivoire. Prix, mimétisme, changement écologique et social. *Economie rurale*, 3(1) : 103-124.

- Ruf F. & Schroth G. (2013). Cultures pérennes tropicales : Enjeux économiques et écologiques de la diversification. Edition Quae, Versailles (France) : 302-314.
- Saïdou A., Kossou D., Azontondé A & Hougni D.G.J.M. (2009). Effet de la nature de la jachère sur la colonisation de la culture subséquente par les champignons endomycorhyziens : cas du système "jachère" manioc sur sols ferrugineux tropicaux du Bénin. *International Journal of Biology and Chemical Science*, 3(3) : 587-597.
- Sato S. & Comerford N. B. (2005). Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian Ultisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29 : 685-694.
- 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.
- Sébillotte M. (1992). Pratiques agricoles et fertilité du milieu. *In* : Économie rurale. L'agriculture et la gestion des ressources renouvelables. *Mémoire ORSTOM*, 209, Paris (France) : 117-124.
- Ségalen P. (1970). La classification des sols, le Bureau pour le Développement de la Promotion de l'Agriculture, ORSTOM, dépôt légal n°6, OVATY-PARIS : 115-133.
- Silva C. R. S. & Figueira A. (2004). Phylogenetic analysis of Theobroma (Sterculiaceae) based on Kunitz-like trypsin inhibitor sequences. *Plant Systematic and Evolution*, 250: 93-104.
- Smith A. J. (1980). Soils classification and the cocoa grower. *Cocoa Growers' Bulletin*, 30 (5) : 5-10.
- Sybenga J. (1959). Some sources of error in the determination of chromosome length. *Chromosoma*, 10 : 355-364.
- Sys C. (1978). Evaluation of land limitations in the humid tropics. *Pédologie*, 28 (3) : 307- 335.
- Sys C & Verheye W. (1978). Suggestions for the classification of tropical soils with lateritic materials in the american classification. *Pedologie*, 18 : 189-198.
- Tercinier G. (1958). Caféculture et sols de Nouvelle-Calédonie. Rapport d'étude, Institut Français d'Océanie, Laboratoire de pédologie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 22 p.
- Thibault E. (2005). Les outils de travail primaire : leur impact sur le sol. *Acte de colloque en agroenvironnement* organisé par le Centre de Référence en Agriculture Agroalimentaire du Québec

sur le thème : « Des outils d'intervention à notre échelle », tenu le 24 février 2005 à Drummondville, Québec, Canada, pp 2-16.

- Timité N., Sangne Y. C., Kpangui K.B. & Barima Y. S. S. (2019). Exploitations cacaoyères et pratiques culturelles au sein d'un espace domanial : cas de la forêt classée du Haut-Sassandra (FCHS), Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 41 (3) : 7015-7028.
- Tossah B. K., Koudjega T. & Snoeck D. (2006). Amélioration de la gestion de la fertilité des sols dans les plantations de cacaoyers au Togo. Rapport final scientifique et technique du FSP Régional Cacao. ITRA/CRAF Togo, 43 p.
- Van Reeuwijk L. (2002). Procedures for soil analysis. Technical Paper N°9, 6th Edition, 2002, FAO/ISRIC, Wageningen, Netherlands : 88-120.
- Verlière G. (1981). Etude par la méthode du diagnostic foliaire de la fertilisation et de la nutrition minérale du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). *Mémoire ORSTOM*, Paris (France), 256 p.
- Vincent J. J. (1986). Défense des cultures. *ORSTOM*, Paris (France), 61 p.
- Wairegi L. W. I., Van Asten P. J. A., Giller K. E. & Fairhurst T. (2014). Guide du système de culture banane-café. *Le Consortium africain pour la santé des sols*, 06 Mars 2014, (Nairobi, Kenya), pp 63-72.
- Wilding L.P. & Drees L.R. (1983). Spatial variability and pedology. *In* : Pedogenesis and soil taxonomy.: concepts and interactions. Elsevier (éds), 1, New York (USA) : 83-116.
- 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.
- Williot B. (1995). Variabilité spatiale et risques d'erreurs dans l'analyse des horizons holorganiques forestiers", *Étude et Gestion des Sols*, 2 (1) : 73-83.
- WRB (2014). World reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World soil resources reports, N° 106, FAO, Rome, Italy, 92 p.
- Yao A.B., Anoh K.A., Kouadio Z.A., Kouassi K.L., Djè K.B. & Yao K.E. (2020). Impact de la variation des paramètres climatiques sur la production du riz pluvial dans la région du Haut-

- Sassandra (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 31(3) : 529-541.
- Yao-Kouamé A. (2008). Etude des sols brunifiés dérivés des matériaux volcano-sédimentaires de Toumodi en moyenne Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'état es Sciences naturelles, UFR STRM, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Yaméogo G., Boussim J. & Waoréj D. (2001). Étude diagnostique de la flore de jachères d'âges différents dans le terroir de Thiougou (Burkina Faso). *Science et technique*, 25 (1) : 72-90.
- Yégbémey R.N., Yabi J.A., Aïhounton G.B & Paraïso A. (2014). Modélisation simultanée de la perception et de l'adaptation au changement climatique : cas des producteurs de maïs au Nord Bénin (Afrique de l'Ouest). *Cahier Agriculteur*, 23 : 177-187.
- Yéo K. (2001). Etude de la diversité biologique des fourmis terricoles de la savane de Lamto en fonction de l'impact du feu. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire. 50 p.
- Yoboué K. E., Kouakou K. J., Gala B. T. J & Savadogo R. J.-B. (2022). Caractères morphologiques des sols à cuirassements observés sur substrat sédimentaire à Bingerville, à l'Est du district d'Abidjan. *Agronomie Africaine Spécial*, 34 (1) : 59-68.
- Yoro G. (2004). Reconnaissance des sols favorables aux cacaoyers. Cours de formation des producteurs de cacao et des agents ANADER détachés auprès de STCP. Convention CNRA-STCP. Document interne du CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 24 p.
- Ziadi N., Whalen J.K., Messiga A.J. & Morel C. (2013). Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. *Advances in Agronomy*, 122 : 85-126.
- Zro F.G.B., Bakayoko S., Konaté Z. & Yao-Kouamé A. (2018). Étude de la variabilité spatiale de quelques propriétés des sols hydromorphes (gleysols) utilisés en riziculture irriguée ou inondée dans la région du Bélier (centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 37 (2) : 174-183.
- Zro B.G.F., Guéi A.M., Nangah K.Y., Soro D. & Bakayoko S. (2016). Statistical approach to the analysis of the variability and fertility of vegetable soils of Daloa (Côte d'Ivoire). *African Journal of Soil Science*, 4(4) : 328-33.

ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse des critères diagnostiques de la classification des sols ferrallitiques (Ségalen, 1970)

Niveau de hiérarchie	Principaux critères diagnostics
Classe : sols ferrallitiques	<p>Profil ABC très épais, présentant généralement une décomposition poussée de la matière organique, alors très liée à la matière minérale, et une forte altération des minéraux résultant d'une libération importante de sesquioxyde de fer, manganèse et aluminium.</p> <p>Minéraux argileux constitués, en plus des sesquioxides de fer et d'aluminium, etc., de kaolinite et, parfois, de traces d'illite avec une présence possible de minéraux hérités résiduels.</p> <p>Matériau originel (horizon C) constitué de minéraux très altérés s'écrasant facilement.</p> <p>Structure variable de B, parfois peu nette, mais friabilité élevée de cet horizon.</p>
Sous-classe 1 : sols faiblement désaturés	<p>Teneur en bases échangeables de 2 à 8 mé pour 100 g.</p> <p>Degré de saturation en bases de 40 à 70 % ou 80 %</p> <p>pH de 5,5 à 6,5.</p>
Sous-classe 2 : sols moyennement désaturés	<p>Teneur en bases échangeables de 1 à 3 mé pour 100 g.</p> <p>Degré de saturation en bases de 20 à 40 %.</p> <p>pH de 4,5 à 6.</p>
Sous-classe 3 : sols fortement désaturés	<p>Teneur en bases échangeables < 1 mé pour 100 g.</p> <p>Degré de saturation de < 20 %.</p> <p>pH < 5,5.</p>

Niveau de hiérarchie	Principaux critères diagnostics
Groupe 1 : sols typiques	Profil constitué par une succession d'horizons de texture relativement constante sur toute l'épaisseur du sol ; teneur assez faible en matière organique bien évoluée.
Groupe 2 : sols rajeunis ou pénévoués	Sols ayant tous les caractères des sols ferrallitiques faiblement désaturés, mais relativement plus riches en minéraux altérables, en particulier après érosion et réévolution du sol ainsi tronqué.
Groupe 3 : sols appauvris	Horizon A plus pauvre en argile que l'horizon (B) sans qu'il y ait un véritable horizon d'accumulation.
Groupe 4 : sols remaniés	Horizon A de classes texturales relativement peu différentes de ce qu'elles sont en B ; présence fréquente d'un lit de cailloux et graviers non roulés à la base de A.
Groupe 5 : sols humifères (spécifiques aux sols des sous-classes 2 et 3)	Sols riches en matière organique bien évoluée (au moins 7 % sur 20 cm ou plus de 1 % jusqu'au moins 1 m de profondeur).
Groupe 6 : sols lessivés (spécifiques aux sols de la sous-classe 3)	Sols présentant un horizon B de couleur claire, beige généralement lessivé en argile, en fer et en bases échangeables, de structure faiblement développée, d'épaisseur cependant faible (15-25 cm). Les horizons sous-jacents de l'horizon lessivé sont des horizons d'accumulation argileuse, de couleur variant du rougeâtre au beige soutenu, parfois avec une tendance nette à la couleur ocre.
Quelques sous-groupes de l'ensemble des groupes	Modal : Absence de phénomènes pédogénétiques secondaires.
	Induré : Horizon B durci en carapace ou cuirasse.
	Hydromorphe : horizon de gley ou pseudogley à la base de A ou dans la partie supérieure de B.
	Faiblement remanié : sols dont l'horizon A, plus pauvre en argile, est de teneurs, dans les diverses classes de sables, relativement différentes de ce qu'elles sont en (B).
	Faiblement rajeuni : Relativement riche en minéraux altérable.
Éluvié : sols présentant à la limite de A et de (B) un horizon très riche en éléments grossiers, relativement à A et (B).	

Annexe 2 : Horizons, propriétés et matériaux diagnostiques de la WRB
Annexe 2.1 : Horizons diagnostiques de la WRB (2014)

N°	Noms	Description simplifiée
1	Horizons diagnostiques anthropogéniques (tous minéraux)	
	Horizon anthraquique	Dans les rizières inondées, couche comprenant la couche mise en boue et la semelle de labour, toutes deux montrant une matrice réduite et des chenaux racinaires oxydes
	Horizon hortique	Foncé, teneur élevée en matière organique et en P, forte activité biologique, taux de saturation en bases élevé ; résultant d'une longue pratique d'agriculture, de fertilisation et d'application de résidus organiques
	Horizon hydrique	Dans les rizières inondées : couche sous l'horizon anthraquique montrant des caractéristiques redox-morphiques et/ou une accumulation de Fe et/ou Mn
	Horizon irrigrique	Structure uniforme, teneur en matière organique au moins modérée, forte activité biologique ; accumulation progressive via une eau d'irrigation riche en sédiments
	Horizon plaggique	Foncé, teneur en matière organique au moins modérée, sableux ou loameux; résultant de l'application de matériaux gazonneux et d'excréments
	Horizon prélique	Foncé, teneur élevée en matière organique et en P, faible activité biologique, teneur élevée en Ca et Mg échangeables, résidus de charbon de bois et/ou artefacts ; Terres Foncées Amazoniennes incluses
	Horizon terrique	Couleur liée au matériau d'origine, taux de saturation en bases élevé résultant d'apports de matériaux minéraux et de labours profonds
2	Horizons diagnostiques pouvant être organiques ou minéraux	
	Horizon calcique	Accumulation de carbonates secondaires, non cimenté
	Horizon cryique	Gelé en permanence (glace visible ou ≤ 0 °C si absence d'eau)
	Horizon fulvique	Propriétés andiques, matière organique très humifiée, rapport acides fulviques / acides humiques élevé
	Horizon mélanique	Propriétés andiques, matière organique très humifiée, rapport acides fulviques / acides humiques bas, noirâtre
	Horizon salique	Haute teneur en sels facilement solubles
	Horizon thionique	Présence d'acide sulfurique et pH très bas
3	Horizons diagnostiques organiques	
	Horizon folique	Couche organique, non saturée par l'eau et non drainée
	Horizon histique	Couche organique, saturée par l'eau ou drainée
4	Horizons diagnostiques minéraux de surface	

Horizon chernique	Epais, très foncé, taux de saturation en bases élevé, teneur en matière organique moyenne à élever, bien structuré, forte activité biologique (cas particulier de l'horizon mollique)
Horizon mollique	Epais, foncé, taux de saturation en bases élevé, teneur en matière organique moyenne à élevée, non massif et dur quand il est sec
Horizon umbrique	Epais, foncé, taux de saturation en bases faible, teneur en matière organique moyenne à élevée, non massif et dur quand il est sec
5	Autres horizons diagnostiques minéraux liés à l'accumulation de substances due à des processus de migration verticaux ou latéraux
Horizon argique	Couche subsuperficielle avec contenu en argile nettement plus élevé que dans la couche sus-jacente et/ou présence d'argile illuviale
Horizon durique	Concrétions ou nodules cimentés ou indurés par la silice
Horizon ferrique	≥ 5 % concrétions et/ou nodules rougeâtres à noirâtres ou ≥ 15 % taches grossières rougeâtres à noirâtres, avec accumulation d'oxydes de Fe (et Mn)
Horizon natrique	Couche subsuperficielle avec contenu en argile nettement plus élevé que dans la couche sus-jacente et/ou présence d'argile illuviale ; teneur élevée en Na échangeable
Horizon pétrocalcique	Accumulation de carbonates secondaires cimentés ou indurés de manière assez continue
Horizon pétrodurique	Accumulation de silice secondaire cimentée ou indurée de manière assez continue
Horizon pétrogypsique	Accumulation de gypse secondaire cimenté ou induré de manière assez continue
Horizon petroplinthique	Nappe de concrétions et/ou de nodules connectés jaunâtres, rougeâtres et/ou noirâtres ou de concentrations en motifs lamellaires, polygonaux ou réticulés ; teneur élevée en oxydes de Fe, au moins dans les concrétions, nodules ou concentrations ; cimenté ou induré de manière assez continue
Horizon pisoplinthique	≥ 40 % concrétions et/ou nodules fortement cimentés ou indurés, jaunâtres, rougeâtres et/ou noirâtres, avec accumulation d'oxydes de Fe
Horizon plinthique	≥ 15 % (seuls ou en combinaison) concrétions et/ou nodules rougeâtres ou concentrations en motifs lamellaires, polygonaux ou réticulés ; teneur élevée en oxydes de Fe, au moins dans les concrétions, nodules ou concentrations
Horizon sombrique	Accumulation subsuperficielle de matière organique autre que celle des horizons spodique ou natrique

Horizon spodique	Accumulation subsuperficielle de matière organique et/ou de Fe et Al
6	Autres horizons diagnostiques minéraux
Horizon cambique	Evidence d'altération pédogénétique ; ne satisfait pas aux critères des horizons diagnostiques indicateurs d'altération plus forte ou de processus d'accumulation
Horizon ferrallique	Fortement altéré ; dominé par les kaolinites et les oxydes
Horizon fragique	Structure tellement compacte que les racines et l'eau de percolation pénètrent uniquement le long des faces entre les agrégats; non cimenté
Horizon nitique	Riche en argile et en oxydes de Fe, structure modérée à forte, faces des agrégats brillantes
Horizon protovertique	Influencé par les argiles gonflantes
Horizon vertique	Dominé par les argiles gonflantes

Annexe 2.2 : Propriétés diagnostiques de la WRB (2014)

N°	Noms	Description simplifiée
1	Propriétés diagnostiques liées aux caractéristiques de surface	
	Propriétés aridiques	Caractéristiques de surface des sols sous conditions arides
	Propriétés takyriques	Couches de surface de texture lourde sous conditions arides dans des sols périodiquement inondés (cas particulier des propriétés aridiques)
	Propriétés yermiques	Pavement et/ou couche vésiculaire de sols sous conditions arides (cas particulier des propriétés aridiques)
2	Propriétés diagnostiques définissant les relations entre deux couches	
	Glosses albéluviques	Digitation de matériau de texture plus grossière et plus clair dans un horizon argique formant des langues verticales continues (cas particulier des propriétés rétiques)
	Différence texturale abrupte	Augmentation très marquée en argile sur une profondeur limitée
	Discontinuité lithique	Différences dans le matériau parental organiques) et de labours profonds
	Propriétés rétiques	Digitation de matériau de texture plus grossière et plus clair dans un horizon argique ou natrique
3	Autres propriétés diagnostiques	
	Conditions réductrices	Valeur de pH basse et/ou présence de sulfures, méthane ou Fe réduit
	Fentes de retrait	S'ouvrent et se ferment à cause d'argiles qui gonflent et se rétractent
	Propriétés andiques	Minéraux peu cristallisés et/ou complexes organo-métalliques
	Propriétés anthriques	S'applique aux sols à horizons mollique ou umbrique, si ces horizons sont créés ou fortement transformés par l'homme
	Propriétés gériques	CEC effective très basse et/ou agissant comme échangeur d'anions
	Propriétés gleyiques	Saturé par l'eau de nappe (ou par des gaz ascensionnels) suffisamment longtemps pour que surviennent des conditions réductrices
	Propriétés protocalciques	Couche organique, non saturée par l'eau et non drainée
	Horizon histique	Couche organique, saturée par l'eau ou drainée
	Propriétés sidéraliques	CEC relativement basse
	Propriétés stagniques	Saturé par l'eau de surface (ou par un liquide), au moins temporairement et pendant suffisamment longtemps pour que surviennent des conditions réductrices

Propriétés vitriques	≥ 5 % (par comptage granulaire) verres volcaniques et matériaux apparentes et ayant des quantités limitées de minéraux peu cristallisés et/ou de complexes organo-métalliques
Roche continue	Matériau consolidé (à l'exclusion des horizons pédogénétiquement cimentés ou indurés)

Annexe 2.3 : Matériaux diagnostiques de la WRB (2014)

N°	Noms	Description simplifiée
1	Matériaux diagnostiques liés à la teneur en carbone organique	
	Carbone organique du sol	Carbone organique ne rencontrant pas les critères diagnostiques des artefacts
	Matériau minéral	< 20 % carbone organique du sol
	Matériau organique	≥ 20 % carbone organique du sol
2	Matériau diagnostique lié à la couleur	
	Matériau albique	Terre fine peu colorée, exprimée par une valeur Munsell élevée et un chroma bas
3	Matériaux diagnostiques technogéniques (considérés principalement comme matériaux parentaux)	
	Artefacts	Créés, fortement modifiés ou amenés en surface par l'homme ; ne s'en suit aucune modification importante des propriétés chimiques ou minéralogiques
	Matériau technique dur	Matériau consolidé et relativement continu résultant d'un processus industriel
4	Autres matériaux diagnostiques (considérés principalement comme matériaux parentaux)	
	Matériau calcarique	≥ 2 % équivalent carbonate de calcium, hérité du matériau parental
	Matériau colluvique	Mélange hétérogène déplacé vers le bas d'une pente
	Matériau dolomitique	≥ 2 % matériau avec rapport $\text{CaCO}_3 / \text{MgCO}_3 < 1,5$
	Matériau fluviatique	Dépôts fluviatiques, marins ou lacustres à stratifications nettes
	Matériau gypsirique	≥ 5 % gypse, hérité au moins en partie, du matériau parental
	Matériau hypersulfidique	Matériau sulfidique capable d'une acidification sévère
	Matériau hyposulfidique	Matériau sulfidique incapable d'une acidification sévère
	Matériau limnique	Déposé dans l'eau par précipitation ou via l'action d'organismes aquatiques
	Matériau ornithogénique	Restes d'oiseaux ou d'activité aviaire
	Matériau sulfidique	Contenant des sulfures inorganiques décelables
	Matériau téphrique	≥ 30 % (par comptage granulaire) verres volcaniques et matériaux apparentes

Annexe 3 : Guide simplifié pour les Groupes de sols de référence de la WRB (2014)

Description	RSG
1. Sols avec couches organiques épaisses	Histosols
2. Sols avec forte influence humaine : <ul style="list-style-type: none"> - sous usage agricole long et intensif - contenant des quantités importantes d'artéfacts 	Anthrosols Technosols
3. Sols avec limitations au développement racinaire : <ul style="list-style-type: none"> - affectés par du permafrost - minces ou avec de nombreux éléments grossiers - à teneur élevée en Na échangeables - conditions humidité-sécheresse alternantes, gonflement retrait des argiles - concentration élevée en sels solubles 	Cryosols Leptosols Solonetz Vertisols Solonchaks
4. Sols dominés par la chimie Fe/Al : <ul style="list-style-type: none"> - affectés par une nappe phréatique, par les marées ou submergées - allophanes ou complexes Al-humus - accumulation en profondeur d'humus et/ou d'oxydes - accumulation et redistribution du Fe - argile à faible activité, fixation du P, nombreux oxydes de Fe, structure forte - dominance de kaolinite et d'oxydes - eau stagnante, différence texturale abrupte - eau stagnante, différence structurale et/ou différence texturale modérée 	Gleysols Andosols Podzols Plinthosols Nitisols Ferralsols Planosols Stagnosols
5. Accumulation prononcée de MO dans la couche superficielle minérale : <ul style="list-style-type: none"> - couche superficielle très foncée, carbonates secondaires - couche superficielle foncée, carbonates secondaires - couche superficielle foncée, pas de carbonates secondaires, teneur en bases élevée - couche superficielle foncée, faible teneur en bases 	Chemozems Kastanozems Phaeozems Umbrisols

<p>6. Accumulation de sels moyennement solubles ou de substances non alcalines :</p> <ul style="list-style-type: none"> - accumulation de concrétions ou nodules, et cimentation par la silice secondaire - accumulation de gypse secondaire - accumulation de carbonates secondaires 	<p>Durisols Gypsidols Calcisols</p>
<p>7. Sols à sous-sol enrichi en argile :</p> <ul style="list-style-type: none"> - digestion de matériau grossier, peu coloré, dans une couche plus colorée et de texture plus fine - argile à faible activité, faible teneur en bases : - argile à faible activité, teneur élevée en bases - argile à forte activité, faible teneur en bases - argile à forte activité, teneur élevée en bases 	<p>Retisols Acrisols Lixisols Alisols Luvisols</p>
<p>8. Sols à différenciation de profil faible ou nulle :</p> <ul style="list-style-type: none"> - modérément développés - sableux - à sédiments stratifiés fluviaux, marins ou lacustres - sans développement de profil significatif 	<p>Cambiosols Arenosols Fluvisols Régosols</p>

Annexe 4 : Contraintes agronomiques des sols au regard des propriétés mopho-physiques et du pH du sol

Annexe 4.1 : Limitations agricoles en fonction de la pente du terrain

	Degré des limitations agricoles	Types de cultures		
		Cultures annuelles	Cultures pérennes et pâturages	Arbres
Pentes (pc)	Limitation nulle	0 – 2	0 – 8	0 – 16
	Limitation faible	2 – 8	8 – 16	16 – 30
	Limitation moyenne	8 – 16	16 – 30	> 30
	Limitation forte	16 – 30	> 30	
	Limitation très forte	> 30		

Source : Sys & Verheye (1978).

Annexe 4.2 : Limitations agricoles selon la profondeur du sol

Groupe des cultures	Degré de limitation en fonction des profondeurs (cm)				
	Nulle	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Céréales et pâturages	> 90	50-90	20-50	10-20	< 10
Cultures annuelles de tubercules	> 90	60-90	40-60	10-40	< 20
Plantes pérennes à enracinement profond	> 150	90-150	60-90	30-60	< 30

Source : Sys & Verheye (1978).

Annexe 4.3: Limitations agricoles dues aux gravillons ferrugineux

Gravillons (pc du volume du sol)	Limitations		
	Profondeur du sommet de la nappe de gravats (cm)	Plantes annuelles	Plantes pérennes
3-15	20-50	Nulle	Nulle
	50-80	Nulle	Nulle
	80-100	Nulle	Faible
15-40	20-50	Faible	Moyenne
	50-80	Nulle	Faible
	80-100	Nulle	Nulle
40-75	20-50	Moyenne	Forte à très forte
	50-80	Faible	Moyenne
	80-100	Nulle	Faible
> 75	Considéré comme limitant le sol utile dans tous les cas		

Source : Sys & Verheye (1978).

Annexe 4.4 : Limitations agricoles en fonction régime hydrique du sol

Profondeur du sommet de l'horizon d'hydromorphie temporaire (cm)	Limitations	
	Plantes annuelles	Plantes pérennes
0-30	Forte à très forte	Très forte
30-40	Faible à nulle sauf chez le cotonnier	Forte sauf chez le bananier qui peut supporter une hydromorphie temporaire entre 25 à 30 cm de profondeur
40-60	Nulle	Faible
> 60	Nulle	Nulle

Source : Sys & Verheye (1978).

Annexe 4.5 : Limitations agricoles en fonction du pH du sol

Valeurs de pH	Interprétations	Limitations agricoles
pH < 5,0-5,2	Sols très acides avec risques de toxicité aluminique et et manganique	Convenables surtout aux plantes acidophiles (hévéa, théier, ananas, passiflore, melinis) et à certaines plantes tolérantes, manioc, maïs, riz, bananier avec, souvent, des baisses de rendement.
pH variant de 5,2 à 5,5		Risques d'acidification après quelques années de culture. Les plantes acidophiles peuvent encore être cultivées jusque vers 5,5.
pH voisin de 5,5	Sols acides	Convenables à la plus grande partie des plantes cultivées.
pH variant de 6 à 7	Sols bien saturés en bases	Convenables à pratiquement toutes les cultures.
pH variant de 7 à 8	Sols contenant des sels libres, le plus souvent du calcaire	Risques de chlorose calcaire pour les plantes sensibles.

Source : Sys & Verheye (1978)

Annexe 5 : Valeurs moyennes des caractéristiques physiques des sols étudiés

Sites	Eléments grossiers (pc)	Granulométrie			Texture
		A	L	S	
		(pc)	(pc)	(pc)	
Bla	$> 75 \pm 6,53a$	$20,67 \pm 0,48a$	$29,36 \pm 1,48b$	$49,7 \pm 0,48b$	Limon argilo-sableux
Daloa	$> 80 \pm 3,08a$	$18,52 \pm 2,51a$	$36,1 \pm 1,75a$	$44,71 \pm 2,50c$	Limoneuse
Gonaté	$< 10 \pm 1,45b$	$19,46 \pm 0,42a$	$27,35 \pm 2,42b$	$52,8 \pm 5,24b$	Limon sableux
Loboguiguia	$> 80 \pm 3,96a$	$19,84 \pm 0,73a$	$19,2 \pm 0,16d$	$59,98 \pm 5,19a$	Limon sableux
Madoguhé	$< 10 \pm 1,83b$	$20,62 \pm 0,23a$	$27,57 \pm 1,33b$	$51,21 \pm 2,30b$	Limon argilo-sableux
Wandaguhé	$> 75 \pm 3,08a$	$18,97 \pm 0,07a$	$20,2 \pm 0,45d$	$60,8 \pm 1,44a$	Limon sableux
Zépréguhé	$> 75 \pm 4,00a$	$19,58 \pm 0,43a$	$25,5 \pm 3,43c$	$54,7 \pm 5,19ab$	Limon sableux

Annexe 6 : Valeurs moyennes des caractéristiques chimiques des sols étudiés

Sites	pHeau	C (pc)	Nt (pc)	C/Nt	M.O (pc)	P.ass (g.kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol.kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	Sbe (cmol.kg ⁻¹)	CEC (cmol.kg ⁻¹)	V (pc)	Fe ²⁺ (g.kg ⁻¹)	Mn ³⁺ (g.kg ⁻¹)	Cu ⁺ (g.kg ⁻¹)	Zn ³⁺ (g.kg ⁻¹)
Bla	5,1 ±0,10 a	1,14 ±0,77 ab	0,09 ±0,04 ab	10,92 ±2,23 a	1,97 ±1,33 ab	42,34 ±1,49 a	1,02 ±0,55 ab	0,47 ±0,08 a	0,06 ±0,00 ab	0,27 ±0,45 a	1,83 ±0,52 a	12,36 ±3,70 bc	15,01 ±3,08 ab	52,85 ±9,31 a	82,73 ±11,57 b	2,71 ±1,54 a	4,71 ±3,04 a
Dal	5,9 ±0,21 b	1,85 ±0,70 b	0,13 ±0,04 b	14,98 ±5,56 b	3,18 ±1,21 b	43,96 ±3,05 b	2,45 ±0,63 c	1,24 ±0,46 a	0,07 ±0,03 b	0,07 ±0,00 a	3,86 ±1,00 b	7,95 ±2,96 ab	53,47 ±21,49 c	251,75 ±10,53 d	163,80 ±18,20 d	6,23 ±1,48 d	4,89 ±0,12 a
Gon	4,9 ±0,34 a	0,57 ±0,46 a	0,06 ±0,04 a	8,84 ±1,76 a	0,99 ±0,80 a	43,80 ±2,63 b	1,21 ±0,30 b	0,48 ±0,16 a	0,06 ±0,00 ab	0,05 ±0,00 a	1,82 ±0,38 a	11,92 ±4,74 bc	16,64 ±4,38 ab	71,71 ±16,55 b	45,18 ±28,18 a	4,21 ±0,46 ab	8,20 ±0,79 b
Lob	5,7 ±0,29 b	0,74 ±0,38 a	0,07 ±0,03 a	10,12 ±0,78 a	1,28 ±0,66 a	41,50 ±2,05 a	0,85 ±0,24 ab	0,49 ±0,06 a	0,05 ±0,00 a	0,04 ±0,00 a	1,44 ±0,18 a	16,83 ±8,28 c	10,84 ±6,77 a	47,20 ±4,86 a	96,05 ±26,14 b	3,76 ±0,98 ab	5,40 ±0,99 a
Mad	5,0 ±0,14 a	0,63 ±0,25 a	0,05 ±0,02 a	12,31 ±2,45 a	1,09 ±0,43 a	40,55 ±2,20 a	0,85 ±0,13 ab	0,48 ±0,04 a	0,06 ±0,00 ab	0,04 ±0,00 a	1,45 ±0,18 a	7,33 ±1,89 ab	21,17 ±6,38 ab	84,95 ±8,16 b	31,40 ±21,65 a	4,65 ±0,64 bc	8,84 ±0,34 b
Wan	5,1 ±0,16 a	0,66 ±0,36 a	0,05 ±0,02 a	11,71 ±1,41 ab	1,14 ±0,63 a	42,74 ±1,29 a	0,68 ±0,12 a	0,49 ±0,01 a	0,07 ±0,00 ab	0,08 ±0,11 a	1,33 ±0,19 a	4,68 ±0,87 a	29,29 ±5,81 b	103,11 ±10,32 c	20,23 ±15,72 a	5,86 ±1,14 cd	7,72 ±0,22 b
Zép	5,0 ±0,09 a	0,71 ±0,32 a	0,06 ±0,03 a	11,55 ±1,42 ab	1,22 ±0,55a	42,10 ±2,44 a	1,03 ±0,22 ab	0,57 ±0,09 a	0,06 ±0,00 ab	0,09 ±0,03 a	1,76 ±0,28 a	11,00 ±5,37 ac	22,14 ±16,29 ab	249,03 ±11,22 d	126,30 ±26,23 c	6,91 ±0,96 d	4,52 ±0,12 a
P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,02	0,000	0,000	0,037	0,116	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

- Nt : Azote total ; MO : Matière organique ; P.ass : Phosphore assimilable ; Sbe : Somme des bases échangeables ; V : Taux de saturation en bases.
- Dal : Daloa ; Gon : Gonaté ; Lob : Loboguiguia ; Mad : Madoguhé ; Wan : Wandaguhé ; Zép : Zépréguhé ; p : Probabilité.
- Pour chaque site, les moyennes d'une même colonne affectées de lettres différentes sont statistiquement différentes au seuil de 5 pc.

PUBLICATIONS

Publication N°1 :

Publication N°2

RÉSUMÉ