



ANNEE UNIVERSITAIRE:

2018 - 2019

N° D'ORDRE:

012/2019

CANDIDAT

Nom: KOUAME

Prénoms: Amany
Guillaume

Soutenue publiquement le
07 décembre 2019

THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE

Mention: **AGRICULTURE ET FORESTERIE
TROPICALE**

Spécialité: **AGRO-PEDOLOGIE**

THEME:

**IMPACT DES SYSTEMES AGROFORESTIERS A
BASE DE CACAOYERS SUR LES PROPRIETES
PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL ET LA
PRODUCTIVITE DES EXPLOITATIONS
CACAOYERES DE LA SOUS-PREFECTURE DE
KOKUMBO (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

JURY

M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon
Guédé (UJLoG), **Président**

M. BAKAYOKO Sidiky, Maître de Conférences, Université Jean
Lorougnon Guédé (UJLOG), **Directeur de thèse**

M. CAMARA Mameri, Directeur de recherche, Centre National de
Recherche Agronomique (CNRA), **Rapporteur**

M. KOUADIO Konan-Kan Hippolyte, Maître de Conférences,
Université Félix Houphouet Boigny (UFHB), **Examineur**

M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences, Université Jean
Lorougnon Guédé (UJLOG), **Examineur**



ANNEE UNIVERSITAIRE:

2018 - 2019

N° D'ORDRE:

012/2019

CANDIDAT

Nom: KOUAME

Prénoms: Amany
Guillaume

Soutenue publiquement le
07 décembre 2019

THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE

Mention: **AGRICULTURE ET FORESTERIE
TROPICALE**

Spécialité: **AGRO-PEDOLOGIE**

THEME:

**IMPACT DES SYSTEMES AGROFORESTIERS A
BASE DE CACAOYERS SUR LES PROPRIETES
PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL ET LA
PRODUCTIVITE DES EXPLOITATIONS
CACAOYERES DE LA SOUS-PREFECTURE DE
KOKUMBO (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

JURY

M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire, Université Jean Lorougnon
Guédé (UJLoG), **Président**

M. BAKAYOKO Sidiky, Maître de Conférences, Université Jean
Lorougnon Guédé (UJLOG), **Directeur de thèse**

M. CAMARA Mameri, Directeur de recherche, Centre National de
Recherche Agronomique (CNRA), **Rapporteur**

M. KOUADIO Konan-Kan Hippolyte, Maître de Conférences,
Université Félix Houphouet Boigny (UFHB), **Examineur**

M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences, Université Jean
Lorougnon Guédé (UJLOG), **Examineur**

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	VI
REMERCIEMENTS.....	VII
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES ANNEXES.....	XVI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES.....	2
CHAPITRE I : SYSTEMES AGROFORESTIERS A BASE DE CACAOYERS.....	7
I.1. Systèmes agroforestiers à base de cacaoyers.....	7
I.1.1 Origine.....	7
I.1.2 Définition de l'Agroforestérie.....	7
I.1.3. Système agroforestier, enjeux pour une agriculture durable.....	8
I.2. Généralités sur le cacaoyer (Theobroma cacao L.).....	10
I.2.1. Origine et répartition géographique.....	10
I.2.2 Biologie et diversité génétique du cacaoyer.....	12
I.2.2.1. Biologie de la plante.....	12
I.2.2.2. Diversité génétique du cacaoyer.....	15
I.3. Exigences écologiques.....	17
I.4. Importance de la production cacaoyère.....	18
I.4.1. Dans le monde.....	18
I.4.2. En Côte d'Ivoire.....	18
I.4.3. Importance économique et agro-industrielle du cacao.....	19
I.4.3.1. Importance économique.....	19
I.4.3.2. Importance agro-Industrielle.....	19
I.4.4. Systèmes et mode de production du cacao.....	19
I.4.4.1. Système de production extensive.....	20
I.4.4.2. Système de production intensive.....	20
I.4.4.3. Mode de production cacaoyère.....	21

CHAPITRE II : NOTION, FONCTIONS ET QUALITE DU SOL.....	23
II.1. Notion du sol	23
II.2. Fonctions et services du sol	23
II.3. Qualité et notion d'indicateurs de fertilité des sols	26
II.3.1. Qualité des sols	26
II.3.2. Notion d'indicateurs de fertilité des sols	27
II.3.2. 1. Caractéristiques et qualité des sols	30
II.3.2.2. Indicateurs physico-chimiques de la qualité des sols	31
II.3.2.3. Organismes vivants comme outil de diagnostic de la qualité des sols	32
CHAPITRE III : CADRE DE L'ETUDE	35
III.1. Situation géographique.....	35
III.2. Climat	36
III.3. Végétation	37
III.4. Relief	37
III.5. Hydrographie.....	37
III.6. Géologie	38
III.7. Sols	39
III.8. Démographie et activités économiques	40
III.8.1. Démographie	40
III.8.2 Activités économiques des populations	41
III.8.2.1 Exploitation de l'or.....	41
III.8.2.2. Agriculture	42
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	44
CHAPITRE IV : MATERIEL	45
IV.1. Matériel végétal.....	45
IV.2. Matériel de terrain	46
IV.3. Matériel de laboratoire	48
IV.4. Matériel d'analyse des données	49
CHAPITRE V : METHODES	50
V.1 Choix des plantations expérimentales	50
V.2. Caractérisation du site d'étude	50

V.2.1 - Collectes de données socio-démographiques et phyto-écologiques	50
V.3. Analyse en laboratoire.....	55
V.3.1. Détermination des propriétés physiques du sol.....	55
V.3.2. Détermination des propriétés chimiques du sol	55
V.4. Collecte des données des rendementsdes plantations.....	56
V.4.2. Dispositif expérimental	58
V.4.3. Production du cacao marchand.....	60
V.5. Traitement statistique des données.....	61
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	62
CHAPITRE VI : RESULTATS	63
VI.1. Caractéristiques floristiques des agrosystèmes et leur valeurs d’usages dans les plantations cacaoyères.....	63
VI.1.1. Espèces utilisés par les populations	63
VI.1.2 - Affinités chorologiques de plantes d’usages	66
VI.3. Densité des espèces végétales associée aux cacaoyers dans les agrosystèmes.....	70
VI.4. Caractéristiques morphologiques des sols des agrosystèmes de la zone d’étude	71
VI.4.1. Profils du sol	71
VI.4.2. Caractéristiques morphologiques des profils des sols observés.....	71
VI.4.3. Caractéristiques physico-chimiques du sol identifiés	75
VI.4.3.1. Caractéristiques physiques.....	75
VI.5. Production des plantations des cacaoyers dans les agrosystèmes.....	94
VI.6. Corrélation entre les paramètres du rendement des cacaoyers et les paramètres physico- chimiques dans les agrosystèmes	94
CHAPITRE VII : DISCUSSION	100
VII.1. Espèces végétales associées à la cacaoculture et agrosystème	100
VII.2. Intérêts des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers	102
VII.3. Caractéristiques morphologiques et fertilité du sol des agrosystèmes à base de cacaoyers	104
VII.4. Rendement et productivité des plantations cacaoyères dans les systèmes agroforestiers	107
CONCLUSION GÉNÉRALE, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	109
CONCLUSION GENERALE	110

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113
ANNEXES.....	XVII
PUBLICATION TIREE DE LA THESE.....	30

DEDICACE

J'entame cette dédicace par une pensée à mes parents,

Mon regretté père

YAO Kouamé,

Tu nous as donné la vie. Dans la souffrance, tu as œuvré. Tu as rassemblé efforts et moyens pour nous procurer l'essentiel, notre éducation.

Nous te devons beaucoup. Que le tout-puissant te garde auprès de lui.

Repose en paix, père.

Ma regrettée mère

GBANGBO Amenan,

Ta témérité, ton abnégation, ton courage au travail, ont été pour moi, une source d'inspiration. Tes prières m'ont accompagné jusqu'à ce jour. Saches mère que, ton petit garçon a grandi et prend soin de ses frères et sœurs.

Cette thèse, mère, est pour moi, une reconnaissance à ton immense œuvre accomplie sur la terre des Hommes.

Repose en paix, mère.

REMERCIEMENTS

Bien qu'une thèse porte un nom, elle reste une œuvre collective. Malgré les difficultés, les périodes d'hésitation qui ont jonché ce travail, cette expérience restera pour moi, un cadre de manifestation de l'amour, de l'amitié et du don de soi. Le présent travail n'aurait pu être mené jusqu'à son terme sans la contribution, le soutien et les encouragements d'un certain nombre de personnalités scientifiques et d'amis à qui je voudrais exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude.

Ainsi, j'adresse ma profonde gratitude à Madame la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé, Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE pour avoir accepté, sans condition, et facilité, mon inscription à l'Université Jean Lorougnon Guédé,

J'associe ensuite à ces remerciements, Professeur KONE Tidiani, Vice-Président chargé de la Pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique et Docteur AKAFFOU Doffou Sélastique, Maître de Conférences, Vice-Président chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour l'énorme travail qu'ils abattent pour la formation des étudiants.

Mes sincères remerciements :

- A Docteur TRAORE Karidia, Maître de conférences, Directrice de l'UFR Agroforestérie pour m'avoir permis de réaliser ce travail durant son mandat de directrice de l'UFR Agroforestérie ;

- A Docteur AYOLIE Koutoua, Maître de conférences, Responsable du laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole pour avoir facilité mon intégration au sein dudit laboratoire ;

- A Docteur BAKAYOKO Sidiky, Maître de conférences, pour avoir accepté malgré ses multiples charges, l'encadrement de ce travail en tant que directeur scientifique et pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre de conduire à terme ce travail. Je voudrais vous remercier pour, la qualité de l'encadrement, votre disponibilité, votre grande générosité et votre investissement dans la réalisation de ce travail. Les heures de travail à vos côtés, m'ont permis d'apprendre davantage de votre personnalité. Votre rigueur a su éveiller en moi le goût du travail et m'a permis d'améliorer le présent manuscrit. Je ne saurais en si peu de mots, vous témoigner toute ma reconnaissance.

Mes sincères remerciements aux membres du jury :

- Monsieur KONE Tidiani, professeur titulaire pour avoir accepté de présider le jury,
- Monsieur CAMARA Mameri, Directeur de recherche, CNRA, pour avoir accepté d'instruire ce mémoire et de faire parti du jury en tant que rapporteur,
- Monsieur KOUADIO Konan-Kan Hippolyte, Maître de Conférences, pour avoir accepté de prendre part au jury en tant qu'examineur,
- Monsieur SORO Dogniméton, Maître de Conférences, pour avoir accepté de prendre part au jury en tant qu'examineur.

Merci à Docteur ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de conférences, Directeur du Département Agropédologie et SIG de l'UFR d'Agroforestérie de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour avoir accepté que ce travail soit conduit dans son Département ;

J'ai été singulièrement impressionné par l'ambiance toute particulière qui règne au sein du Département Agropédologie et SIG de l'UFR Agroforestérie tout au long de la réalisation de ce travail. Je veux exprimer ici mes sincères remerciements aux docteurs GUEI Arnauth Martinez, KONATE Zoumana, ABOBI Akré Damien Herbert, N'GANZOUA Kouamé René, BAYALA Roger, KONAN Kouamé Firmin, KPANGUI Kouassi Bruno, tous enseignant-chercheurs à l'Université Jean Lorougnon Guédé pour leur contribution à l'amélioration de cette thèse ;

Merci spécial :

Aux Professeur AKA Kouamé, Professeur BIEMI Jean, professeur DJRO Chérubin, professeur DIGBEHI Bruno, professeur SORO Nagnin, professeur JOURDA Patrice, professeur AFFIAN Kouadio, tous enseignant-chercheurs à l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, pour la formation reçue. Merci infiniment à feu Professeur ASSA Ayémou pour m'avoir appris les grandes bases des Science du sol.

Ce travail n'aurait pas pu se réaliser sans l'accord et les encouragements de ma hiérarchie. Je remercie Docteur SIDIKI Cissé, Directeur Général de l'ANADER, Messieurs COULIBALY Hamadou, Directeur des appuis aux filières des productions végétales et animales, BAGROU Guéda, Directeur Régionale Sud-Ouest, COMOIE Bernabé, Chef de zone à Soubré et N'DOLI Oi N'doli, chef de zone de San-Pédro;

Les travaux de cette thèse m'ont amené à séjourner à plusieurs reprises dans le département de Toumodi où j'ai bénéficié de l'appui de la zone ANADER de ladite localité. Je tiens à remercier Messieurs KOUAKOU Kouakou Gilbert (Chef de zone) et TANI Aka

(Technicien spécialisé en cultures pérennes) qui ont autorisé leurs collaborateurs à m'accompagner dans les villages et plantations. Messieurs N'GUESSAN Konan et KPANGUI Ehounou Blaise, animateurs de développement rural respectif des centres de vulgarisation de Kokumbo et d'Assenzè m'ont énormément aidé à mener à bien les activités de terrain. Qu'ils trouvent ici, l'expression de mes sincères remerciements ;

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les producteurs qui m'ont reçu chez eux et consacré beaucoup de leur temps à répondre à mes questions parfois embarrassantes et de m'avoir autorisé l'accès à leurs cacaoyères. Leur participation à l'échantillonnage et leur accueil me laissent des souvenirs qui resteront longtemps gravés dans ma mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Il s'agit principalement des producteurs du village de Niamkey-Konankro et du chef dudit village, Monsieur N'DRI Konan. Je voudrais dire sincèrement merci à mon tuteur et guide, Monsieur N'guessan Konan Alexis et à sa famille.

- Merci à tous ceux et celles qui m'ont aidé et encouragé en chemin :

Monsieur YAO Kouamé François et madame à Toumodi pour leur accueil et leur aide inconditionnelle dans les aspects pratiques et logistiques ; Messieurs KOUADIO Kouakou Bob et KONAN Yao Jean-Claude à l'INP-HB de Yamoussoukro ;

- Merci au couple KOUASSI Kouamé Jean Baptiste à Daloa pour leur accueil et soutien lors de mes nombreux séjours dans ladite ville dans le cadre de ce travail ;

- Merci à Monsieur KONAN Elysée pour son soutien spirituel ;

- Merci à Monsieur BOTI Bi Tra Jean Baptiste Grégoire à Yamoussoukro pour son soutien financier ;

- Merci à mes amis KOUAKOU N'Goran Eugène, BEBOR Tiba et KOFFI Loukou Emmanuel qui ont toujours été d'un grand soutien dans ma vie.

Je remercie ma "grande" famille sans qui rien n'aurait été possible. Un merci particulier à mon aîné, KOUAME N'Da Augustin qui sans hésiter, a pris le relais des parents au plan financier et matériel dès que le besoin s'est fait sentir. J'ai toujours bénéficié de ses encouragements dans mes moments de stress et d'angoisse. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi.

Je remercie également mon épouse, Yvonne Amani, et mes trois filles, Yasmine Blédja, Ange-Pamela et Moyé-sran Ashley, à qui j'ai imposé mes nombreux voyages et absences.

Enfin, merci à toutes ces personnes que j'ai oublié de citer pour leur contribution et soutien à la réalisation de ces travaux.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AGC	: Agrosystème complexe
AGM	: Agrosystème mixte
ANADER	: Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
CDR	: carré de densité et de rendement
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CFK	: Compagnie Française de Kong
CIAT	: Centre International d'Agriculture Tropicale
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
CRDI	: Centre de Recherche pour le Développement International
CTA	: Centre Technique de Coopération Agricole
DDC	: Direction du Développement et de la Coopération
ESA	: Ecole Supérieure d'Agronomie
ETM	: Eléments traces métalliques
FAO	: Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
GISQ	: General indicator of soil quality
HAP	: Hydrocarbures aromatiques polycycliques
ICCO	: International Cocoa Organization (Organisation Internationale du Cacao)
INP-HB	: Institut National Polytechnique Houphouët Boigny
INS	: Institut National de la Statistique
IRAT	: Institut de Recherche d'Agriculture Tropicale
j	: jours
KYCCL	: Kokumbo Ivory Coast Company Limited
MEA	: Millenium ecosystem assessment
MINAGRI	: Ministère de l'Agriculture
MINADER	: Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
MO	: Matière Organique
MOS	: Matière Organique du Sol

ORSTOM	: Office de Recherche Scientifique et Technique d’Outre-Mer
Pass	: Phosphore assimilable
p.c.	: Pourcentage
PSOL	: Plein soleil
QS	: Qualité du Sol
V	: taux de saturation en bases échangeables du complexe adsorbant
S	: somme des bases échangeables.
SAF	: système agroforestier
SE	: Service écosystémique
SMFB	: Société Minière et Foncière du Bandama

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Différents types de services rendus par les systèmes agroforestiers	10
Tableau II : Caractéristiques d'un bon sol pour le cacaoyer	17
Tableau III : Types et exemples de services écosystémiques fournis par les sols	25
Tableau IV : Indicateurs physico-chimiques fréquemment utilisés pour évaluer la qualité des sols et impliqués dans la fourniture des services écosystémiques	29
Tableau V : Classification des sols proposée par la FAO (lavoie et al., 1994).....	31
Tableau VI : Effectif des agrosystèmes en fonction de l'âge	59
Tableau VII : Espèces végétales associées dans la ccacaoculture dans la zone d'étude ..	65
Tableau VIII : Proportions des types d'utilisations des espèces de différentes localités..	66
Tableau IX : Variation des types chorologiques des espèces utilisées par les populations	66
Tableau X : Densité de cacaoyers et des espèces végétales associées en fonction des agrosystèmes dans la zone d'étude.	70
Tableau XI : Caractéristique morpho-pédologiques du profil de sol de la zone d'étude ..	74
Tableau XII : Caractérisation de différents agroforêts par rapport à l'humidité, l'activité biologique et le niveau de dégradation du sol.....	75
Tableau XIII : Granulométrie des sols sous cacaoyer de la zone d'étude	76
Tableau XIV : Acidité des sols sous cacaoyers de la zone d'étude.....	77
Tableau XV : Taux de matière organique et de phosphore assimilable des sols étudiés..	78
Tableau XVI : Cations échangeables et capacité d'échange cationique des sols étudiés .	79
Tableau XVII : Taux de saturation des bases échangeables sur le complexe absorbant des sols étudiés	80
Tableau XVIII : Ratio d'équilibre entre les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^{+} ($cmol.kg^{-1}$) des sols étudiés	80
Tableau XIX : Matrice de corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simples ou plein soleil.....	83
Tableau XX : Matrice de la corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simple ou plein soleil étudiés	84
Tableau XXI : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simples ou de plein soleil	85
Tableau XXII : Matrice de la corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés.....	87

Tableau XXIII : Matrice de la corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés	88
Tableau XXIV : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés	89
Tableau XXV : Matrice de la corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés	91
Tableau XXVI : Matrice de corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés	92
Tableau XXVII : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés.....	93
Tableau XXVIII : Rendements des parcelles cacaoyères sous les différents agrosystèmes étudiés	94

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aperçu d'une agroforêt complexe dans la zone de transition forêt-savane à Niamkey-Konankro	8
Figure 2: Régions de production cacaoyère dans le monde.....	11
Figure 3 : Principaux pays producteurs de cacao dans le monde durant les campagnes 2015 - 2016 et 2016 -2017.....	12
Figure 4 : Schéma descriptif d'un cacaoyer.....	13
Figure 5 : Représentation schématique d'une fleur de cacaoyer.....	14
Figure 6 : Coupe transversale et longitudinale du fruit du cacaoyer.....	15
Figure 7 : Variétés morpho-géographique de cacaoyers les plus cultivées. Criollo (A) ; Forastero (B) ; Trinitario (C).....	16
Figure 8 : Etapes conduisant à la proposition d'indicateurs de qualité des sols appliqués à l'aménagement et à la gestion du terroir.....	26
Figure 9 : Fonctions et services écosystémiques fournis par le compartiment sol.....	28
Figure 10 : Localisation de la sous-préfecture de Kokumbo dans le département de Toumodi au Centre de la Côte d'Ivoire.....	35
Figure 11 : Diagramme ombrothermique du département de Toumodi de 1982 à 2012.....	36
Figure 12 : Carte géologique de la sous-préfecture de Kokumbo.....	38
Figure 13 : Aperçu des différents types de sols de la Côte d'Ivoire.....	40
Figure 14 : Différents types d'agrosystème de la zone d'étude (A : Agrosystème de plein soleil ; B : Agrosystème complexe ; C : Agrosystème mixte).....	46
Figure 15 : Matériel de terrain.....	47
Figure 16 : Schéma de la fosse pédologique.....	54
Figure 17 : Plan d'échantillonnage (zig-zag) des sols à la tarière.....	54
Figure 18 : Préparation d'un échantillon composite.....	54
Figure 19 : Schéma de la méthode du centre du carré.....	57
Figure 20 : Dispositif de collecte des données de rendement.....	59
Figure 21 : Perception des producteurs sur la question de l'incidence des espèces associées sur la production des cacaoyers.....	68
Figure 22 : Perception des producteurs sur la question de l'incidence des espèces associées sur le sol.....	69
Figure 23 : Profils du sol du haut-versant au bas-versant d'un interfluve de la zone d'étude	71

Figure 24 : Corrélation globale entre le rendement et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés.....	95
Figure 25 : Corrélation (0 – 20 cm) entre la productivité et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés.....	97
Figure 26 : Corrélation (20 -40 cm) entre la productivité et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés.....	99

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Fiches de collectes des données de production à Kokumbo
- Annexe 2 : Fiche d'enquête utilisée pour la collecte des données
- Annexe 3 : Séance de prélèvement des échantillons de sol
- Annexe 4 : Fosses pédologiques sous les différents agrosystèmes
- Annexe 5 : Séance de description des profils de sol

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne est généralement caractérisée par une faible productivité des plantes cultivées. Cette faible production des cultures est due à la pauvreté naturelle des sols en éléments nutritifs mais aussi, à la faible utilisation des intrants et à la trop grande présence des variétés traditionnelles peu performantes, sensibles aux maladies et aux conditions climatiques défavorables (Godo, 1987 ; Bado, 2002 ; N'zué *et al.*, 2004). Ceci a pour conséquence une extension des superficies pour augmenter la production (Bado, 2002). Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) dont les exigences culturales correspondent aux conditions édaphiques et climatiques de la zone intertropicale n'échappe pas à cette réalité bien que cette culture peut s'adapter à une grande diversité de milieux biophysiques, de types de sols et de climats (Freud *et al.*, 2000 ; Deheuvels, 2011 ; Jagoret, 2011). Ainsi, l'on le retrouve dans différents systèmes de culture, notamment les systèmes de plein soleil, sous ombrage ou encore en système intermédiaire.

Considéré comme une plante d'ombrage, le cacaoyer a une productivité plus importante lorsqu'il est totalement exposé à la lumière (Braudeau, 1969). Depuis longtemps, le modèle technique proposé aux agriculteurs par le monde de la recherche-développement est la conduite de cacaoyères en culture pure ou sous ombrage léger avec applications d'intrants chimiques (Wood & Lass, 1985). Malheureusement, la fertilité des sols sous les vieux cacaoyers est en constante régression à cause de l'exportation des éléments minéraux à travers les fruits du cacaoyer (cabosses et fèves) sans aucune compensation (Mossu, 1990 ; Nanga, 2012 ; Wessel & Quist-Wessel, 2015 ; Kassin *et al.*, 2016). Il est connu que la forêt constitue et demeure le précédent cultural idéal pour garantir une bonne productivité du cacaoyer. Ainsi, la recherche de rendement optimal, a conduit les anciens comme les nouveaux producteurs vers de nouveaux fronts de défrichement forestier faisant de la culture du cacao une des principales causes de la dégradation du couvert forestier tropical (Clough *et al.*, 2011). Nonobstant son impact négatif sur le couvert forestier, la cacaoculture tient une place importante dans l'économie mondiale et contribue à l'amélioration du bien-être des populations rurales (ICCO, 2008).

Dans ces conditions, l'augmentation de la productivité du cacaoyer avec la préservation du massif forestier semble constituer une des perspectives pour faire face au problème de la dégradation de l'environnement. La communauté scientifique réfléchit alors sur des pratiques agricoles durables, économes en intrants et permettant d'accroître significativement le rendement du cacaoyer. Sur cette voie, le système agroforestier en cacaoculture est de plus en plus considéré comme une pratique prometteuse avec ses

bienfaits et avantages au profit des populations (Sonwa *et al.*, 2001 ; Somarriba & Beer, 2011 ; Deheuvels *et al.*, 2012 ; Vaast & Somarriba, 2014)

En Côte d'Ivoire, depuis l'indépendance, la production cacaoyère a toujours joué un rôle moteur dans la prospérité économique et sociale en contribuant à plus de 15 p.c. du Produit Intérieur Brut (PIB) depuis les années 2010, occupant ainsi plus des 2/3 des actifs agricoles (PND, 2012). La production de cacao marchand a été estimée à environ 1,9 millions de tonnes en 2017 (ICCO, 2017). Il se cultive sur plus de 2 millions d'hectares avec un rendement moyen national faible oscillant entre 260 et 600 kg. ha⁻¹.an⁻¹ (Assiri *et al.*, 2012). Cette situation est la conséquence de l'avènement de la politique de développement agricole en Côte d'Ivoire qui a réduit considérablement le couvert forestier ivoirien de 16 millions d'hectares à l'indépendance à moins de 2 millions d'hectares de nos jours (MINEF, 2017). La création des plantations de cacaoyers en Côte d'Ivoire est caractérisée par la théorie de "rente-forêt " décrite par Léna (1979) et Ruf (1988) qui privilégie le modèle extensif sur fronts pionniers (sans ombrage) ou "culture plein soleil" (Piba, 2008 ; Assiri *et al.*, 2009 ; Cissé, 2013 ; Sanial, 2014). Elle est le résultat de la vulgarisation de variétés améliorées à haut rendement communément appelé "Ghana" par les structures d'encadrement des paysans à la fin des années 1970. Cette approche culturelle oblige les paysans à être en perpétuel déplacement vers les fronts de défrichement dans l'unique but d'augmenter leur production ou renouveler les anciens vergers. D'où la réorientation des migrants étrangers (ressortissants de la CEDEAO) et locaux vers les nouvelles zones forestières (Aloko-N'guessan *et al.*, 2014). Cela a conduit trois décennies durant au déplacement de la "boucle du cacao" de l'Est vers le Sud-Ouest et l'Ouest ivoirien. Selon N'Goran (1998) et Oswald (2005), cette dynamique d'extension de la cacaoculture a suscité un changement des pratiques culturelles qui a conduit au passage des systèmes agroforestiers pluristratifiés (complexes) à des cultures sous ombrage modéré ou de plein soleil.

Paradoxalement, la zone de contact forêt-savane, du Centre de la Côte d'Ivoire, jadis considérée défavorable à la culture du cacaoyer du fait de l'instabilité des sols transitoires entre les sols ferrugineux tropicaux du nord (lixisols) et les ferralsols du sud (YAO-Kouamé, 2007), de la régularité des feux de brousse et de la rareté des espaces forestiers (Kpangui, 2015 ; Blanc-Pamard, 1978) et de l'inégale répartition de la pluviométrie (Jagoret *et al.*, 2008), a longtemps été une zone de production moyenne de cacao, notamment, la région du Bélier. L'existence donc, dans cette zone, de cacaoyères agroforestières traditionnelles (plus de 80 ans) et toujours actives amène à penser qu'un

modèle de cacaoculture, différent du modèle technique recommandé par la recherche agronomique, existe. Mis au point par les agriculteurs selon des logiques différentes de celles des scientifiques, ce modèle a été cependant peu étudié en raison de la faiblesse de ses rendements en cacao marchand.

Les travaux réalisés par Adou *et al.*, (2016) et Kpangui *et al.* (2015) ont montré que différents systèmes agroforestiers à base de cacaoyers persistent dans le département de Toumodi et plus particulièrement, dans la sous-préfecture de Kokumbo. Ce modèle de cacaoculture repose principalement sur les systèmes traditionnels et complexes d'agroforêts que les agriculteurs ivoiriens de cette zone, ont maintenu au cours du temps (Adou *et al.*, 2016 ; Kpangui, 2015). Le contraste de production du cacao dans cette zone de contact forêt-savane et les zones naturellement aptes à la cacaoculture (Sud-Ouest et Ouest) suscite des interrogations sur les facteurs responsables de la pérennisation de ces systèmes agroforestiers à base de cacaoyers pour accroître la durabilité des pratiques de cacaoculture. De nombreuses recherches ont fait l'inventaire floristique des espèces locales ou exotiques en association avec les cacaoyers améliorant leur productivité (Adou *et al.*, 2016; Kpangui, 2015; Vaast & Somarriba 2014; Deheuvels *et al.*, 2012 ; Somarriba & Beer, 2011; Sonwa *et al.* 2001.). Cependant, très peu de travaux publiés, traitent de l'impact des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers et/ou des agroforêts "traditionnels" sur les propriétés du sol et sur le rendement en cacao marchand.

Dans ce cadre, cette étude vise à évaluer l'influence de différents agrosystèmes à base de cacaoyers sur la fertilité des sols et la productivité à long terme des cacaoyers. De façon spécifique, il s'agit de :

- déterminer les paramètres physico-chimiques des sols sous les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers ;
- préciser le potentiel entre les différents systèmes agroforestiers et le rendement en cacao marchand ;
- expliquer la contribution des systèmes agroforestiers au rendement.

Cette évaluation des propriétés physico-chimiques des sols des systèmes agroforestiers (SAF) à base de cacaoyers et leur impact sur le rendement en cacao marchand est basée sur les hypothèses suivantes :

- les agrosystèmes permettent une meilleure conservation des propriétés physico-chimiques du sol comparativement à la plantation de plein soleil ;
- les agrosystèmes influencent la pérennité et la durabilité des plantations cacaoyères ;

- le rendement en cacao marchand des SAF serait lié à la structure desdits agrosystèmes.

La présente thèse, qui rend compte du travail réalisé, comporte trois grandes parties :

- la première partie est consacrée aux généralités de l'étude et est subdivisée en trois grands chapitres. Le premier chapitre fait l'état des connaissances sur les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. Quant au deuxième chapitre, il définit les notions de fertilité et de qualité des sols et le troisième; situe le cadre d'étude

- la deuxième partie présente dans cet ordre, le matériel et les méthodes de l'étude dans le quatrième et le cinquième chapitre du document ;

- la troisième partie traite des résultats obtenus dans le sixième chapitre et la discussion des résultats dans le chapitre 7 du document. Une conclusion générale, assortie de recommandations et perspectives, ainsi qu'une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

CHAPITRE I : Systèmes agroforestiers à base de
cacaoyers

CHAPITRE II : Notion, fonctions et qualité du sol

CHAPITRE III : Cadre de l'étude

CHAPITRE I : SYSTEMES AGROFORESTIERS A BASE DE CACAOYERS

L'agroforestérie est un mode de mise en valeur des parcelles distinct des parcelles agricoles et forestières habituelles. Elle tire partie de la complémentarité des arbres et des cultures pour mieux valoriser les ressources du milieu. Ce chapitre donne des indications sur son origine et son importance pour une agriculture moderne dans un contexte de changement climatique. Il évoque également les généralités sur le cacao, donne des indications sur son origine, sa systématique et ses exigences écologiques et précise son importance dans le monde en général et pour la Côte d'Ivoire en particulier.

I.1. Systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

I.1.1 Origine

L'agroforestérie n'est pas une nouvelle mode ni une façon révolutionnaire de pratiquer l'agriculture (Torquebiau *et al.*, 2002). C'est plutôt l'une des plus anciennes méthodes de production agricole. Mais elle fut reléguée aux second plan pendant un certain temps à cause de l'intensification de l'agriculture moderne (Nair, 2007). L'agroforestérie est pratiquée depuis des siècles en Afrique, en Amérique Latine, en Chine, en Inde et en Europe (Nair, 1993 ; Torquebiau, 2007 ; Dupraz & Liagr , 2008). L'agroforestérie est une pratique omniprésente dans les pays tropicaux, qui y est ancrée depuis le début de l'agriculture.

I.1.2 Définition de l'Agroforestérie

L'agroforestérie se définit comme un système dynamique de gestion des ressources naturelles reposant sur des fondements écologiques qui intègrent des arbres dans les exploitations agricoles et le paysage rural. Elle permet ainsi de diversifier et maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre (AFAF, 2014). Cette définition assez complète présente les avantages de cette pratique en s'appuyant sur l'aspect de gestion des ressources mais aussi des bénéfices socioéconomiques et environnementaux. L'agroforestérie est aussi définie comme étant une mise en valeur du sol par l'association

simultanée ou séquentielle des arbres ligneux et de cultures saisonnières ou d'animaux, afin d'obtenir des produits ou des services utiles à l'homme (Torquebiau, 2007). Cette seconde définition souligne l'enjeu agricole et précise cette idée de "fondements écologiques" en insistant sur la notion de services.

En un mot, l'agroforesterie est une pratique agricole qui prend en compte les ambitions de l'humanité de protéger l'environnement et la qualité du sol tout en lui fournissant les services utiles.

Spécifiquement dans la cacaoculture, la classification des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers est basée sur la diversité floristique et la structure de la végétation. Ainsi, la classification part des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers simples (canopée ouverte et forte proportion d'espèces exotiques : bananier (*Musa paradisiaca*) et avocatier (*Persea americana*)), ensuite, les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers mixtes (canopée moyennement ouverte et faible densité d'espèces locales) et, enfin, les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers complexes (canopée fermée et forte densité d'espèces locales Kpangui (2015) (Figure 1).



Figure 1 : Aperçu d'une agroforêt complexe dans la zone de transition forêt-savane à Niamkey-Konankro (Adou *et al.*, 2016)

I.1.3. Système agroforestier, enjeux pour une agriculture durable

L'agroforesterie devient un enjeu rural et environnemental et suscite un intérêt scientifique à partir de 1970 (Torquebiau, 2007). A la fin des années 1970, l'explosion démographique, dont la zone intertropicale est le siège, entraîne la croissance

correspondante des besoins alimentaires (Chweya & Ezaguirre, 1999). Outre la démographie galopante, l'intensification des cultures industrielles d'exportation tel le cacaoyer et le caféier principalement en Côte d'Ivoire sur les meilleurs sols des zones forestières, entraînent une diminution plus rapide des surfaces consacrées aux cultures vivrières. Les conséquences immédiates de l'intensification des cultures industrielles d'exportation furent la réduction des surfaces de forêts naturelles et le déséquilibre du système traditionnel par le raccourcissement des durées de mise en jachère (Blanc-Pamard, 1978 ; Leakey, 2001). Affou & Tano (1988) expliquent également que l'avènement du binôme « café et cacao » a accentué la pression foncière et confirment le raccourcissement des durées de mise en jachère. En effet, selon eux, l'accès à la terre avant l'avènement de ces deux spéculations obéissait aux règles coutumières et donnait à tout autochtone un droit de jouissance sur le domaine foncier villageois, sans aucune contrepartie ni possibilité d'aliénation de la terre. L'introduction du café et du cacao, a contribué à l'instauration et à la consolidation de la propriété individuelle. La course à la forêt qu'elle a engendrée, a permis non seulement un accroissement des superficies cultivées mais surtout un gaspillage de la forêt. Or, il apparaît clairement que la forêt, comme précédent cultural apporte des avantages à l'agriculture (Ruf, 1995). Ceux-ci expliquent le système universel de "culture itinérante" souvent accusé de causer la déforestation. Alors que son principe originel dépend au contraire de la régénération. Loin d'être un seul avantage de fertilité du sol, la forêt empêche la prolifération des adventices et des insectes. Elle constitue un facteur d'humidité et limite l'effet du vent et de l'érosion. Ces privilèges sont systématiquement perdus dès lors qu'on se trouve dans une région totalement déforestée. La mise en culture d'une plantation de cacaoyer, par exemple, ne peut donc se faire que sur une parcelle nouvellement déforestée. Dans un tel processus, les paysans sont donc obligés, pour augmenter leur production ou renouveler les anciens vergers, d'être en perpétuel déplacement vers les fronts de défrichement. D'où la réorientation des migrants étrangers et locaux vers les nouvelles zones forestières (Aloko-N'guessan *et al.*, 2014). Les impacts néfastes de ces pratiques agricoles ont amplifié maints problèmes environnementaux que sont la déforestation, l'érosion, la désertification, la perte de biodiversité et la contamination de l'eau potable (Altieri & Pengue, 2006).

Afin de ralentir ou stopper cette dégradation des sols, la déforestation, la destruction de l'environnement et la disparition de la biodiversité, des recherches dans le secteur agricole de façon générale mettent l'accent sur des approches qui allient une production agricole durable à des mesures de conservation de l'environnement (Schroth

et al., 2011). L'agroforestérie, de nos jours, constitue un compromis agroenvironnemental souhaitable en tenant compte de ses services qu'elle peut fournir à l'humanité (Tableau I).

Tableau I : Différents types de services rendus par les systèmes agroforestiers

Type d'intérêts	Avantage des agro-forêts
Ecosyst�mique	<p>Les services d'auto-entretien : ils rassemblent les services liés à la régénération comme par exemple le cycle du carbone. Son bon fonctionnement assure les trois autres catégories.</p> <p>Les services de prélèvement fournissent les produits issus des écosystèmes : production de nourriture, eau douce, fibre etc.</p> <p>Les services de régulation permettent la régulation du climat et des maladies. Enfin les services culturels donnent naissance à des héritages culturels et éducatifs</p>
Production	<p>Plusieurs cultures sur une même parcelle, production alimentaire,</p> <p>Production de bois d'œuvre ou de construction, production de plantes à usage médicinal</p>
Economique	<p>Diversification alimentaire,</p> <p>Diversification des revenus des producteurs</p>
Régulation des bio-agresseurs	<p>La présence d'une multitude d'espèces, engendre une régulation écologique, car, le système est équilibré. Effet barrière et protège ainsi la culture principale</p>
Régulation du climat	<p>Création de leurs propres microclimats</p> <p>"l'effet tampon" dans les situations extrêmes (grands vents)</p> <p>Ce service est étroitement lié aux deux autres présentés précédemment car il permet de créer des conditions favorables à la culture</p>

I.2. Généralités sur le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.)

I.2.1. Origine et répartition géographique

▪ Origine

Le cacaoyer (*Theobroma cacao*, L.) appartient à la famille des Malvaceae dont il est l'une des espèces cultivées à des fins commerciales et en particulier pour la vente de ses fèves servant à la fabrication du chocolat et à l'extraction d'une graisse végétale dont le beurre de cacao (Deheuvels, 2011). Les 22 espèces du genre *Theobroma* trouvent toutes leur origine botanique dans les forêts humides d'Amérique tropicale où certaines sont utilisées localement dans l'alimentation humaine. Le cacaoyer a encore aujourd'hui, pour les

populations indiennes, une origine divine. Les Aztèques accompagnaient les étapes de sa culture par des cérémonies religieuses (Touzard, 1993).

▪ Répartition géographique

Le cacaoyer se rencontre à l'état naturel dans les étages inférieurs des forêts humides d'Amérique tropicale, entre 20° de Latitude Nord et 20° de Latitude Sud à une altitude généralement inférieure à 1250 m. Avec les Aztèques (13ème – 16ème siècle), les plantations s'étendaient dans les Îles Caraïbes, au Venezuela, en Equateur et en Colombie.

La province de Bahia au Brésil a créé de grandes plantations cacaoyères au 19ème siècle. C'est à partir de la région de Bahia que le cacao a pris la direction de l'Afrique de l'Ouest où d'importantes plantations ont été créées au 19ème et au 20ème siècles, notamment, au Cameroun, au Nigeria, au Togo, au Ghana et en Côte d'Ivoire (Oro, 2011) puis en Asie (Malaisie et Indonésie) ICCO (2012) (Figure 2).

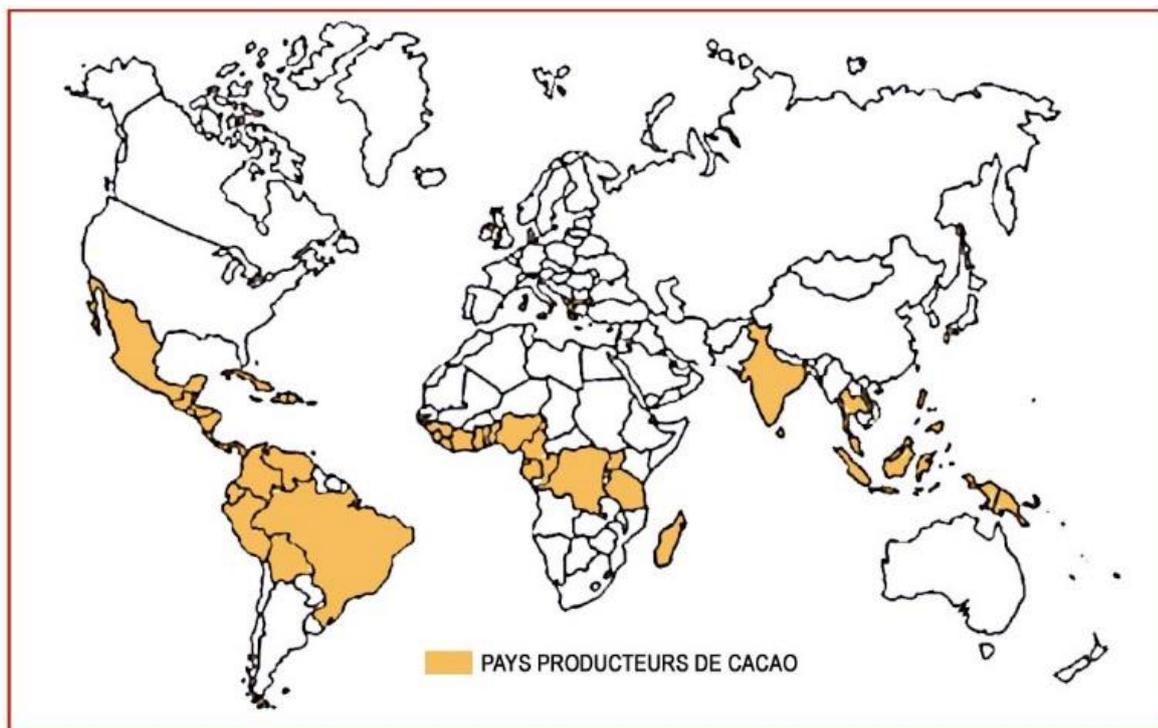


Figure 2: Régions de production cacaoyère dans le monde (ICCO, 2012)

Le cacaoyer se retrouve aujourd'hui sur quatre des cinq continents avec une part importante de la production en Afrique durant la campagne 2015-2016 avec un volume de plus de 3,2 millions de tonnes de cacao marchand (ICCO, 2017) (Figure 3).

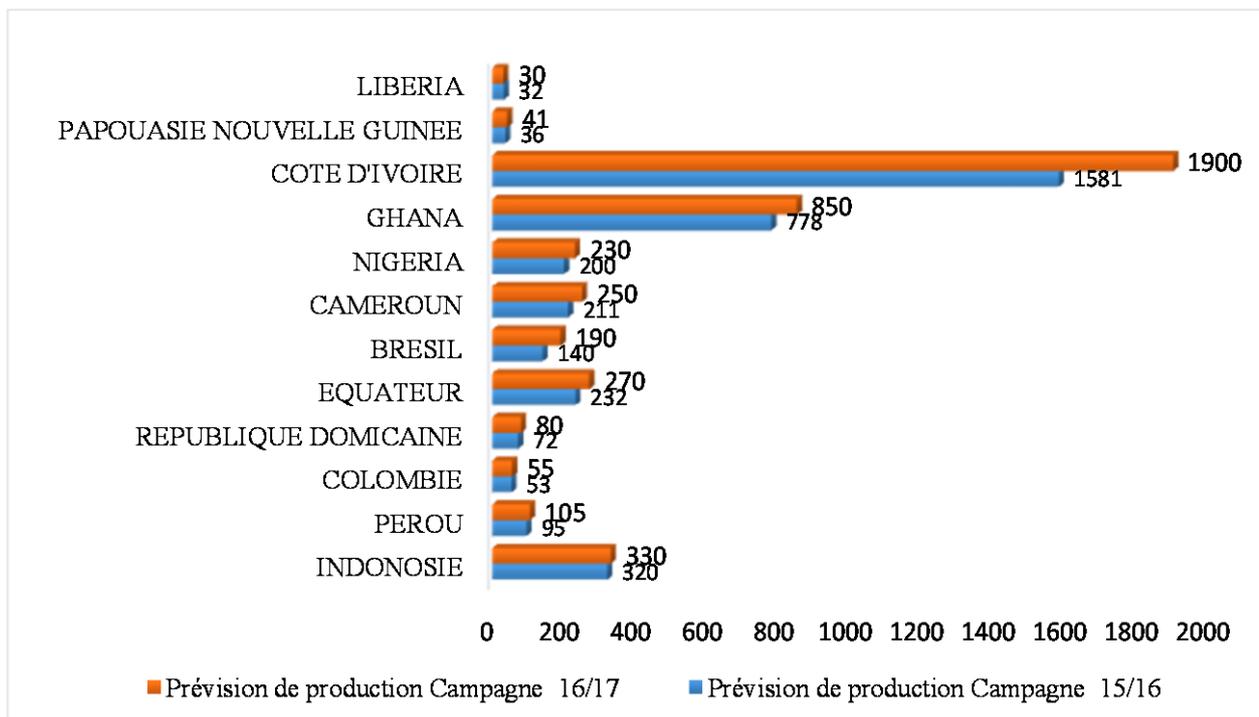


Figure 3 : Principaux pays producteurs de cacao dans le monde durant les campagnes 2015 -2016 et 2016 -2017 (ICCO, 2017)

I.2.2 Biologie et diversité génétique du cacaoyer

I.2.2.1. Biologie de la plante

Le cacaoyer est un arbuste de sous-bois qui occupe, dans son habitat naturel, les étages inférieurs des forêts humides de la ceinture tropicale, entre le 18° de latitude Nord et le 15° de latitude Sud, à des altitudes allant du niveau de la mer jusqu'à 1250 m (Braudeau, 1969 ; Mossu, 1990 et 1992). Le cacaoyer comprend trois parties qui sont les racines, le tronc et les feuilles (Figure 4). Il porte selon l'âge et la période phénologique, les fleurs et les fruits.

▪ Racines

Le cacaoyer développe un système racinaire pivotant orthotrope allant jusqu'à 2 m de profondeur et un chevelu de racines traçantes et de radicelles superficielles plagiotropes (environ 85 p.c. des racines) situées dans La couche 0-20 cm et s'étendant sur un rayon de 5 à 6 mètres autour du pied de l'arbre mature (Braudeau, 1969 ; Mossu, 1990 ; Deheuvels, 2011).

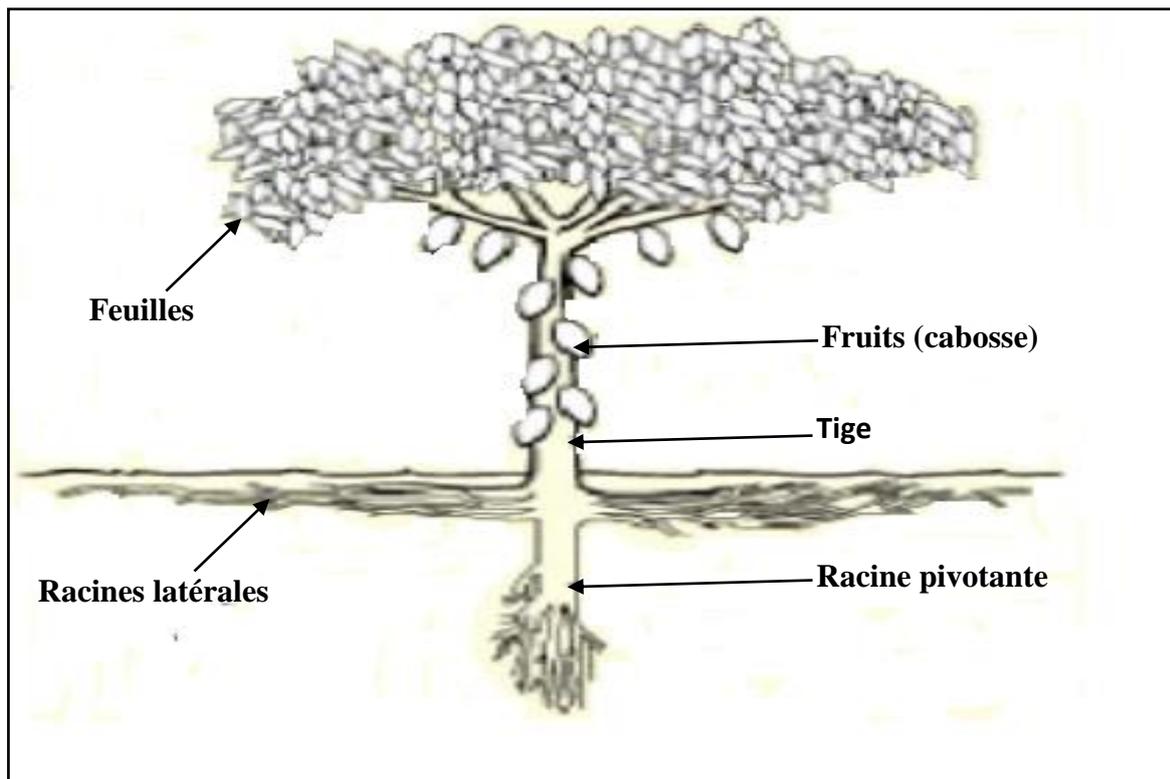


Figure 4 : Schéma descriptif d'un cacaoyer (Ayi, 2017)

▪ Tronc

La croissance en hauteur de la tige se fait par poussées successives jusqu'à l'âge de 18 mois. A environ 1,5 m de hauteur, il y a la formation d'un verticille de 5 rameaux plagiotropes qui constitueront la couronne du cacaoyer. Les bourgeons axillaires du tronc, souvent à la base de la première couronne forment alors un ou plusieurs axes orthotropes, aussi appelés gourmands, qui se comportent comme la première tige. Lorsque la seconde couronne est bien formée, la première disparaît progressivement et ainsi de suite. Les gourmands se forment également depuis la base du tronc jusque sur les rameaux plagiotropes de la couronne. La croissance de ces rameaux est discontinue et se fait selon 4 ou 5 poussées foliaires (flushes) annuelles, séparées par des périodes de dormance des bourgeons terminaux (Wood & Lass, 1985 ; Deheuvels, 2011).

▪ Feuilles

La feuille comprend deux parties, le pétiole et le limbe qui comprend une nervure principale et plusieurs nervures secondaires. La période d'activité photosynthétique

optimale de la feuille, qui va jusqu'à 5 mois après le flush, décroît ensuite jusqu'à sa chute à un an d'âge (Alvim, 1968). De ce fait, le cacaoyer porte toujours des feuilles d'âge différent, issues des 4 ou 5 flushes annuels.

▪ Fleurs

Les fleurs hermaphrodites sont groupées en inflorescences issues de la croissance des bourgeons axillaires après la chute des feuilles et de leur différenciation définitive sous forme de boursouflures de l'écorce baptisées coussinets floraux (Figure 5). A chaque période d'induction florale, la production de fleurs est simultanée sur tous les coussinets floraux d'un même arbre. La floraison peut survenir toute l'année (Braudeau, 1969 ; Deheuvels, 2011). Elle est synchrone pour les cacaoyers d'une même région et a lieu par périodes successives d'amplitude variable selon les pieds. Les cacaoyers d'une même région et de la même variété ont des pics de floraison au cours de l'année. L'apparition de ces pics est favorisée par des températures moyennement élevées et des pluies abondantes. Les entre-pics correspondent à la disparition partielle des fleurs (variétés Amelonado) ou totale (variétés Forastero) selon les travaux de Braudeau (1969).

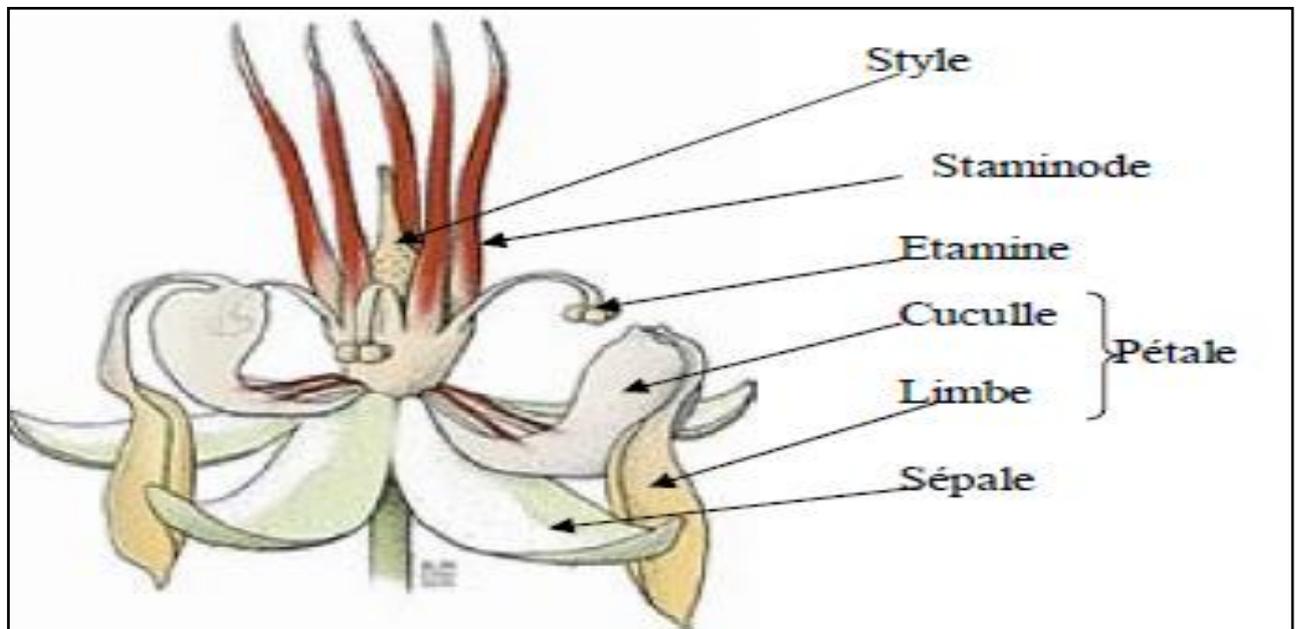


Figure 5 : Représentation schématique d'une fleur de cacaoyer (Ayi, 2017)

▪ Fruit du cacaoyer

Le fruit du cacaoyer est appelé "chérelle " pendant les 5 à 6 premiers mois de sa croissance, puis "cabosse" lorsqu'il atteint la maturité. A maturité, la cabosse contient des

graines, couramment appelées fèves. Ces graines ou fèves sont entourées d'une pulpe mucilagineuse et imbriquées dans une seule cavité qui renferme en moyenne 30 à 40 fèves selon 5 rangées longitudinales (Figure 6) (Braudeau, 1969, Mosu, 1990 ; Deheuvels, 2011). Le taux de remplissage des cabosses est en réalité variable et dépend du taux de fécondation de l'ovule et des caractéristiques variétales de la plante. Très souvent, certains fruits dessèchent sur les cacaoyers avant l'âge de la maturité. Ce phénomène résulte des mécanismes de régulation physiologique dus soit à un seuil de flétrissement différentiel, à une incompatibilité ou une limitation de la fructification par effet de compétition entre les fruits.

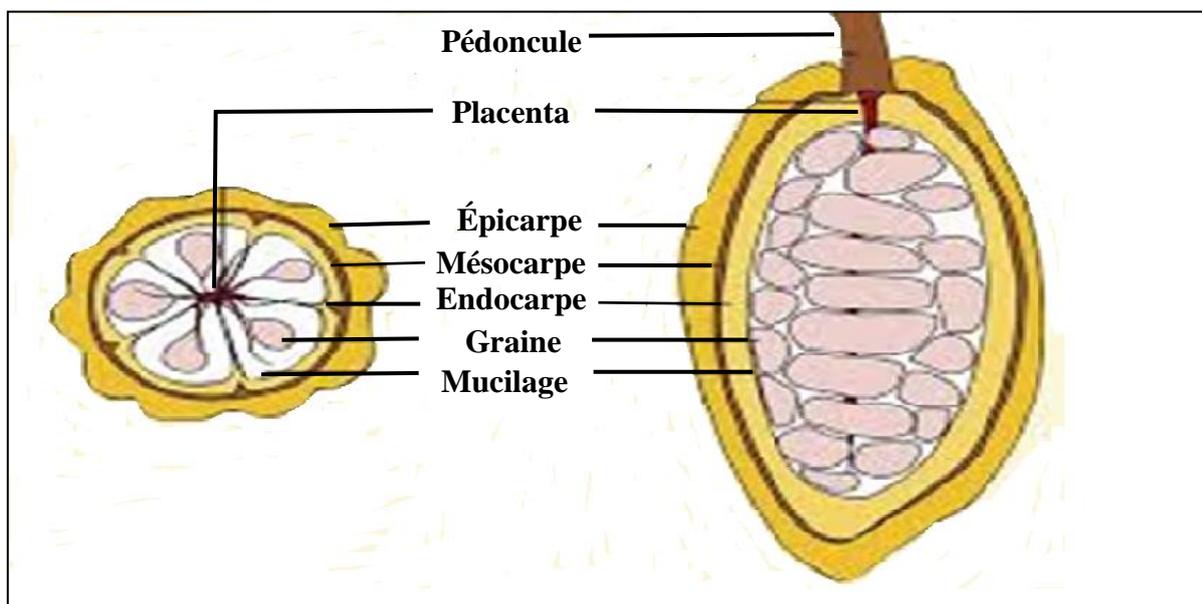


Figure 6 : Coupe transversale et longitudinale du fruit du cacaoyer (Mosu, 1990)

I.2.2.2. Diversité génétique du cacaoyer

La classification de la diversité génétique de l'espèce *Theobroma Cacao* a été proposée par Morris (1882) en référence à trois groupes morpho-géographiques de cacaoyers traditionnellement cultivés dans le monde : *Criollo*, *Forastero* et *Trinitario* (Figure 7). Bien que les groupes *Criollo*, *Forastero* et *Trinitario* aient servi de base à la première classification du cacaoyer, ces groupes ne reflètent plus actuellement la vraie dimension, structuration et diversité génétique de cette espèce. Cependant, cette représentation globale de la diversité génétique chez *Theobroma cacao* a été maintenue et est encore largement utilisée malgré son imprécision et tous les échanges génétiques qui se sont produits et qui rendent difficile cette classification trop rigoureuse (Motamayor, 2001). La grande diversité de l'espèce *Theobroma cacao* justifie une nouvelle analyse de la classification de sa diversité génétique.



Figure 7 : Variétés morpho-géographique de cacaoyers les plus cultivées. Criollo (A) ; Forastero (B) ; Trinitario (C) (source :Ayi, 2017 modifié)

I.3. Exigences écologiques

▪ Sol

Les cacaoyers sont cultivés sur de nombreux types de sols dans la zone intertropicale. Le sol doit être d'autant plus profond que la pluviométrie est faible et mal répartie (Kebe *et al*, 2009). Les cacaoyers préfèrent les sols riches en éléments minéraux, profonds, non gravillonnaires et non sableux dont la nappe phréatique est à plus d'un mètre de profondeur. Les sols sous cacaoyers ont des exigences très prononcées. Ils doivent être profonds d'au moins 1,5 m, bien drainés et de préférence argilo-sableux (Kebe *et al*, 2009 ; Koko, 2014). La culture du cacaoyer n'est possible qu'en combinant le facteur sol aux autres facteurs du milieu. Il sera alors possible de déterminer si un sol convient dans des conditions particulières (Braudeau, 1969 ; Wood & Lass, 1985). En condition idéale de pluviométrie et sur terrain plat, les caractéristiques d'un bon sol pour la culture du cacaoyer sont résumées dans le tableau II ci-dessous.

Tableau II : Caractéristiques d'un bon sol pour le cacaoyer

Variables ou équilibres chimiques	Caractéristiques optimales d'un sol	Valeurs optimales
Ph	pHeau	5 à 7
Matière organique (0-20 cm)	MO (p.c.)	> 3,5 p.c.
	C/N	9 à 12
Phosphore	P total (mg. kg ⁻¹)	=560
	P assimilable (mg. kg ⁻¹)	=100
Complexe adsorbant	CEC (cmol. kg ⁻¹)	= 12
	V (p.c.)	= 60
Equilibres chimiques	N total / P total	1,5 à 2
	(S+6,15) /N total	8,9
	K ⁺ - Ca ²⁺ -Mg ²⁺ (p.c. de S)	8 – 68 – 24
	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	1 à 4
	Mg ²⁺ /K ⁺	3,5 à 4
	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺) /K ⁺	25

MO : matière organique ; **C / N** : rapport carbone organique sur azote total ; **CEC** ou **T** : capacité d'échange cationique du complexe adsorbant ; **V** : taux de saturation des bases échangeables du complexe adsorbant ; **S** : somme des bases échangeables (Source : Koko, 2008)

▪ **Température**

Le cacaoyer est une plante dont l'optimum de température se situe à une moyenne de 25°C et qui peut résister dans des milieux où la température moyenne quotidienne minimale est de 15°C (Braudeau, 1969 ; Mossu, 1992).

▪ **Pluviométrie**

Une pluviosité de 1250 à 3000 mm par an est requise pour une bonne production. Cependant, l'idéal est situé entre 1500 et 2000 mm. Elles ne doivent pas descendre en dessous de 1000 mm par an (Mossu, 1990 ; Mossu, 1992). Le cacaoyer demande une humidité relative moyenne annuelle comprise entre 70 et 100 P.c., ainsi qu'un couvert végétal le protégeant de l'insolation directe et de l'évaporation surtout pour les jeunes plants (Braudeau, 1969).

I.4. Importance de la production cacaoyère

I.4.1. Dans le monde

Le cacao est plus connu dans le monde en tant que matière première du chocolat. Le chocolat absorbe environ 90 p.c. de la production mondiale de cacao. En moyenne, près de 4 millions de tonnes de fèves de cacao sont produites chaque année. Durant la seconde moitié des années 90, les pays producteurs de cacao ont généré un revenu de plus de 3 milliards de dollars par an découlant des exportations de fèves de cacao et de produits à base de cacao (ICCO, 2012).

I.4.2. En Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, la production en 2017 a été estimée à 1 900 000 tonnes (ICCO, 2017). La culture du cacaoyer génère plus de 38 P.c. des recettes totales d'exportation du pays. Il représente 15 p.c. du PIB et 20 P.c. des recettes fiscales (CCC, 2017). L'importance que revêt cette culture aussi bien pour les secteurs liés directement ou non à elle, en fait un levier de développement économique et de réduction de la pauvreté pour la Côte d'Ivoire. La progression de la production du cacao en Côte d'Ivoire a été encouragée par la politique gouvernementale des années 70 qui favorisait le secteur agricole, et plus particulièrement, celui du cacao et du café. Du matériel de plantation adapté était distribué et des conseils pratiques sur l'itinéraire technique cultural étaient prodigués. Malgré ces remarquables performances et la place de choix occupée par le cacao dans l'économie

nationale, plus de 90 P.c. de la production est issu d'exploitations de petite taille (800 000 exploitations familiales) bien qu'il existe quelques plantations de grande taille.

I.4.3. Importance économique et agro-industrielle du cacao

I.4.3.1. Importance économique

La culture de cacaoyer peut être bénéfique pour la structure sociale d'un pays ainsi que pour son économie. Pour être rentable, le cacaoyer doit être cultivé sur des surfaces relativement vastes. Il s'agit par conséquent et presque exclusivement d'une activité rurale. De par son importance économique, le cacao fournit à la fois un revenu et un statut social aux communautés rurales. Il contribue ainsi à éviter les migrations à grande échelle vers les zones urbaines, avec son corollaire de chômage et de faible qualité de vie qu'elles entraînent.

Cependant, une trop grande dépendance vis-à-vis du cacao en tant que source de recettes à l'exportation peut parfois fragiliser à l'extrême l'économie nationale d'un pays (fluctuation des prix) et le rendre vulnérable face aux risques inhérents (variations climatiques) à la production de cacao.

I.4.3.2. Importance agro-Industrielle

Un certain nombre de pays producteurs, notamment la Côte d'Ivoire, le Nigéria et le Brésil, ont cherché à accroître les recettes qu'ils tirent de l'exportation du cacao en créant des unités de transformation de fèves de cacao brutes en produits semi-finis. Dans certains cas, ils font des produits finis à base de cacao. Cela semblerait être à première vue une évolution logique pour les producteurs de cacao étant donné que la transformation locale devrait entraîner une augmentation de la valeur des produits exportés. Toutefois, dans le cas du cacao, cela ne va pas sans difficultés. En effet, un transformateur de fèves de cacao en chocolat situé au cœur du marché européen, américain ou asiatique a de toute évidence davantage de chances de satisfaire aux exigences des clients qu'un transformateur dont l'usine est implantée par exemple, à l'intérieur de la ceinture cacaoyère africaine et notamment en Côte d'Ivoire.

I.4.4. Systèmes et mode de production du cacao

Le cacao est produit en Côte d'Ivoire selon deux principaux systèmes de culture. Il s'agit des systèmes extensif et intensif.

I.4.4.1. Système de production extensive

Il s'agit du système traditionnel de culture itinérant du cacaoyer sur défriche forestière. Ce système consiste à défricher la forêt et à effectuer un brûlis avant la mise en place des cultures vivrières (manioc, igname, bananier, maïs, taro, riz, arachide et légumes), choisies selon les habitudes alimentaires des producteurs (Boni, 1978). Les bananiers (*Musa spp*) ont essentiellement pour rôle de fournir un ombrage temporaire aux jeunes cacaoyers. Après l'installation des vivriers, les fèves de cacao sont semées, généralement à fortes densités (2 000 à 2 500 plants ha⁻¹), sans aucun alignement avec un espacement aléatoire (Boni, 1978 ; Freud *et al.*, 2000). Avant la fin des cycles vivriers, c'est-à-dire, durant les deux à trois premières années, les jeunes cacaoyers bénéficient des entretiens apportés aux cultures vivrières par les femmes. Certains arbres sont souvent conservés pour procurer de l'ombrage aux jeunes cacaoyers ou à cause de leur valeur alimentaire, médicinale ou culturelle. Toutefois, les planteurs effectuent des éliminations sélectives par abattage ou au moyen de feux allumés aux pieds des arbres (Kpangui, 2015). À l'âge adulte, la majorité des plantations est conduite en plein soleil, ou sous un ombrage léger (Freud *et al.*, 2000 ; Assiri, 2007). Le système extensif est caractérisé par une faible productivité des vergers, liée à la non utilisation d'intrants performants (matériel végétal), à l'utilisation inadéquate et insuffisante des fertilisants et pesticides et à l'insuffisance d'entretien des plantations (Bonnes Pratiques Agricoles). Les rendements moyens à l'hectare oscillent entre 260 et 600 kg de cacao marchand par an (Assiri, 2007). En outre, après quelques années d'exploitation, les vergers deviennent sénescents et peu rentables. Ils sont alors abandonnés et de nouvelles plantations sont créées suivant le même système traditionnel de culture, sur défriche et brûlis de la forêt. Ce système reste la première cause de déforestation et de dégradation du couvert forestier en Côte d'Ivoire (Piba, 2008; Assiri *et al.*, 2009 ; Cissé, 2013 ; Sanial, 2014).

I.4.4.2. Système de production intensive

Le système de cacaoculture intensif mis au point par la recherche agronomique repose sur une application de différentes technologies permettant de produire plus sur des surfaces réduites. Les technologies concernent i) préparation du terrain, ii) matériel végétal amélioré, iii) pépinière, iv) planting, v) entretien ; vi) fertilisation ; vii) lutte contre les insectes et les maladies, viii) récolte, et ix) opérations post-récolte (écabossage,

fermentation, séchage et manutention). Les rendements y sont comparables à ceux obtenus en stations de recherche, entre 1 tonne et 3,5 t/ha et plus (Nanga, 2012). Le système intensif se retrouve sur différentes formes selon les innovations technologiques majeures appliquées. Ainsi, l'agrosystème lourd ou complexe où certains arbres d'ombrage locaux sont maintenus au moment de la mise en place de la cacaoyère est plus répandu en Amérique du Sud. Le système mixte avec des cultures associées ou le producteur introduit selon sa convenance des espèces exotiques. Il y a aussi le type plein soleil où, la plantation est mise en place après abattage totale de la forêt et est accompagnée sur trois ans par un ombrage temporaire de baniers plantins. Ce type a l'inconvénient d'accélérer l'appauvrissement des sols et d'accroître l'incidence des insectes nuisibles. On rencontre également le type agroforestier léger ou ombrage léger. L'ombrage est constitué de légumineuses telles que *Glyricidia*, *Erythrina* ou *Albizia*, associées au moment de la plantation. Ce type a l'avantage d'améliorer les sols et d'accroître la productivité des arbres et leur longévité économique. En Asie, notamment en Malaisie et en Indonésie, l'intensification est plus poussée, même en plantation familiale. Les populations rurales de ces pays ont une tradition de culture intensive avec la pratique de la riziculture (Nanga, 2012).

I.4.4.3. Mode de production cacaoyère

Il existe deux modes de conduite de la cacaoyère dans les deux systèmes précités. Il s'agit du mode de culture du cacaoyer sous ombrage et sans ombrage.

- **Culture du cacaoyer sous ombrage permanent ou système agroforestier**

La culture du cacaoyer sous ombrage permanent est une très vieille pratique culturelle utilisée en Amérique latine et en Afrique. Les plantes associées aux cacaoyers produisent à la fois des biens à usages divers (fruits, bois d'œuvre, bois de chauffe, produits médicinaux, produits artisanaux, résines, etc.). Elles offrent également des services (valeurs culturelle et esthétique ; conservation de la biodiversité, des sols et de l'eau, régulation des populations de bio-agresseurs et d'adventices, capture du carbone atmosphérique). Ces biens et services sont profitables pour les producteurs et leurs familles, mais également pour la société dans son ensemble (Ruf & Schroth, 2004 ; Schroth & Harvey, 2007; Inaforesta, 2011 ; Somarriba & Beer, 2011 ;). En Côte d'Ivoire, le maintien ou le retour des espèces végétales dans les plantations cacaoyères sont principalement dus à des pratiques et savoirs longtemps accumulés par les producteurs (Tano 2012 ; Kpangui *et al.*, 2015 ; Adou *et al.*, 2016;). L'ombrage joue un rôle de

régulateur et assure une durabilité de la production, à un niveau certes moindre que les exploits obtenus en station expérimentale mais néanmoins acceptable (Braudeau, 1969). Selon Chevalier (1906), les facteurs doivent être considérés dans leur ensemble et l'ombrage est le levier par lequel l'agriculteur peut agir sur ces conditions du milieu. L'ombrage n'est donc un facteur limitant pour la production que si tous les autres facteurs sont favorables. Les producteurs de la zone d'étude (Kokumbo) pratiquent l'agroforestérie depuis l'introduction de la cacaoculture dans leur région (Adou *et al.*, 2016).

- **Culture du cacaoyer sans ombrage permanent ou en plein soleil**

La cacaoculture sans ombrage consiste à abattre la forêt et à assurer une pleine lumière aux cultures vivrières (maïs, banane plantain et divers légumes) associées aux jeunes cacaoyers. Les vivriers assurent un ombrage temporaire aux jeunes cacaoyers pendant les deux à trois premières années de plantation (Kéli *et al.*, 2005). En Côte d'Ivoire, les plantations cacaoyères sont caractérisées par les conditions du "plein soleil" ou d'ombrage léger à plus de 85 P.c. (Assiri *et al.*, 2009). Ce modèle de culture est très productif lorsque l'itinéraire technique recommandé par la recherche-développement est appliqué (entretien de la parcelle, apports d'intrants). Cependant, la longévité des cacaoyers cultivés en plein soleil est moindre que ceux cultivés sous ombrage (Ahenkorah *et al.*, 1974).

Conclusion partielle

La forte demande mondiale en fèves de cacao contraste avec la réduction des surfaces forestières de production. Cette diminution des forêts contribue énormément au réchauffement de la planète. L'agroforestérie avec ses nombreux avantages tant environnementaux qu'économiques serait donc un compromis acceptable pour réduire les émissions des gaz à effet de serre et pérenniser une production durable du cacao.

CHAPITRE II : NOTION, FONCTIONS ET QUALITE DU SOL

Ce chapitre présente le sol et son utilité sur la base de quelques définitions. Les fonctions et les services du sol seront évoqués. Un aperçu sur les notions de qualité et quelques indicateurs seront présentés. Il évoque également les activités biologiques qui y ont lieu.

II.1. Notion du sol

Le sol est défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants, organisée en couches de sols (ISO, 2015). Le sol résulte de l'altération des roches mères sous-jacentes et de l'accumulation de la matière organique résultant des activités biologiques (Baize & Jabiol, 2011). Le sol est aussi un milieu vivant qui contient une flore, une faune et une microflore particulièrement riche, interagissant entre elles et avec les autres constituants du sol. Ainsi, selon Baize et Jabiol (2011), la composition d'un sol dépend de nombreux facteurs abiotiques (climat, nature de la roche-mère, physico-chimie du sol) et biotiques (abondances et diversité des communautés floristiques, faunistiques et microbiennes). Le sol est un compartiment complexe, un carrefour dit « multifonctionnel », en relation avec la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère (Girard *et al.*, 2011 ; Gobat *et al.*, 2010). Le sol remplit de nombreuses fonctions écosystémiques. Bien qu'il en existe de nombreuses définitions, la fonction écosystémique (ou fonction écologique) est un processus lié à des flux de matières et d'énergie dans un écosystème (Wallace, 2007).

II.2. Fonctions et services du sol

Les fonctions écosystémiques peuvent être chimiques (l'oxydation), physiques (la diffusion) ou encore biologiques (la dénitrification ou la minéralisation) (Dominati *et al.*, 2010). Les termes "fonctions écosystémiques" et "processus écosystémiques" sont souvent utilisés comme synonymes. Contrairement à l'eau et à l'air, les sols ne sont pas perçus comme des milieux ambiants ayant des fonctions écosystémiques directement nécessaires à la vie humaine. Ainsi, le concept de "service écosystémique" a été élaboré dans une vision

anthropocentrée de la nature pour reconnaître la contribution des fonctions du sol au bien-être et à l'activité économique humaine (De Groot *et al.*, 2002; Walter *et al.*, 2014). Vulgarisés par le Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), les services écosystémiques représentent "les bienfaits, directs et indirects, que retire l'Homme de la nature". Les services écosystémiques sont définis comme "les avantages socio-économique retirés par l'Homme de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes. L'Homme peut éventuellement modifier ou exploiter ces fonctions en apportant du capital ou du travail (CGDD, 2015). Dans cette dernière définition, il est question de l'utilisation des fonctions écosystémiques des sols. Quatre groupes de services écosystémiques sont identifiés (tableau III)

- les services d'approvisionnement ;
- les services de régulation ;
- les services de support ;
- les services culturels.

Partant de ces catégories de services qui montrent l'importance des sols pour l'humanité, deux points importants méritent d'être soulignés. Le premier est que ces services reposent sur l'ensemble de la vie sur terre tandis que le deuxième est que les sols constituent la composante principale des écosystèmes terrestres pour la fourniture des services écosystémiques.

Une multitude de fonctions environnementales sont reconnues au sol. Ils se traduisent en services écosystémiques comme la purification de l'eau, le traitement des déchets, la régulation du climat, la provision de ressources génétiques. Considérés comme un patrimoine de l'humanité au même titre que l'eau ou l'air, les sols constituent de nos jours, une ressource sous pression. Longtemps en recul sur les scientifiques, les décideurs ont modifié la perception du sol et mis en évidence la nécessité de développer des politiques efficaces de prévention et de protection (Girard *et al.*, 2011 ; Robinson *et al.*, 2012). Ainsi, la création de structures permettant des liens efficaces entre le développement d'indicateurs en recherche et les bureaux d'études chargés d'expertises sur la qualité des sols, ont facilité la prise en compte de la diversité des usages disponibles pour les générations futures (Stauffer, 2014).

Tableau III : Types et exemples de services écosystémiques fournis par les sols

Services écosystémiques	Exemples de services écosystémiques
Services d’approvisionnement	Les services d’approvisionnement regroupent l’ensemble des productions issues des sols. Par exemple, l’approvisionnement de produits destinés à l’alimentation humaine et animale, les bois issus des forêts, les fibres destinées à la production de textiles, les matériaux bruts de support horticole ou de construction et de ressource génétique issue de la biodiversité du sol qui fournit notamment des produits biochimiques et pharmaceutiques.
Services de régulation	Les services de régulation concernent la capacité du sol à réguler aussi bien le climat que la qualité de l’air et des eaux. Par exemple, il permet de lutter contre de nombreuses pollutions, les érosions hydriques et éoliennes, la sécheresse, les inondations, l’effet de serre, les ravageurs de cultures et des pathogènes.
Services de support (ou auto-entretien)	Les services de support regroupent l’ensemble des fonctions nécessaires pour la production des autres services. Ces services peuvent être le cycle de l’eau, le cycle des nutriments, la production primaire et la formation des sols. Elle implique des transformations (à l’échelle de décennies, de siècles, de millénaires) des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.
Services culturels	Les services culturels apportés par le sol sont liés à la capacité du sol à fournir des matériaux pour la production artistique, à stocker et protéger des données historiques (archéologiques et naturelles) et être source d’inspiration religieuse et artistique

Cette prise de conscience se traduit au plan international, par l’entrée en vigueur du protocole de Kyoto qui tend à renforcer le rôle potentiel des sols en tant que réserve de carbone et limiter leurs pertes en carbone organique (FAO, 2002). Les Nations Unies ont fait des recommandations pour atteindre un niveau de dégradation zéro des sols afin d’assurer la sécurité alimentaire et combattre la pauvreté (UNCCD, 2012). Plus récemment, la huitième Assemblée Générale de l’ONU (A/RES/68/232) a créé l’année internationale des sols, pour montrer les enjeux liés au sol, sources d’alimentation, de biodiversité, d’emploi et de rentabilité.

Les résultats des recherches sur la qualité des sols entrepris depuis les années 1990 et la prise de conscience des politiques ont permis de proposer des indicateurs, et contribué à l'amélioration des outils juridiques, réglementaires et économiques de protection des sols (Figure 8).

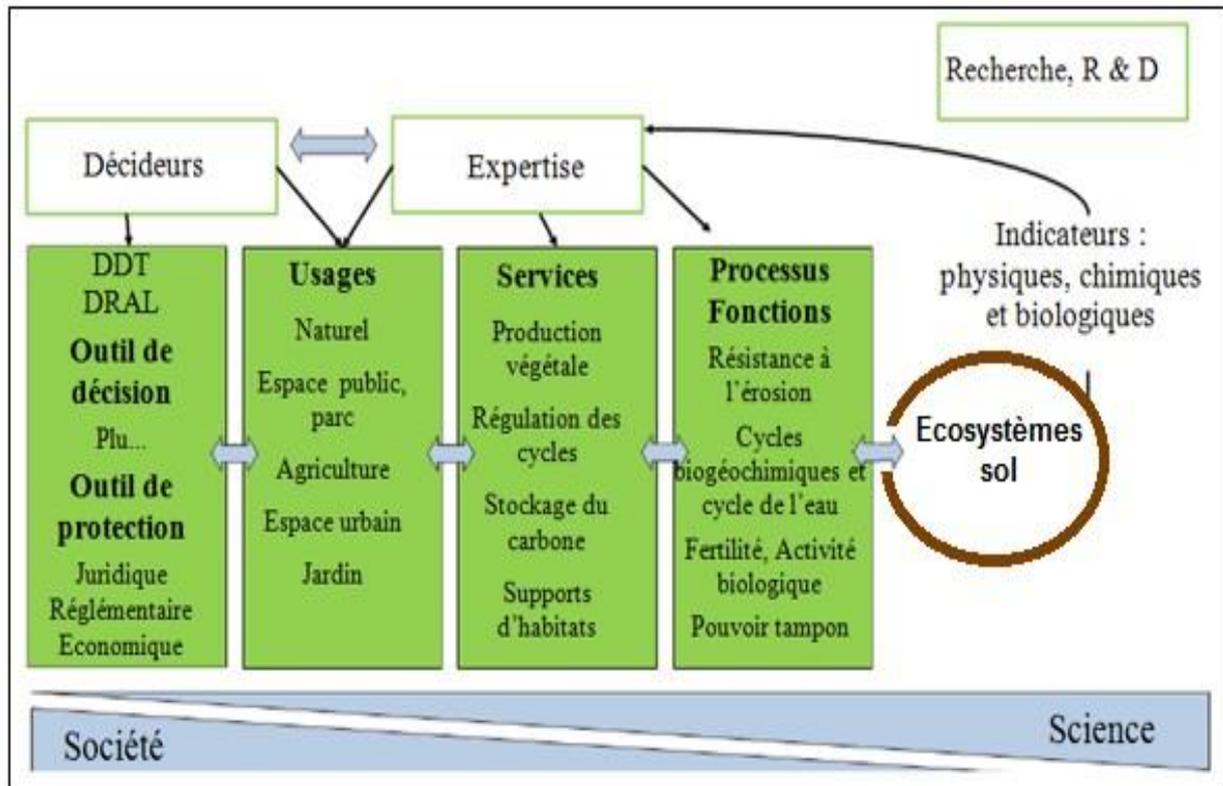


Figure 8 : Etapes conduisant à la proposition d'indicateurs de qualité des sols appliqués à l'aménagement et à la gestion du terroir (Stauffer, 2014)

II.3. Qualité et notion d'indicateurs de fertilité des sols

II.3.1. Qualité des sols

Différentes tentatives pour définir un sol ainsi que sa qualité se sont succédées et sont souvent le reflet d'une école de pensée. Elles sont adaptées à un objectif ou s'adressent à des utilisateurs différents (Gobat *et al.*, 2010). La définition d'un sol est préalable à la définition de sa qualité. La complexité de l'objet qu'est le sol rend difficile la définition d'une qualité générique.

La définition de qualité des sols doit être validée et rendue opérationnelle, pour prévenir, contrôler ou restaurer les éventuelles dégradations. Cependant, établir les liens entre les paramètres mesurés, les différentes fonctions du sol et les services rendus,

restent un défi scientifique majeur. La recherche d'indicateurs « appropriés », pour évaluer le fonctionnement du sol, dans un système quadridimensionnel (espace, temps), en est un point central (Adechina, 2017).

La qualité d'un sol a été définie par de nombreux auteurs et fait référence à une « aptitude d'un sol à fonctionner au sein et dans les limites des écosystèmes naturels ou aménagés, afin de maintenir la productivité végétale et animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé humaine et les besoins d'habitation » (Doran, 2002; Karlen *et al.*, 2003). Cette définition montre la prise en compte des interactions de la lithosphère avec les autres compartiments terrestres (biosphère, atmosphère, hydrosphère). Loin d'être de simple addition des propriétés géologiques et biologiques, les sols lient intimement l'organique et le minéral. Ce qui leur confère des propriétés émergentes (Stauffer, 2014). Cependant, la pression démographique, l'industrialisation, les besoins alimentaires des hommes et des animaux ont réduit profusément les espaces cultivables et dégradé considérablement les surfaces agricoles utiles des sols (Stauffer, 2014). La ressource en sols, limitée au niveau mondial et non renouvelable à l'échelle humaine, est de plus en plus convoitée et soumise à d'importants conflits d'usage (Franca & Borrás, 2013).

La définition de la qualité des sols, d'abord centrée sur le service de production agricole, englobe maintenant, l'ensemble des services que les sols fournissent à leur environnement ou aux sociétés humaines (Figure 9). Par conséquent il n'y a pas de critères de qualité universelle pour les sols, mais plutôt des paramètres physicochimiques, biologiques et de fonctionnement liés à un contexte pédologique et/ou aux usages donnés aux sols. Jolivet *et al.* (2006) sont même plus normatifs en soulignant que la qualité d'un sol ne peut se définir que par rapport à un usage donné ou par ses fonctions dans l'environnement. Dans tous les cas, l'appréciation de la qualité des sols exige la définition d'indicateurs pertinents et la mise au point de techniques fiables de quantification, et doit intégrer les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol (Mausbach & Tugel, 1997).

II.3.2. Notion d'indicateurs de fertilité des sols

Si des indicateurs physico-chimiques sont utilisés depuis longtemps en agronomie, le développement des recherches sur les bio-indicateurs, lui, est plus récent : il conduit à des applications, dont certaines sont aujourd'hui transférables de la recherche vers des laboratoires d'analyses, pour être proposées en prestation de service.

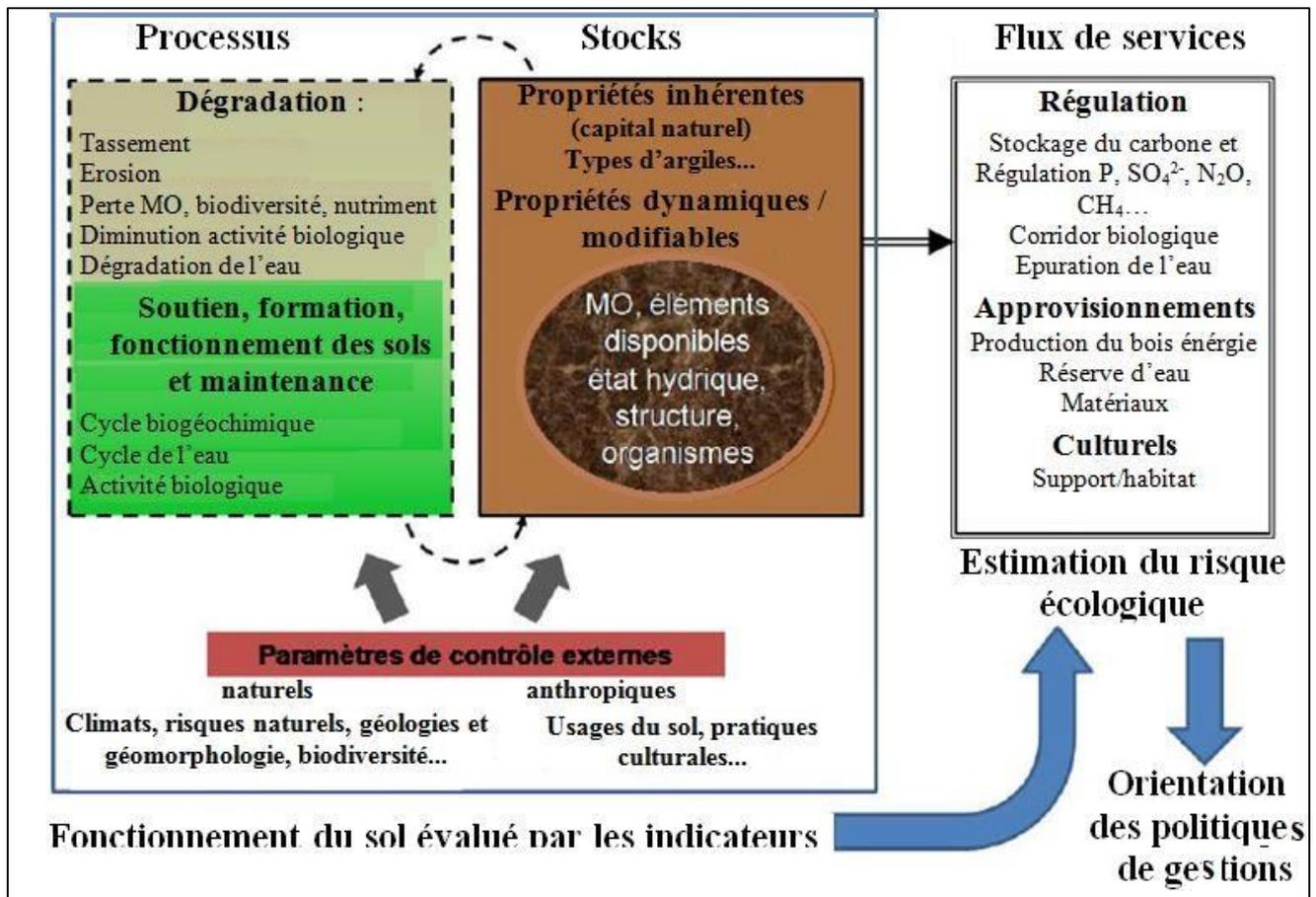


Figure 9 : Fonctions et services écosystémiques fournis par le compartiment sol (Stauffer, 2014)

Les indicateurs doivent détecter les variations des services écosystémiques (perturbations, dégâts, progrès ou tendance) et s'appuient sur l'évaluation des structures et processus d'un sol donné. Dans tous les cas, l'appréciation de la qualité des sols exige la définition d'indicateurs pertinents, la mise au point de techniques fiables de quantification, et doit intégrer les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol (Mausbach & Tugel, 1997). Ces structures et processus sont indispensables au bon fonctionnement du sol, à sa capacité de résilience (Berthelin *et al.*, 2011) et à la fourniture des services écosystémiques (Faber & VanWensem, 2012). Quelques indicateurs physiques et chimiques utilisés dans l'évaluation de la qualité des sols, sont présentés de manière non-exhaustive dans le tableau IV.

Tableau IV : Indicateurs physico-chimiques fréquemment utilisés pour évaluer la qualité des sols et impliqués dans la fourniture des services écosystémiques

Paramètres chimiques	Processus écosystémiques
Capacité de rétention en eau Stabilité et distribution des agrégats Densité apparente Porosité totale Texture* Minéralogie	Résistance à l'érosion, rétention et mobilité de l'eau et des nutriments, habitats pour la macro et microfaune, capacité potentielle de stockage du C, épuration pouvoir tampon, structure du sol, stabilité
Azote total (N _{tot}) *	Disponibilité des nutriments, productivité de l'écosystème, fertilité du sol, cycles biogéochimiques
Azote inorganique (NH ⁴⁺ , NO ³⁻)	
Phosphore assimilable*	
Capacité d'échange cationique (CEC) * pH *	Structure du sol, stabilité, résistance à l'érosion, rétention des nutriments, réserve en carbone, fertilité potentielle, pouvoir tampon
Eléments échangeables* (Mn, Al, Fe, K*, Na*, Mg, * Ca*)	
MOS (teneur) C _{org} total*	Cycles biogéochimiques, disponibilité/récalcitrance des substrats organiques, capacité de stockage du sol
MOS (stocks) MOS (qualité) groupes fonctionnels, composés (lipides, sucres, phénols...) C _{org} extractible, C/N*	Risque potentiel de toxicité et transferts dans l'environnement
Pollution chimique ou organique	

Source : Stauffer (2014). Les * représentent les indicateurs retenus et sélectionnés dans ce travail

Les indicateurs sont extrêmement nombreux et différentes méthodes peuvent mesurer le même paramètre. Le choix des paramètres appropriés pour l'évaluation d'un processus ou d'une fonction est alors une étape délicate. Pour choisir un ensemble minimum d'indicateurs, des critères ont été répertoriés par de nombreux auteurs (Bispo *et al.*, 2011). Ils doivent être :

- liés au fonctionnement, intégrer des propriétés physiques, chimiques et biologiques bien corrélées avec des processus de fonctionnement du sol (cycle hydrologique, décomposition, symbiose, cycle nutritif) qui sont plus difficiles à mesurer directement ;
- sensibles aux variations de gestions et aux variations climatiques à long terme ;
- connus scientifiquement et avoir une pertinence écologique, les variations « naturelles » dans l'espace et le temps telles que les saisons, pour contrôler les interférences avec les effets des facteurs mesurés (pratiques agricoles, changement climatique) ;
- reproductibles, faciles à utiliser et peu onéreux (échantillonnage et détermination), pour permettre un grand nombre d'analyses et présenter des bonnes qualités de mesure (précision, fiabilité, robustesse), tant par les spécialistes que par les gestionnaires des sols ou les producteurs ;
- interprétables : ce qui nécessite de disposer de valeurs seuils de référence, de faire partie des référentiels existant sur les sols, et d'avoir un caractère universel (large distribution géographique, processus ubiquistes au sol).

Le traitement des résultats doit permettre de mesurer l'impact d'un itinéraire cultural, d'une pollution ou d'une gestion territoriale. Par exemple, l'implantation de ligneux en sol agricole a augmenté l'abondance fongique, dont l'impact serait la modification de l'humification et du cycle du carbone.

II.3.2. 1. Caractéristiques et qualité des sols

Les caractéristiques des sols sont des attributs simples mesurables qui peuvent être facilement énoncés et servent à distinguer les différents types de sol. Ils peuvent être pratiques ou pas (couleur, texture, couverture végétale, etc..) et ne donnent pas d'information directe sur la qualité des sols. Une seule caractéristique peut influencer sur plusieurs qualités.

Il faut noter que la méthode FAO permet d'évaluer les qualités directement à partir des caractéristiques, mais le passage par la qualité constitue néanmoins une étape intermédiaire importante.

La qualité des sols est un attribut complexe qui est liée à l'utilisation qui est faite et à l'aptitude de ce sol à supporter cette pratique (FAO, 1983). Cette notion est définie suivant des côtes ou des degrés de contraintes (niveau de sévérité). Les qualifications des classes généralement retenues dans les procédures de classification sont « haut », « modéré », « bas » et « très bas ».

L'attribution du degré de sévérité s'effectue par la méthode experte et les niveaux de sévérité correspondent au nombre de classes dans lesquelles la qualité des sols est classée. La méthode comporte 4 à 5 niveaux de sévérité qui correspondent directement à l'aptitude du point de vue physique des sols. Ils sont notés S1, S2, S3/N1, N2. Le couple S3/N1 est défini suivant des critères économiques qui rentabilisent ou pas l'utilisation faite (Tableau V).

Tableau V : Classification des sols proposée par la FAO (Lavoie *et al.*, 1994)

Ordre	Classe	Sous-classe	Unité
S (apte)	S1		
	S2	S2m	S2e-1
		S2e	S2e-2
		S2me etc.	etc.
	S3 etc.		
N (inapte)	N1	N1m	
		N1e	
		etc.	

II.3.2.2. Indicateurs physico-chimiques de la qualité des sols

La qualité physique d'un sol est fortement liée à sa structure, c'est-à-dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés. Elle dépend principalement des caractéristiques des pores et des particules solides. Dans le sol, la matière organique est un des principaux liants dans la formation des agrégats (Tisdall & Oades, 1982). C'est dans les différentes catégories de vides ménagés par cet assemblage que l'eau, les solutés et les gaz circulent et que les êtres vivants peuvent se développer. Une déstructuration affecte la

pénétration des racines dans le sol (Bœuf-Tremblay, 1995) et également l'installation de la microflore et la faune du sol (Larsen *et al.*, 2004 ; Beylich *et al.*, 2010), montrant ainsi que les propriétés physiques d'un sol peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement et les services rendus par un sol.

Pour ce qui est de ses propriétés chimiques, le sol est avant tout une source de nutriments indispensables pour les plantes. La présence d'ions en excès peut provoquer des phénomènes de toxicité alors qu'au contraire, un déficit entraîne une diminution de la fertilité du sol (Tessier *et al.*, 1996). Les activités humaines ont engendré la présence de contaminants tels que les Eléments Traces Métalliques (ETM) mais également en molécules organiques comme les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) qui impactent le fonctionnement des sols. Ainsi, ces contaminants sont pris en compte dans l'évaluation de la qualité des sols. Les principales propriétés chimiques à intégrer dans l'évaluation de la qualité des sols sont la Capacité d'Echange Cationique (CEC), le pH, la teneur en matières organiques, la concentration et la disponibilité des nutriments. Même si les indicateurs physico-chimiques sont essentiels pour étudier la qualité d'un sol, les organismes du sol, qui sont, acteurs de nombreuses fonctions écosystémiques, peuvent caractériser l'état et le fonctionnement du sol (Bispo *et al.*, 2009 ; Cluzeau *et al.*, 2012)

II.3.2.3. Organismes vivants comme outil de diagnostic de la qualité des sols

De nombreux paramètres biologiques peuvent être utilisés comme outils de diagnostic de la qualité des sols (Stone *et al.*, 2016), devenant ainsi des bio-indicateurs. Les bioindicateurs peuvent être définis comme « des organismes qui répondent à un stress par leur présence ou leur absence, par les modifications de certaines caractéristiques ou activités particulières, ou par une bioaccumulation de certains contaminants » (Eijsackers, 1983). De ce fait, ils peuvent être des témoins de perturbations de l'écosystème. Une perturbation est définie comme « une modification d'un système qui se trouve placé hors de son état normal » (Ponge, 2012).

La composante biotique la plus étudiée est la microflore. La biomasse microbienne est un indicateur souvent utilisé car sensible, notamment aux teneurs en matières organiques pouvant être modifiées lors d'une perturbation (Gros, 2002). Cependant, la biomasse microbienne du sol ne suffit pas et d'autres méthodes plus informatives ont été recherchées pour mieux identifier les perturbations subies par le sol. Ainsi, la biologie moléculaire a permis de développer des indicateurs taxonomiques et fonctionnels plus performants

(diversité taxonomique, taxons indicateurs, études des gènes par des approches métagénomiques) (Bouchez *et al.*, 2016). La microflore est également étudiée comme indicateur de la qualité des sols à travers ses activités enzymatiques (Caldwell, 2005), ou sa capacité de minéralisation (Bastida *et al.*, 2008).

- La microfaune est un compartiment souvent utilisé dans l'évaluation de la qualité des sols, notamment par l'étude des communautés de nématodes. Il est à noter que l'étude des nématodes n'est pas récente et il s'agit même du premier indice biologique de la qualité des sols (Bongers, 1990). Ceci a donc conduit à de nombreux travaux autour de la qualité des sols par l'étude des communautés de nématodes (Abawi & Widmer, 2000 ; Culman *et al.*, 2010 ; Garcia-Ruiz *et al.*, 2009).

- La macrofaune est un compartiment encore peu étudié comme indicateur de la qualité des sols, même si son intégration dans les programmes de recherche est en essor. Ainsi, Garcia-Ruiz *et al.*, (2009) proposent un Indice Biologique de la Qualité des Sols (IBQS), basé sur les communautés de macrofaune observées selon différents usages des sols. D'autres études se sont intéressées à ce compartiment pour évaluer la qualité de sols fortement anthropisés, notamment celle des sols urbains (Santorufu *et al.*, 2012) ou celle des sols pollués aux métaux (Nahmani & Rossi, 2003). Enfin, certains travaux combinent des paramètres physico-chimiques avec les communautés de la macrofaune, comme l'ont fait précisément Velasquez *et al.*, (2007) avec leur General Indicator of Soil Quality (GISQ).

Tout d'abord, l'abondance en organismes vivants renseigne sur la qualité de l'écosystème car elle est indicatrice de la capacité globale d'un écosystème à accueillir un potentiel biotique (Doran & Zeiss, 2000). Ensuite, la diversité taxonomique est également un indicateur de la qualité puisqu'il reflète la capacité de l'écosystème à offrir des habitats et des types de nourritures différents (Bardgett, 2002 ; Cole *et al.*, 2006). De plus, l'étude de la composition des communautés permet de déceler la présence de taxons indicateurs de la qualité des sols, car certains taxons sont connus pour être sensibles ou résistants aux perturbations (Havlicek, 2012 ; Gerlach *et al.*, 2013).

Les perturbations engendrent un changement dans le fonctionnement de l'écosystème défini par le franchissement d'un seuil (Briske *et al.*, 2003). L'interprétation des données obtenues avec les indicateurs doit alors fournir aux gestionnaires des recommandations sur les paramètres qu'il faudrait modifier ou non, pour maintenir ou améliorer le fonctionnement du sol. Pourtant, la sensibilité des indicateurs n'est pas équivalente. Ainsi, la rapidité avec laquelle les indicateurs biologiques et microbiologiques répondent aux perturbations du

milieu fait d'eux des "alerteurs" potentiels dans un programme de surveillance des sols (Jordan *et al.*, 1995).

Conclusion partielle

Le sol a été défini et les facteurs dont dépend sa composition ont été évoqués. Les différents services rendus par lui ont été également présentés. Aussi, les notions de qualité et les indicateurs de fertilité dudit sol ont pareillement été présentés.

CHAPITRE III : CADRE DE L'ETUDE

Dans cette partie, nous présentons la zone d'étude. Nous insisterons sur sa géologie, son sol, son climat, sa végétation, son relief et son hydrographie d'une part et d'autre part, nous présenterons la démographie et les diverses activités économiques menées par la population.

III.1. Situation géographique

Cette étude a été réalisée dans la sous-préfecture de Kokumbo dans la région du Bélier en Côte d'Ivoire (Figure 10). A l'instar des autres régions productrices de cacao où les systèmes agroforestiers ont quasiment disparu, cette zone a été choisie pour l'étude parce qu'elle a la particularité d'abriter encore des plantations agroforestières traditionnelles à base de cacaoyers et encore en production. La Sous-préfecture de Kokumbo se situe dans le Centre de la Côte d'Ivoire, sur la branche Ouest du V Baoulé, entre les latitudes Nord $6^{\circ}19'37.81''$ et $6^{\circ}34'51.18''$ et les longitudes Ouest $5^{\circ}19'58.35''$ et $5^{\circ}20'02.54''$. Elle appartient à la région administrative du Bélier et au département de Toumodi. Elle est limitée à l'Ouest par le district autonome de Yamoussoukro, à l'Est par les Sous-préfectures de Toumodi et de Djékanou et au Sud par la Sous-préfecture de Bonikro.

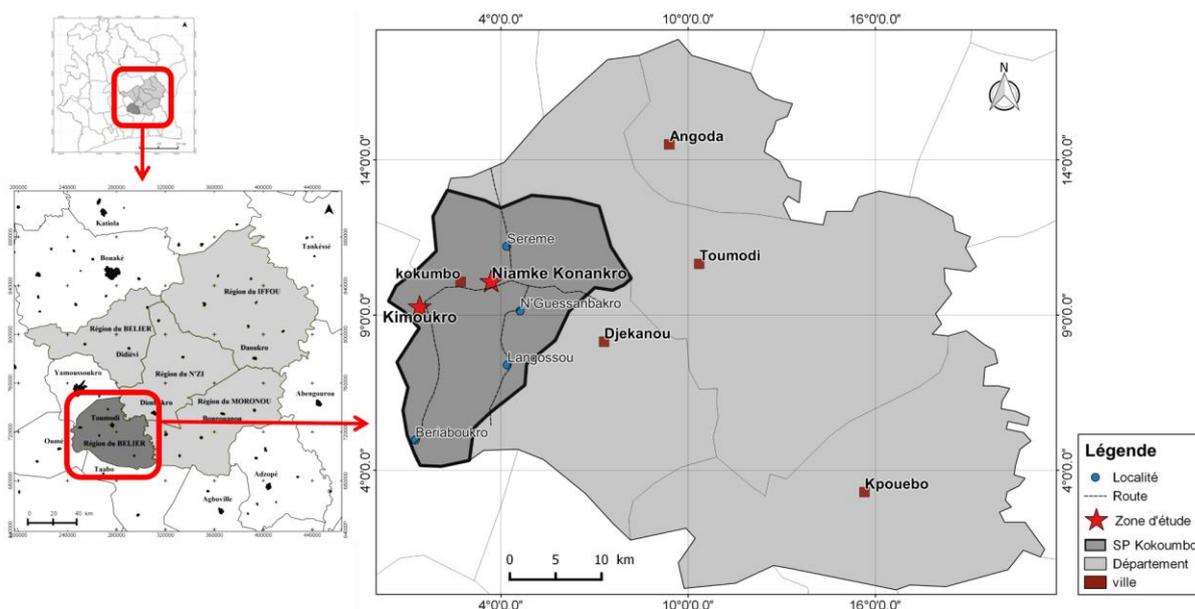


Figure 10 : Localisation de la sous-préfecture de Kokumbo dans le département de Toumodi au Centre de la Côte d'Ivoire

III.2. Climat

Le "V-Baoulé" appartient au secteur mésophile du domaine guinéen (Eldin, 1971). Il fait partie de la zone de transition forêt-savane ou zone préforestière. Cette région est sous l'influence d'un climat tropical, bimodal, caractérisé par deux saisons de pluie d'inégale importance, séparées par deux saisons sèches. La grande saison des pluies commence en mars et prend fin en juin tandis que la petite saison des pluies part de septembre à octobre. Entre les deux saisons des pluies, se situe la petite saison sèche de juillet à août alors que la grande saison sèche va de novembre à février. Un vent sec et dominant (Harmattan) souffle de décembre à février pendant la grande saison sèche. La pluviométrie mensuelle atteint deux optima respectivement en Juin et en Octobre et se situe autour de 1090 mm annuellement alors que les températures sont caractérisées par leur uniformité et leur faible amplitude avec une valeur moyenne de 27,14 °C (Figure 11).

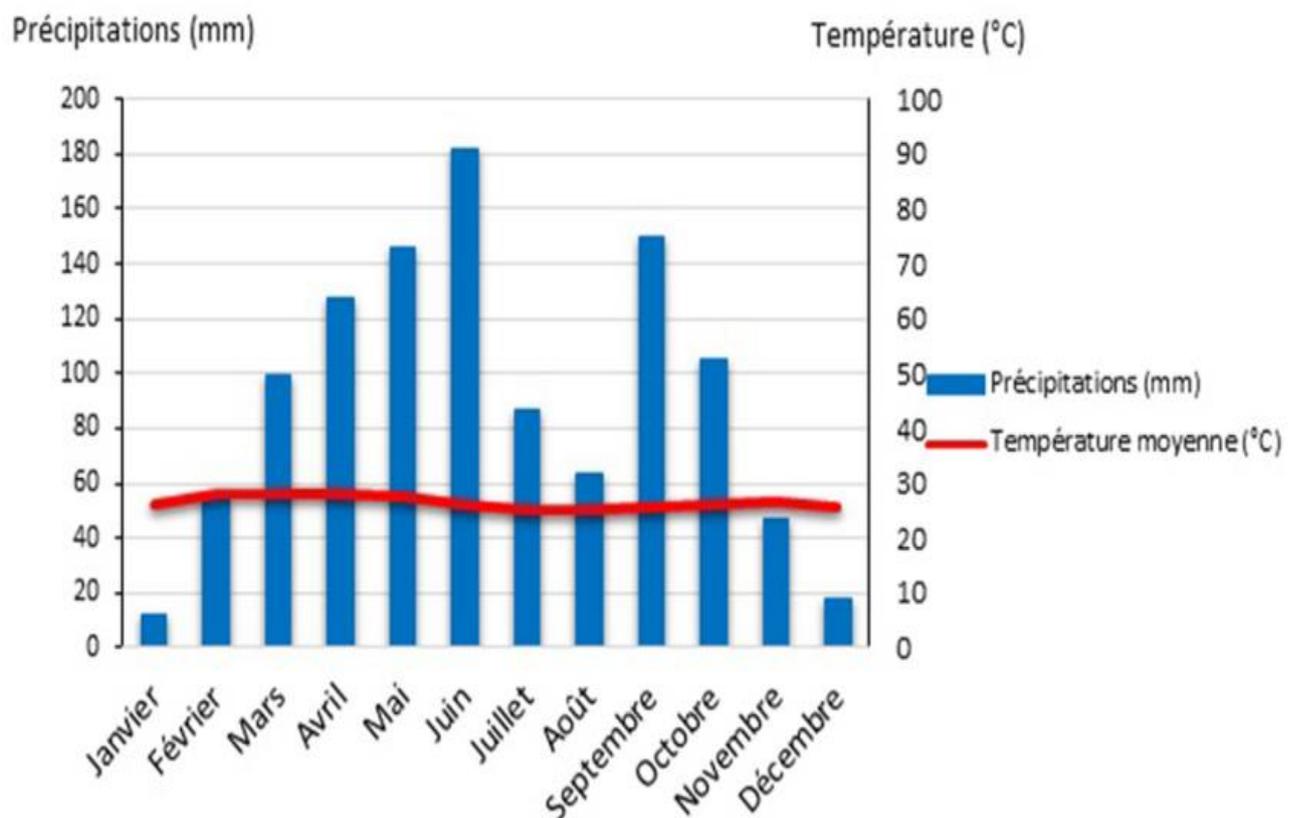


Figure 11 : Diagramme ombrothermique du département de Toumodi de 1982 à 2012.

Source : <http://www.climate.org>

III.3. Végétation

La végétation de la région du Bélier appartenant au "V- Baoulé "est constituée d'une mosaïque de savanes guinéennes et de forêts denses humides semi-décidues (Guillaumet et Adjanohoun, 1971). La transition entre ces deux types de formations végétales se fait sous la forme d'un gradient le long duquel la part des savanes est croissante depuis les blocs forestiers jusqu'à la région sub-soudanaise où les forêts ne représentent plus qu'une faible partie du territoire (Hiernaux, 1975). Il y a les forêts denses humides semi-décidues qui abritent les espèces d'arbres telles que *Celtis spp.* (Ulmaceae), *Triplochiton scleroxylon* (Sterculiaceae), *Funtumia elastica* (Apocynaceae), *Mansoniaaltissima* (Sterculiaceae), *Teclea verdoorniana* (Meliaceae), *Nesogordonia papaverifera* (Sterculiaceae), *Antiaris toxicaria var. africana* (Moraceae) et *Milicia regia* (Moraceae). Les herbes sont majoritairement représentées par *Olyra latifolia* (Poaceae), *Leptaspis zeylanica* (Poaceae) (Kpangui, 2015).

III.4. Relief

Le relief du "V-Baoulé" est constitué de bas-plateaux et d'un système peu élevé de rides et de collines dues à un matériel essentiellement schisteux, avec de nombreuses passées de roches vertes et de quartzites (Rioux, 1966). Ce système appelé "la chaîne baoulé" s'étend du mont Kokumbo au Sud-ouest jusqu'à Fétékro au nord-est. Les altitudes varient entre 100 m et 550 m. Les principaux sommets sont entre autres, le Kokumbo-Boka (505 m), l'Orumbo-Boka (527 m). A côté de ces formations géologiques. Il y a aussi quelques plaines et nombreuses collines de structure granitique (Anonyme, 2003).

III.5. Hydrographie

Le département de Toumodi est bordé par le Bandama à l'Ouest, le N'Zi (affluent du Bandama) au Sud-Est. Entre ces deux cours d'eau importants, serpentent plusieurs marigots dont le plus important est le Kan (affluent du N'Zi) au Nord-Est. En plus de ces principaux cours d'eau qui arrosent la zone. Il y a plusieurs rivières et lacs dont le plus important est le lac de Taabo sur lequel est construit le barrage de Taabo.

Les sols de la région reposent sur de vastes massifs granitiques, de roches métamorphiques et schisteuses. On y rencontre de nombreux types directement liés au type de végétation et à l'altitude des collines.

III.6. Géologie

Du point de vue de la géologie, la zone d'étude est délimitée par les latitudes nord 6°30' et 6°45' et, par les longitudes ouest 5°00' et 5°15. Il est situé dans une large bande du Birrimien métamorphique, de direction NNE-SSW, encadré par des granitoïdes plus récents. Il appartient aussi à l'orogène éburnéenne (Yao-Kouamé, 2007). Plus précisément, la géologie de Kokumbo appartient au complexe volcano-sédimentaire et est marquée par une combinaison de zones granitiques et sédimentaires. On y observe principalement :

- des granites à biotite et autres métagranites à biotite ;
- des micaschistes indifférenciés et des chloritoschistes ;
- des métavolcanites indifférenciés et des conglomérats.

On observe dans la zone, des affleurements rocheux en boules ou dalles. Des cuirasses latéritiques supplantent les formations schisteuses.

Elles sont souvent en blocs et contiennent des enclaves de quartz. L'existence de filons de quartz, présage de l'existence d'une minéralisation aurifère, d'où la présence de nombreux puits d'orpaillage clandestin. Ces différentes formations apparaissent nettement dans le paysage (Figure 12).

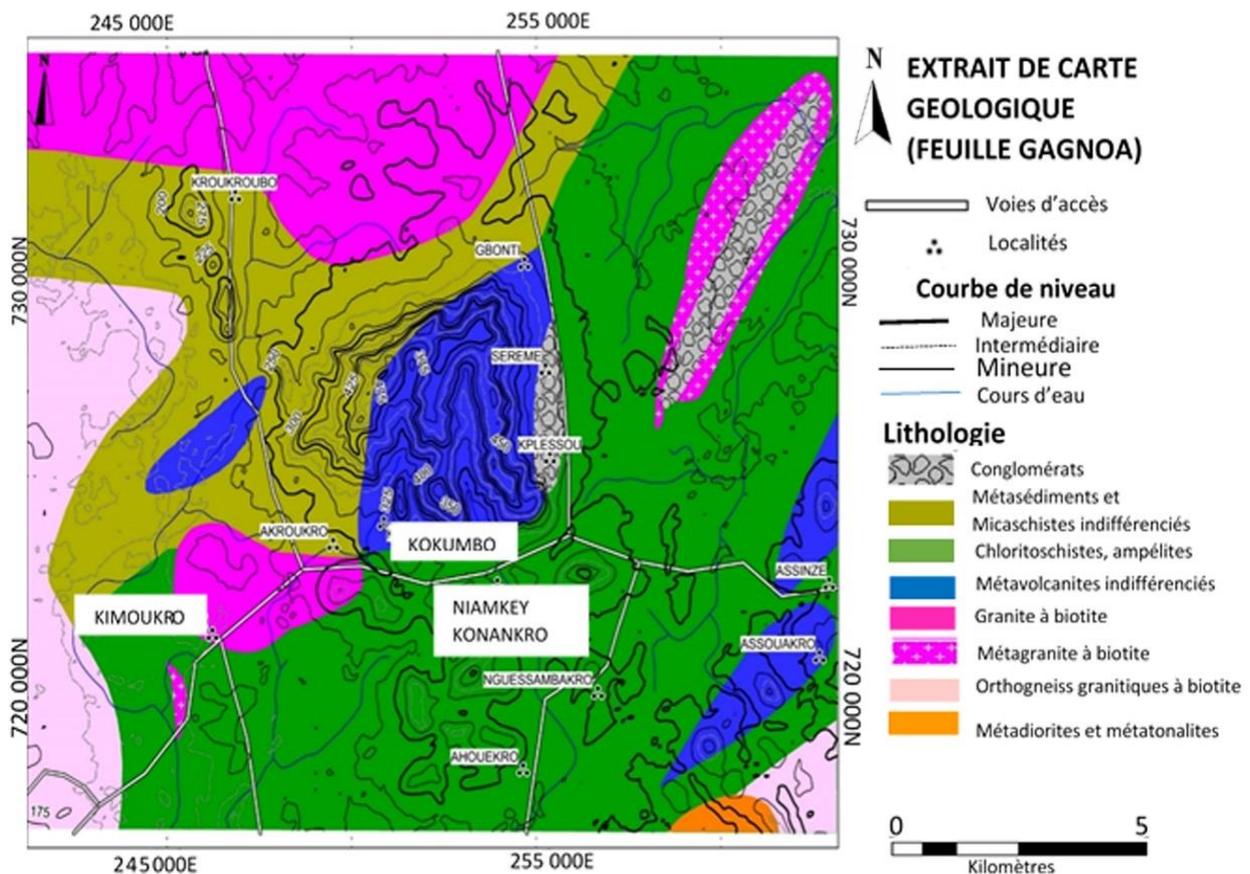


Figure 12 : Carte géologique de la sous-préfecture de Kokumbo

III.7. Sols

Les sols de la région reposent sur de vastes massifs granitiques, de roches métamorphiques et schisteuses. On y rencontre de nombreux types directement liés au type de végétation et à l'altitude des collines.

Les sols du "V-Baoulé" sont représentés comme un complexe de sols ferrallitiques moyennement ou fortement désaturés et de sols ferrugineux tropicaux remaniés selon les travaux de Perraud (1971) (Figure 13).

Les sols ferrallitiques, fortement ou moyennement désaturés, sont souvent recouverts de forêt sur les sommets des collines et de savane sur les pentes. Le potentiel de fertilité dépend essentiellement du taux d'éléments grossiers et de la texture des couches supérieures. Dans les zones au relief accidenté où les sols sont issus de roches basiques et de schistes, seuls les sols ferrallitiques typiques-rajeunis (selon le CPCS, 1967) situés en pente inférieure et les sols bruns eutrophes peuvent être mis en valeur. Leur potentiel de fertilité est très élevé. Si la végétation est encore forestière, la culture du cacaoyer peut être envisagée mais, le plus souvent, ces sols sont favorables à toutes les cultures vivrières : maïs, igname, etc. Les sols ferrugineux sont constitués soit d'éléments remaniés, soit d'éléments lessivés. Le premier se développe sur un matériau remanié assez sableux d'origine ferrallitique. Sur les pentes supérieures et les sommets, ces sols remaniés sont, soit graveleux, soit profonds, avec des tâches et des concrétions. En pente inférieure, ces sols sont sableux sans éléments grossiers et présentent une hydromorphie importante à moyenne ou faible profondeur. Le second comprend les sols développés à partir d'une arène granitique peu profonde et la texture est sableuse avec un très léger accroissement du taux d'argile en profondeur. La couche d'accumulation étant marquée par une consistance moins friable et des traînées de tâches ferrugineuses. Quel que soit le groupe considéré, la fertilité de ces sols est faible ou médiocre (Avenard *et al.*, 1973).

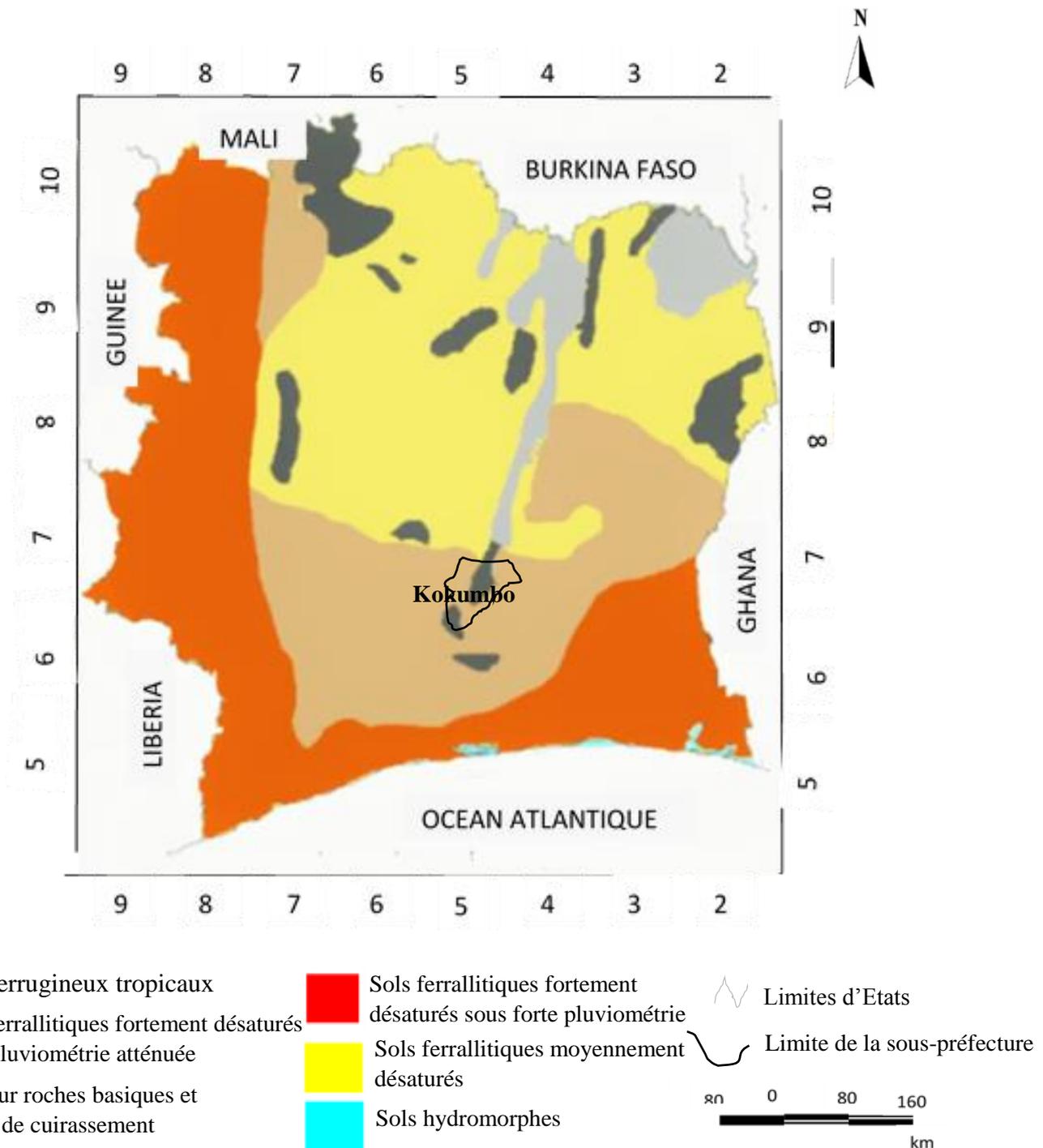


Figure 13 : Aperçu des différents types de sols de la Côte d'Ivoire (Bakayoko, 2007 modifiée)

III.8. Démographie et activités économiques

III.8.1. Démographie

Le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014 estime la population de la Sous-préfecture de Kokumbo à environ 24650 habitants. Les autochtones représentent 75 p.c. avec 72 p.c. de Baoulé et 3 p.c. de Gouro. Les populations allogènes (Agni, Sénoufo,

Malinké) ne représentent que 10 P.c. de la population alors que les ressortissants de la sous-région y sont représentés à 15 P.c. (Koffi, 2006). L'âge des producteurs de la sous-préfecture varie de 19 à 89 ans avec un âge moyen de 44 ans. Dans l'ensemble de la zone, l'âge des planteurs se situent majoritairement dans les tranches de 35 à 44 ans (35,2 p. c.) et de 45 à 54 ans (26,7 p.c.). Les jeunes producteurs (moins de 35 ans) représentent 21,9 p.c. La plus faible proportion de producteurs (16,2 p.c.) rassemble les personnes âgées de plus de 55 ans. Cette répartition générale des classes d'âges varie suivant les localités enquêtées (Kpangui, 2015). La population active représente environ 50 p.c.

III.8.2 Activités économiques des populations

Les principales activités économiques menées par les populations de cette zone ont été jadis dominées par l'exploitation aurifère, cependant, l'agriculture et principalement les cultures de rente commencent à prendre une importance.

III.8.2.1 Exploitation de l'or

L'exploitation de l'or fut la principale activité qui a conduit à la création de la ville de Kokumbo. Deux types d'exploitations se sont succédées jusqu'à ce jour : artisanale et moderne :

- L'exploitation artisanale de l'or du mont Kokumbo a démarré à partir du village de Kpléssou par des forages sur les flancs de collines et par ramassages des alluvions dans les lits des cours d'eaux Ballo, Yâdjo et Blô n'zué (Koffi, 2006). Cette exploitation dirigée par la chefferie Akouè de Duokro, s'est étendue à l'ensemble des collines de la Sous-préfecture de Kokumbo et aux affluents du fleuve Bandama autour de Kimoukro et Bonikro (Chauveau, 1979). Les instruments utilisés étaient rudimentaires et l'exploitation était de type familial. L'orpallage clandestin se pratique dans cette zone et menace forte l'environnement et les activités agricoles (Kpangui, 2015).

- L'exploitation moderne a vu le jour avec l'ouverture de tunnels et la création d'une usine de traitement des minerais vers 1900 sur l'initiative des colons français. Plusieurs sociétés se sont succédées dans l'exploitation de l'or du Kokumbo-Boka. Ce sont la Compagnie Française de Kong (CFK) en 1901, la Société Kokumbo Ivory Coast Company Limited (KYCCL) en 1903 et la Société Minière et Foncière du Bandama (SMFB) en 1910.

Bien qu'au ralenti, faute de permis d'exploration des sites d'or, l'exploitation clandestine de ce minerai se généralise de plus en plus aujourd'hui à l'ensemble des localités de la Sous-préfecture de Kokumbo menaçant grandement les activités agricoles dans cette région.

III.8.2.2. Agriculture

L'histoire de l'agriculture est intimement liée à celle de l'orpaillage dans la Sous-préfecture de Kokumbo. L'agriculture vivrière fut d'abord la première à s'installer dans la zone en dehors des chantiers d'orpaillage pour l'alimentation des orpailleurs. Vinrent par la suite, les cultures d'exportations représentées d'abord par le café puis par le cacao (Chauveau, 1979).

▪ Cultures vivrières

L'agriculture vivrière traditionnelle se déroule principalement en savane mais aussi en forêt et sur les vieilles plantations de caféières et de cacaoyères. Elle est basée exclusivement sur un système de culture itinérante sur brûlis. Les cultures rencontrées sont : le riz, le maïs, le manioc, la banane, le taro et l'igname. Les cultures de riz sont pratiquées dans les bas-fonds à proximité des cours d'eau en monoculture ou parfois en association avec le maïs. Si anciennement, les cultures vivrières sont caractéristiques de chaque groupe (igname pour les autochtones et le riz et maïs pour les allogènes), aujourd'hui, tous les groupes pratiquent la culture de toutes les spéculations et principalement le riz et le maïs.

▪ Cultures d'exportation

Les cultures de rente dans la Sous-préfecture de Kokumbo ont été introduites entre 1928 et 1930, dans les zones dominées par les forêts (Chauveau, 1979). En effet, Kokumbo bénéficiait de par sa position transitoire de forêt-savane des conditions favorables à la culture du caféier et du cacaoyer. L'acceptation et l'implantation de ces cultures, surtout pour le cacaoyer, par les populations du cercle du N'Zi-Comoé a fait de la zone la première boucle du cacao. Cependant, avec la chute des prix du café, les plantations de caféiers ont pratiquement disparu de la zone alors que les plantations de cacaoyers ont résisté et se pratiquent encore, même dans les espaces savaniques jusqu'à ce jour. A ces principales cultures d'exportation, s'ajoute l'introduction des cultures d'hévéa et du teck dans la zone Sud du "V-Baoulé". Hormis l'agriculture, les populations s'adonnent à diverses autres activités.

III.8.2.3. Autres activités

Outre l'agriculture, les populations du "V- Baoulé " s'adonnent à la cueillette et/ou au ramassage des produits issus des zones savanico-forestières, à la chasse, à la pêche et à la production de charbon de bois.

La cueillette et/ou le ramassage des produits issus des zones savanico-forestières concerne non seulement les fruits de palmier à huile [*Elaeis guineensis* (Arecaceae)] et du rônier [*Borassus aethiopicum* (Arecaceae)] mais aussi certains produits saisonniers tels que le *Corchorus olitorius* (Tiliaceae), l'escargot. A cela s'ajoutent certains fruits servant d'aliments d'appoint en période de pénurie de légumes frais, notamment, *Irvingia gabonensis* (Irvingiaceae), *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), *Ricinodendron heudelotii* (Euphorbiaceae) (Kpangui, 2015 ; Adou *et al.*, 2016).

La chasse peut être considérée comme la seconde activité la plus importante après la cueillette. Elle est pratiquée aussi bien en savane qu'en zone à dominance forestière (Kpangui, 2015). Deux grandes pratiques de chasses se distinguent dans la zone : les grandes battues et la chasse individuelle. La première, collective, se pratique en savane avec des filets pendant la grande saison sèche par le biais des feux de brousse. La seconde est pratiquée dans les deux milieux durant toute l'année à l'aide de fusil ou de pièges disposés en bordure des plantations ou le long de sentiers. Bien qu'interdite depuis 1975 en Côte d'Ivoire, la chasse est devenue une activité assez importante dans la région et la vente de gibiers constitue une activité assez lucrative pour les populations.

Traditionnellement, la pêche est une activité pratiquée en saison sèche par les femmes et les enfants dans les marigots et les cours d'eau temporaires qui traversent la savane. Les points d'eau sont généralement vidés à l'aide de cuvette et le poisson attrapé à main nue. Les hommes pêchent dans les grands cours d'eau comme le N'Zi et le Bandama à l'aide d'hameçons ou de filets.

Conclusion partielle

La Sous-préfecture de Kokumbo se trouve en Côte d'Ivoire, dans la zone de contact forêt-savane de Toumodi, où règne un climat tropical humide de type baouléen. C'est une zone dominée par de nombreuses collines, avec quelques rivières. La géologie de la zone présente des formations volcano-sédimentaires dont l'altération produit divers types de sols. Diverses activités économiques se développent dans ce département situé à environ 200 km d'Abidjan et de 30 km de Yamoussoukro.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE IV : Matériel

CHAPITRE V : Méthodes

CHAPITRE IV : MATERIEL

Selon Beaud (1997) la connaissance du type d'échantillonnage et de sa représentativité, la description des instruments utilisés, rend compte de la fiabilité des données scientifiques d'un travail de recherche. Affou & Gourène (2005) renchérissent pour dire que la qualité d'un travail scientifique commence par la description du matériel utilisé et la présentation des données. Le présent chapitre s'emploie à indiquer d'une part, le matériel utilisé, et, d'autre part, leurs applications pour la collecte et le traitement statistique des données par le biais de logiciels adaptés.

IV.1. Matériel végétal

Le matériel végétal sur lequel est menée cette étude est constitué d'une part de cacaoyers « *Theobroma cacao* » non sélectionnés communément appelé "tout-venant" et la variété améliorée dite « Mercedes » et d'autre part d'espèces végétales constituant les agroforêts.

Le cacaoyer appartient à la famille des Malvacées. C'est une espèce diploïde originaire du nord de l'Amérique du sud et qui a un petit génome. C'est un cacaoyer de 3 à 8 mètres de hauteur, qui pousse à l'ombre. Il porte en permanence des feuilles, des fleurs et des fruits toute l'année. Ces fruits sont appelés "cabosses" de couleur verte à rouge sombre selon la variété, mesure environ 25 cm de long, 15 cm de large et contiennent 20 à 60 fèves. Ils sont portés par le tronc et les plus grosses branches.

Dans cette étude, trois types d'agroforêts (simple, mixte et complexe) ont été utilisés en vue de déterminer leur influence sur les propriétés physico-chimiques des sols ainsi que leur effet sur le rendement des cacaoyers. Les agroforêts simples ou plein soleil sont caractérisées par une canopée ouverte et une forte proportion d'espèces végétales exotiques (figure 14 A) ; les agroforêts complexes comportent une canopée fermée et une forte densité d'espèces végétales locales (figure 14 B) et enfin les agroforêts mixtes qui sont à l'intersection des deux précédentes, sont caractérisées par une canopée moyennement ouverte et une densité d'espèces locales moyenne (figure 14 C).



Figure 14 : Différents types d'agrosystème de la zone d'étude (A : Agrosystème de plein soleil ; B : Agrosystème complexe ; C : Agrosystème mixte)

IV.2. Matériel de terrain

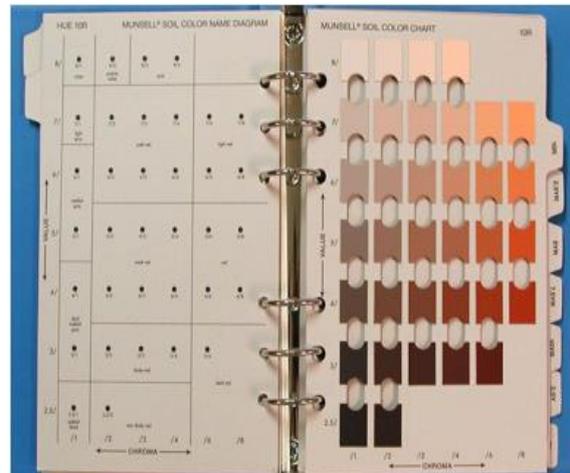
Les équipements usuels listés ci-après ont servi à la localisation et à la caractérisation morpho-pédologique des sites, au prélèvement des échantillons du sol pour les analyses en laboratoire (Figure 15) :

- GPS (Global Positioning System), pour les levées topographiques et les relevés des coordonnées géographiques ;
- des outils (machettes, pelles, pioches, daba), pour le nettoyage de la parcelle et l'ouverture des fosses pédologiques ;
- mètre ruban de 50 m, pour la délimitation des parcelles ;
- de l'eau, pour l'humectation du sol en vue de la détermination de la texture du sol par le test du toucher ;
- mètre de menuisier (5 m), pour la mesure des épaisseurs de couches constitutives des profils ;
- code Munsell, pour la description des horizons de sol ;
- balance de ménagère, pour la pesée des différentes fractions de sol ;
- couteau, pour la délimitation de différentes couches et le prélèvement des échantillons de sol ;
- une tarière pédologique, de type Edelman, de diamètre 7 cm, pour le prélèvement des carottes de sol ;
- appareil photographique, pour la capture d'images ;
- récipient (seau), pour l'échantillonnage composite ;

- des sachets en film plastique de polyéthylène, pour recueillir les échantillons.



1- GPS GARMIN



2- Code Munsell



3- Tarière à main



4- Mètre - Ruban



5- Couteau du pédologue

Figure 15 : Matériel de terrain

IV.3. Matériel de laboratoire

Le matériel technique utilisé est composé de :

- pipettes de Robinson-Köhn, pour suivre la vitesse de sédimentations des différentes fractions du sol en suspension ;
- étuve ;
- fioles et béchers, pour recueillir les solutions et aliquotes ;
- agitateur mécanique de marque HS 500, pour homogénéiser les échantillons ;
- broyeur centrifuge à bille, pour broyer finement les échantillons de sol ;
- spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA), pour doser le magnésium ;
- centrifugeuse, pour effectuer la séparation granulométrique par densité ;
- spectrophotomètre d'émission, pour doser l'azote ;
- balance électronique de précision

Le matériel chimique suivant est utilisé, pour effectuer les analyses en laboratoire :

- pH-mètre à électrodes combinées, pour mesurer l'acidité ;
- eau distillée, pour diluer les solutions initiales et déterminer le pH ;
- réactifs, pour déterminer les teneurs du sol en matières organiques, à savoir :
 - ✓ solution normale de bichromate de potassium ($\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$) ;
 - ✓ solution, demi-normale de Sel de Mohr;
 - ✓ Fluorure de sodium en poudre
- réactifs, pour déterminer les capacités d'échange cationique, à savoir :
 - ✓ acétate d'ammonium ;
 - ✓ pH-mètre tamponné à 7, pour la neutralisation de l'alcool ;
 - ✓ récipient ou système distributeur, pour répartir l'alcool de lavage
 - ✓ récipient en verre ordinaire ou en pyrex, de 500 ml, jaugé à 400 ml, pour recevoir le filtrat
 - ✓ tubes à essais;
- acide nitrique, pour déterminer le potassium du sol, prétraiter les substances humiques avant extractions.

IV.4. Matériel d'analyse des données

Pour le traitement des données recoltées, cette étude se propose d'utiliser deux logiciels, notamment, le logiciel SAS version 9.1 pour les analyses de variances (ANOVA) et corrélations de pearson (r) et le logiciel CANOCO version 4.5 pour les analyses en composante principale (ACP).

Conclusion partielle

Le matériel utilisé au cours de cette étude est très varié et a permis d'obtenir des données statistiquement analysables et interprétables. Le matériel végétal (cacaoyer) est un mélange de matériel tout-venant de la variété dite française et de la variété dite Ghana et parfois la variété améliorée disséminé dans les jeunes plantations. Le matériel de terrain est judicieusement choisi pour leur utilité effective sur le terrain. Il en est de même pour le matériel de laboratoire.

CHAPITRE V : METHODES

Ce chapitre rend compte et détaille la méthodologie appliquée dans cette étude. En effet, Il fait le point complet des méthodes mises en œuvre pour parvenir à des résultats acceptables et analysables scientifiquement. Cette méthodologie a consisté tout d'abord à faire le choix des plantations. Des enquêtes ethnobotaniques et socio-économiques ont ensuite été réalisées pour permettre non seulement de mettre en évidence le rôle des espèces végétales locales mais également d'établir un profil des paysans et les caractéristiques des plantations visitées puis à faire la caractérisation morpho-pédologique et floristique des plantations. Ensuite, des échantillons composites des couches (0-20 cm et 20-40 cm) ont été prélevés et envoyés au laboratoire pédologique de l'ESA de Yamoussoukro pour les différentes analyses. Parallèlement, des carrés de densité et de rendement (CDR) ont été posés, pour recueillir les données sur le rendement des plantations pendant un an. Enfin, les logiciels SAS version 9.1 et CANOCO 4.5 ont été utilisés pour les traitements statistiques.

V.1 Choix des plantations expérimentales

Une prospection sur le terrain a été effectuée afin de choisir les plantations les plus représentatives des différents systèmes agroforestiers de la zone. Le choix de ces plantations cacaoyères a été guidé par la typologie des agroforêts (simple, mixte et complexe). Cette prospection a permis de répertorier et localiser les toposéquences les plus représentatives dans cette zone. Aussi, elle a permis de poser des carrés de densité et de rendement (CDR), afin d'évaluer les rendements des plantations des différents systèmes d'agroforêt.

V.2. Caractérisation du site d'étude

La caractérisation du site de cette étude a porté d'une part, sur une caractérisation floristique et d'autre part, par la description morphologique.

V.2.1 - Collectes de données socio-démographiques et phyto-écologiques

La collecte des données a démarré en janvier 2017 et s'est achevée en Février 2018. Lors de ces missions, quatre activités ont été réalisées : des enquêtes auprès des paysans, des inventaires floristiques dans les plantations choisies, la caractérisation morphologique des sols des différents agrosystèmes et la collecte de données sur les CDR.

V.2.1.1 - Enquêtes socio-économique et ethnobotanique

Les enquêtes réalisées visaient principalement à établir le profil des paysans, caractériser les plantations cacaoyères et les espèces associées. Ainsi, dans chacun des sites sélectionnés, nous avons procédé par des rencontres publiques réunissant les autorités villageoises, les différents chefs d'exploitations, avec la participation des agents d'encadrement de l'ANADER. Il s'agissait d'identifier, les différents acteurs engagés dans la cacaoculture, de manière à prendre en compte toutes les catégories de producteurs et de plantations dans les inventaires botaniques.

A cet effet, un profil des producteurs et les caractéristiques agronomiques des plantations dans la zone d'étude a été établi à partir d'un questionnaire (Annexe 2), soumis individuellement aux producteurs dans les villages et les plantations. Cependant, pour cette étude, les critères des modalités d'accès à la terre, ont été retenus.

Au niveau des plantations, les questions ont porté essentiellement sur les paramètres suivants : la superficie, l'âge, le précédent cultural, les variétés culturales, les contraintes parasitaires et autres maladies, les productions annuelles, l'utilisation ou non des engrais et des produits phytosanitaires etc.

Le questionnaire a été administré à 48 paysans dont, 39 à Niamkey-Konankro et 09 à Kimoukro.

Au niveau ethnobotanique, les enquêtes combinées aux inventaires floristiques, ont porté d'une part sur l'incidence des espèces associées sur le développement des cacaoyers et d'autre part, sur leurs utilisations faites par les paysans. Concrètement, il s'agissait de parcourir avec le producteur, l'ensemble de la plantation afin, d'identifier et renseigner les différentes espèces (noms vernaculaires ou communs) qui ont un intérêt particulier à ses yeux. Quatre principaux types d'utilisations ont été considérés dans cette étude : alimentaire, médicinale, bois d'œuvre, bois de chauffage et autres (ornementales, cosmétiques, commerciales etc). Il en est de même pour l'incidence de l'espèce sur la production, le sol et autres incidences éventuelles.

Cette enquête a été réalisée dans 24 plantations cacaoyères dont 19 plantations à Niamkey Konankro et 5 plantations à Kimoukro.

V.2.1.2 - Inventaires floristiques des différents biotopes

Les inventaires botaniques ont été effectués à partir de deux méthodes de relevés floristiques complémentaires : les relevés de surface et les relevés itinérants. La combinaison de ces deux méthodes a permis de recenser le maximum d'espèces présentes dans les types plantations.

V.2.1.2.1 - Relevés itinérants

La méthode d'inventaire itinérant consiste à parcourir le milieu, en notant toutes les espèces de plantes rencontrées (Aké-Assi, 1984)

Dans les plantations, cet inventaire est d'abord effectué pour recenser toutes les espèces présentes dans une parcelle donnée avant la disposition des placettes. Au cours de cet inventaire itinérant, les diverses utilisations et le rôle des espèces associées ont également été renseignés auprès des paysans. Il en a été de même pour les variétés cultivées, les antécédents culturels, l'âge de différentes plantations et la participation éventuelle à un programme d'encadrement.

V.2.1.2.2 - Relevés de surface

Les inventaires à partir de relevés de surfaces permettent d'obtenir des données quantitatives sur la composition floristique générale d'un biotope. Ils ont été réalisés à la suite de l'inventaire itinérant, grâce à des placettes de 100 m² (10 m x 10 m) dans les plantations.

V.2.1.2.2.1 – Disposition des placettes

La disposition des placettes d'inventaires ainsi que leur nombre ont été principalement guidés par la topographie, la taille (superficie) et l'âge du biotope. A cela faut-il ajouter dans les cacaoyères, la variété cultivée et le précédent culturel. Une fois les placettes délimitées, leurs coordonnées géographiques ont été enregistrées à l'aide du récepteur GPS avant la collecte des données.

V.2.1.2.2.2 Collecte des paramètres floristiques de la végétation

Dans les placettes délimitées, la collecte des données a porté essentiellement sur l'identification des espèces rencontrées pour évaluer leur diversité floristique. Les espèces non identifiées sur le terrain ont été récoltées et un herbier a été constitué pour permettre leur identification au laboratoire à partir de la flore proposée par Lebrun et Stork (1997) et Aké Assi (2001, 2002).

Il a été réalisé à la suite de l'inventaire itinérant, grâce à des placettes ou carrés de densité et de rendement (CDR) de 100 m² (10 m x 10 m) dans les plantations (Anader, 2016).

V.2.2. Caractérisation morphologique des sols du site

Des fosses pédologiques de dimension de 100 cm de long sur 80 cm de large, avec des profondeurs variables ≤ 100 cm (Figure 16) ont été ouvertes manuellement en suivant la toposéquence dans chaque type d'agrosystème. Ainsi, trois fosses pédologiques ont été ouvertes par agrosystème. La description du profil pédologique a été faite conformément aux variables définies dans la base de référence mondiale des sols (2014). Elle prend en compte les éléments caractéristiques du sol (épaisseur de chaque couche, structure, cohésion, texture, porosité, densité racinaire, taux d'éléments grossiers) selon leurs hétérogénéités morphologiques et la détermination de la couleur, à l'aide du code Munsell, par comparaison d'une motte humide aux couleurs standards indiquées par la teinte (Hue), la clarté (Value) et la pureté (Chroma). Cette description permet de classer le sol selon la base des ressources mondiales des sols (WRB, 2014). La profondeur des fosses a été définie en fonction de la pénétration des racines du cacaoyer.

Une unité d'échantillonnage permanente, ou placette d'étude, est ensuite matérialisée sous forme d'un rectangle de 50 m x 20 m à l'aide d'un ruban-mètre. La placette est centrée sur le point central géo référencé et orientée de manière à optimiser son éloignement des bords de la parcelle. Cette orientation varie donc d'une parcelle à l'autre et dépend directement de la taille et de la forme de la parcelle. Les abords des routes, chemins, appatames, zones de stockage de produits phytosanitaires, zone de stockage des fertilisants et les sites d'écabossage sont proscrits des périmètres d'échantillonnage. Dans chaque placette, rectangle de 1000 m², les prélèvements élémentaires sont effectués à la tarière à deux niveaux d'couche [couche de surface (0-20) cm et couche sous-jacent (20 - 40 cm)] en zigzag (Figure 17) suivant la plus longue diagonale. Ces prélèvements élémentaires sont effectués au nœud ou sur les lignes du zig-zag. Pour une même parcelle, deux échantillons composites (Figure 18) de vingt échantillons élémentaires ont été constitués en fonction de la profondeur de prélèvement pour les analyses au laboratoire. Au total, dix-huit échantillons de sols, sont prélevés, mis en sachet et soigneusement étiquetés au marker, pour les analyses chimiques, au laboratoire des sols et des végétaux de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire.

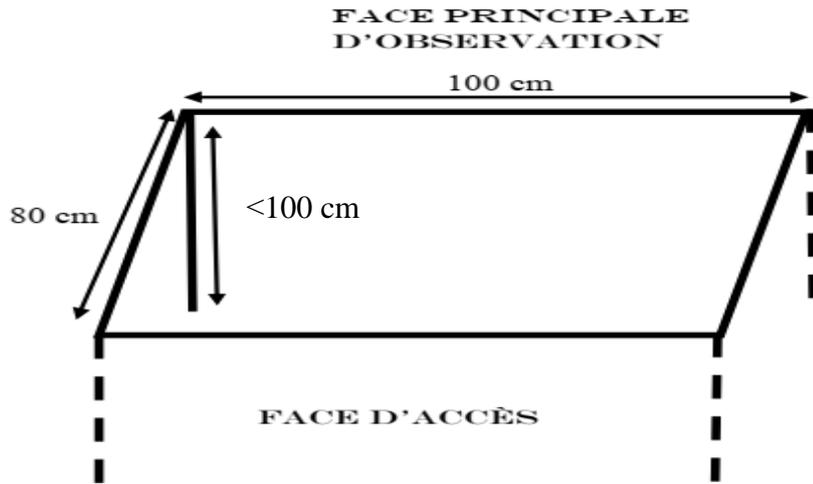


Figure 16 : Schéma de la fosse pédologique

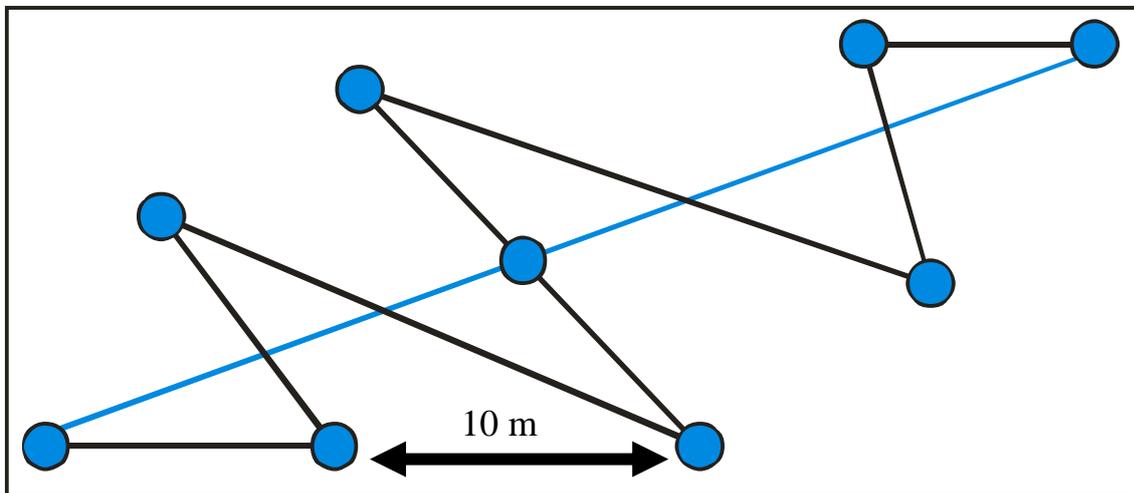


Figure 17 : Plan d'échantillonnage (zig-zag) des sols à la tarière

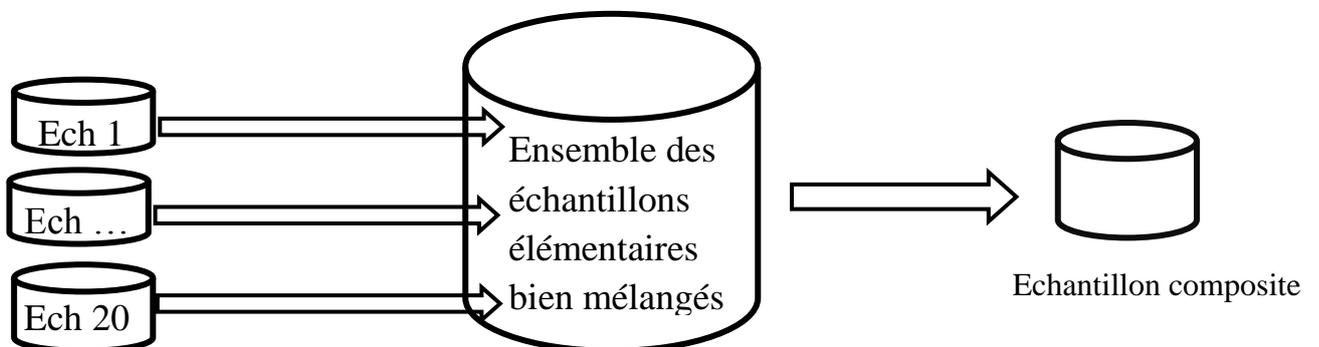


Figure 18 : Préparation d'un échantillon composite

V.3. Analyse en laboratoire

Les méthodes de collecte des données de laboratoire ont consisté à la détermination des propriétés physiques et chimiques du sol en laboratoire après séchage de l'échantillon composite à l'étuve.

V.3.1. Détermination des propriétés physiques du sol

Elles sont basées sur des méthodes de laboratoire conventionnelles et internationalement homologuées et ont consisté à la détermination des propriétés physiques (Argile, Limon et Sable) et chimiques, (pHeau, pHkcl, carbone organique total (C), matière organique (MO), azote total (N), phosphore assimilable (Pass), capacité d'échanges des cations échangeables (CEC)) du sol.

La détermination des propriétés physiques du sol a porté sur l'analyse de la granulométrie de la fraction de l'échantillon composite prélevé sur les différents sites selon la méthode de Robinson.

V.3.2. Détermination des propriétés chimiques du sol

Les analyses chimiques de l'échantillon composite du sol ont porté sur la mesure du pH, la détermination des teneurs de carbone total, azote total, phosphore total, phosphore assimilable, bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC).

V.3.2.1. Détermination du pHeau et pHkcl

L'Acidité du sol (pH_{eau}), évalué avec un pH-mètre électronique dans un rapport sol/solution de 1/2,5 ;

V.3.2.2. Détermination du carbone organique total (C) et matière organique (MO)

Le carbone organique total (C) du sol a été déterminé selon la méthode de Walkley & Black (1934). Le taux de matière organique du sol est obtenu en multipliant le pourcentage de carbone par 1,72 pour les sols cultivés

V.3.2.3. Détermination de l'azote total.

L'azote total a été déterminé selon la méthode de Kjeldahl.

V.3.2.4. Détermination du phosphore assimilable

Le phosphore assimilable (P₂O₅)_{ass} a été déterminé selon la méthode Olsen-Dabin décrite par Bonneau & Souchier (1994).

V.3.2.5. Détermination de la capacité d'échanges des cations et bases échangeables

La capacité d'échange cationique (CEC) et les bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+) sont extraites par rinçage d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$, 1N) à pH 7

Le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) sont mesurés par absorption atomique.

Le potassium (K) est mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme,

V.4. Collecte des données des rendements des plantations

V.4.1. Méthodologie d'un CDR (Anader, 2016)

Les cinq étapes suivantes de la pose de carré doivent être respectées :

1. Faire le tour complet de la parcelle à l'aide du GPS pour la cartographie (à défaut du GPS, faire un croquis sommaire) ;
2. Sur le croquis, déterminer la diagonale la plus longue de la parcelle. La diagonale la plus longue est une ligne droite qui relie les 2 sommets les plus éloignés (diamétralement opposés) ;
3. Mesurer la longueur de la diagonale la plus longue. (exemple AB, figure 19). En l'absence de GPS, il faut utiliser un cordeau et un mètre ruban d'au moins 50 m (de préférence 100 m) ;
4. Entrer dans la parcelle soit par le point A ou par le point B. A l'aide de la table des nombres aléatoires, choisir 2 nombres x_1 et x_2 :
 - a. Le nombre aléatoire x_1 désigne le nombre de pas à effectuer (partant du point A ou B) pour atteindre le point X_1 appelé premier de détermination du carré (figure 19)
 - b. Le nombre aléatoire x_2 désigne le nombre de pas à effectuer (partant du point X_1 et suivant une ligne perpendiculaire à la diagonale [AB]) pour atteindre le point X_2 qui est le premier sommet du carré à poser.
 - c. C'est donc à partir du point X_2 que le CDR est posé :
 - Déterminer le point X_3 qui est le 2^{ème} sommet du CDR diamétralement opposé à X_2 de telle sorte que le segment [X_2X_3] représente la première diagonale du CDR.

- Longueurs des diagonales $[X_2X_3]$

Dimension du carré à poser	Longueur de la diagonale $[X_2X_3]$
10 m x 10 m	14,14 m

- Si les pieds sont alignés, l'on doit déterminer le point X_3 de telle sorte que la droite (X_2X_3) soit perpendiculaire aux lignes des cultures. Dans le cas contraire, le point X_3 est placé au hasard.
- La détermination des deux autres sommets X_4 et X_5 se fait avec l'appui d'un « aide » dans le cas de culture pérenne selon la méthode du « centre du carré »

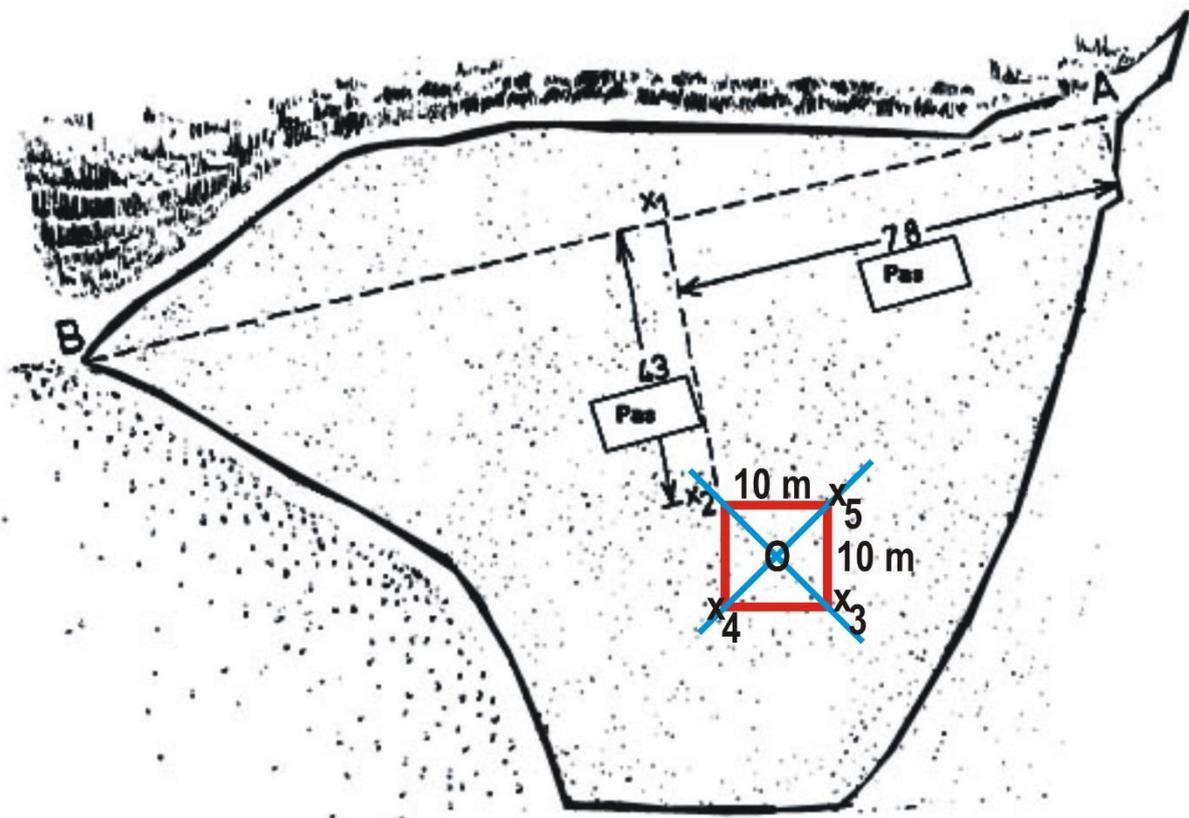


Figure 19 : Schéma de la méthode du centre du carré

5. Méthode du « centre du carré »

- Pour déterminer les deux autres sommets (X_4 et X_5) du carré, il faut déterminer le centre O du carré qui n'est rien d'autre que le centre du segment $[X_2X_3]$. Il faut

tracer la droite perpendiculaire à (X_2X_3) et passant par O. Ainsi les sommets X_4 et X_5 sont placés sur cette perpendiculaire de telle sorte que $OX_4 = OX_5 = [X_2X_3] * 0,5$;

- b. Il faut veiller à matérialiser le carré par des piquets badigeonnés de peinture rouge pour les cultures annuelles et pour les cultures pérennes, il faut mettre de la peinture rouge sur les arbres se trouvant sur la limite du carré ;
- c. Si malgré toutes les dispositions prises, un sommet du carré se retrouvait hors de la parcelle, il faut reprendre le processus à partir du point A ; Il faut surtout éviter d'arrondir les différentes données (garder 2 chiffres après la virgule) car cela pourrait entraîner une sous-estimation ou une surestimation de la superficie du carré et donc du rendement estimé.

V.4.2. Dispositif expérimental

La zone d'étude répond aux critères qui consistent en la recherche des compromis et synergies entre production et services écosystémiques des agroforêts à base de cacaoyer. Le choix porté sur les parcelles agroforestières s'est fait suivant un échantillonnage aléatoire simple des exploitations des producteurs. Des parcelles répondant aux critères d'âge et de diversité des produits autres que le cacao. Dans chaque champ sélectionné, trois placettes de 100 m^2 ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) ont été délimitées. Sur ces placettes, les données de rendement ont été mesurées et une moyenne a été calculée pour le champ.

Les placettes ou CDR utilisées dans cette étude ont été mises en place en 2017 dans le cadre de l'évaluation du potentiel productif des SAF à base de cacaoyers en comparaison avec les plantations de plein soleil de la localité. Le dispositif compte 24 champs établis selon une chronoséquence de trois classes d'âges : $10 < \text{âge} \leq 30$ ans (cacaoyères juvéniles à adultes en production et susceptibles de connaître une décroissance des rendements), $30 < \text{âge} \leq 60$ ans (cacaoyères sénescentes susceptibles de connaître une décroissance des rendements), et $\text{âge} > 60$ ans ("cacaoyère sénescentes") (Tableau VI).

Tableau VI : Effectif des agrosystèmes en fonction de l'âge

Type d'agrosystème		10 < âge ≤ 30 ans	30 < âge ≤ 60 ans	Age > 60 ans	Total
Niamekey-Konankro	PSOL	3	1	0	4
	AGC	0	4	5	9
	AGM	1	3	2	6
Kimoukro	PSOL	2	1	0	3
	AGC	0	0	1	1
	AGM	0	1	0	1
Total		6	10	8	24

Dans chaque cacaoyère, trois placettes ou CDR de 100 m² (Figure 20), représentatives de la parcelle en termes de gestion technique du peuplement cacaoyer et des espèces végétales associés, ont été positionnée afin de disposer d'un échantillon réduit d'individus susceptibles d'être observés.

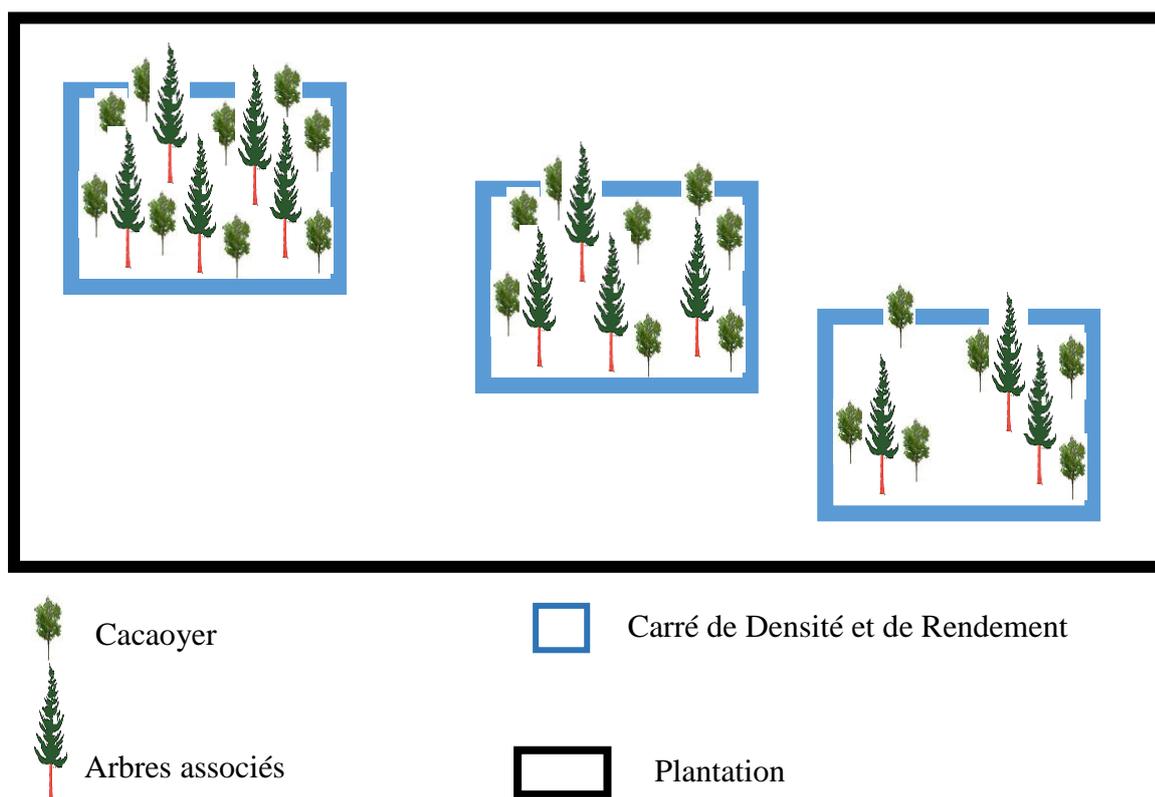


Figure 20 : Dispositif de collecte des données de rendement

La méthode de pose de carré de densité et de rendement (CDR) a permis à travers la fiche de suivi de la production des CDR (annexe), de connaître le rendement moyen par plantation. Cette méthode est basée d'une part, sur l'estimation de la densité des pieds productifs et d'autre part, sur l'estimation du rendement moyen de la parcelle.

V.4.3. Production du cacao marchand

V.4.3.1. Estimation de la Densité

Sur chaque CDR, il faut compter le nombre de pieds à l'intérieur du carré posé (N_1). Pour les pieds se trouvant sur la limite du carré (N_2), on retient la moitié du nombre d'arbre.

Ainsi, la densité D_i du carré i est : $D_i = N_{i1} + N_{i2}/2$.

La densité ou le nombre de pieds à l'hectare se calcule de la façon suivante :

$$D = \frac{\sum_i^n D_i}{n} \times 100$$

Avec n : nombre de carrés par parcelle, D_i : densité élémentaire

V.4.3.2. Estimation du Rendement Moyen

Pour connaître le rendement moyen par hectare, il faut récolter avec le producteur les N_1 pieds à l'intérieur du carré et les $N_2/2$ pieds se trouvant sur la limite du carré. Ensuite, on procède à un comptage des cabosses et des fèves fraîches avec tri des fèves plates. Dès lors, deux possibilités s'offrent à nous : premièrement, appliquer un coefficient de transformation 0.34 (Essola, 2014) sur le poids frais des fèves afin d'avoir la valeur du poids sec ; deuxièmement, on sèche les fèves au soleil après la fermentation et elles sont pesées une fois l'humidité réduite à environ 8 à 10 P.c. La première possibilité fut utilisée dans le cadre de cette étude. L'estimation du rendement potentiel en cacao marchand se fera suivant l'équation suivante :

$$Rdt = \frac{\sum_{i=1}^n N_{cab}}{n} \times (P_{fm} \times C_t) \times 100$$

Avec n : nombre de carrés par parcelle

N_{cab} : nombre moyen de cabosses par carré

P_{fm} : poids moyen des fèves fraîches par cabosse

C_t : Coefficient de transformation de poids de fèves fraîches en fèves sèches

V.5. Traitement statistique des données

Les données collectées sur le terrain et les résultats d'analyse ont été saisies et codifiées, à l'aide du tableur Microsoft Excel 2010. Elles ont été soumises à des analyses statistiques en utilisant le logiciel SAS V9.1. Ce logiciel a permis de comparer les moyennes des données granulométriques et physico-chimiques du sol de chacun des sites d'étude par l'analyse de la variance (ANOVA) au seuil de $\alpha = 0,05$. Lorsqu'une différence significative est notée entre les facteurs considérés pour un caractère donné, le test Newman-Keuls a été réalisé pour comparer les moyennes. Des analyses de corrélation de Pearson (r) ont été également effectuées pour établir des relations entre les agrosystèmes, la fertilité du sol et la productivité du cacaoyer. Les corrélations ($+ r$; $- r$) indiquent, respectivement, une variation de même sens et de sens opposé, avec une intensité similaire de deux variables. Les liens établis sont significatifs au seuil de $r = 0,6$ et $\alpha = 0,05$

Pour l'exploitation des données obtenues dans cette étude, le logiciel Canoco 4.5 a également été utilisé pour l'analyse en composantes principales (ACP), en se basant sur la relation qui existe entre les indicateurs de la fertilité des sols et la productivité.

Conclusion partielle

Les différentes méthodes utilisées sur le site de l'étude ont permis la réalisation de ce travail. La méthode de description des profils du sol est celle de l'approche de la base des ressources mondiales des sols (WRB) pour l'année 2014. La méthode de CDR de calculer le rendement potentiel des parcelles. La méthodologie utilisée sur le terrain a permis de collecter les données escomptées. Quant aux analyses de laboratoire à l'Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA), elles ont été réalisées selon des méthodes classiques, universellement reconnues. Des analyses statistiques, jugées nécessaires, ont été appliquées aux données obtenues pour, d'une part, déceler les différences entre les paramètres étudiés et, d'autre part, mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre ces variables. Les résultats de toute cette méthodologie sont exposés dans le prochain chapitre.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE VI : Résultats

CHAPITRE VII : Discussion

CHAPITRE VI : RESULTATS

Ce chapitre expose l'ensemble des résultats obtenus pour cette étude. Il comprend les caractéristiques floristiques des agrosystèmes, leur densité, ainsi que la perception des producteurs quant à leur utilité. Les caractéristiques physico-chimiques du sol ainsi que le potentiel impact des agrosystèmes à base de cacaoyers sur la productivité seront étudiés.

VI.1. Caractéristiques floristiques des agrosystèmes et leur valeurs d'usages dans les plantations cacaoyères

VI.1.1. Espèces utilisés par les populations

Le tableau VII présente les différentes espèces végétales identifiées dans les plantations de cacaoyers en fonction des agrosystèmes considérés. Au total 27 espèces regroupées en 17 familles ont été recensées au cours de l'étude. De façon générale, on note que certaines espèces végétales recensées colonisent ou sont présentes dans tous les agrosystèmes alors que certaines espèces végétales ne sont présentes que dans deux ou un seulement des systèmes. De façon plus explicite, on a des espèces appartenant à la famille des Euphorbiaceae, Sterculiaceae, Bombacaceae et des Anacardiaceae qui sont présentes dans les trois agrosystèmes considérés, notamment, l'agrosystème complexe (AGC), l'agrosystème mixte (AGM) et l'agrosystème plein soleil (PSOL) avec 19,23 P.c. des espèces végétales recensées. Les Meliaceae, Moraceae, Combretaceae et les Verbenaceae ont été plus représentatives dans les AGC et AGM avec plus de 26,92 P.c. des espèces végétales dans les mêmes proportions (26,92 P.c.) que les Lauraceae, Musaceae, Rutaceae, Caricaceae et les Sterculiaceae identifiées dans les AGM et PSOL. Les Apocynaceae et Anacardiaceae avec 7,69 P.c. des espèces sont dans les AGC et PSOL. De même les Myristicaceae, Moraceae et les Sterculiaceae ainsi que les Mimosaceae et les Invingiaceae sont observées dans les AGC et AGM seulement avec respectivement, 11,53 P.c. et 7,69 P.c. des espèces végétales. Cinq principales catégories d'utilisations ont été identifiées : le bois de chauffage, l'usage médicinal, l'usage alimentaire, les bois d'oeuvre et les autres usages (ornemental, piégeage, commerciale...).

En considérant la richesse floristique des espèces inventoriées, les espèces utilisées comme bois de chauffage sont au nombre de 12. Les plantes médicinales et alimentaires sont respectivement au nombre de 11 et 14 espèces. Les bois d'oeuvre sont représentés par 8 espèces dont les plus rencontrées sont : *Terminalia superba* (Combretaceae), *Milicia excelsa* (Moraceae) et *Triplochiton scleroxylon* (Sterculiaceae). Les espèces affectées à d'autres types

d'usages (ornemental, piégeage, commerciale...) sont représentées avec 14 espèces. Au niveau des localités enquêtées, Niamkey- Konankro enregistre la totalité des espèces (27 espèces) utilisées par les populations. Dans les placettes, la proportion des individus recensés varie suivant le type d'utilisation et la localité (Tableau VIII). Les espèces alimentaires sont les plus conservées dans les plantations quel que soit la localité. En considérant les organes des plantes, l'on note que ce sont les fruits, les jeunes feuilles (préparation de sauce) et les grains (condiment, extraction d'huile) ainsi que la sève (vin de palme) qui sont utilisés. Les plus fréquemment rencontrés sont *Musa paradisiaca* (Musaceae), *Elaeis guineensis* (Arecaceae), *Persea americana* (Lauraceae), *Citrus sinensis* (Rutaceae) et *Cola nitida* (Sterculiaceae,). Les proportions calculées varient entre 63,79 p. c. (Kimoukro) et 74,29 p. c. (Niamkey-Konankro).

Les espèces servant de bois de chauffage constituent le second type d'espèces les plus conservées par les producteurs. Niamkey-Konankro et Kimoukro enregistrent respectivement les proportions d'individus de 25,02 et 26,13 p. c. Les espèces médicinales viennent en quatrième position en termes d'abondance. Les proportions calculées vont de 14,01 p. c. (Kimoukro) à 19,12 p. c. (Niamkey-Konankro). Les espèces affectées à d'autres types d'usages ont une proportion globale de 24,86 p. c. Kimoukro et Niamkey-Konankro enregistrent les proportions moyennes avec respectivement 21,36 p. c. et 28,36 p. c. Les espèces utilisées comme bois d'oeuvre sont les moins conservées dans les plantations. Les proportions calculées varient entre 9,05 p. c. (Kimoukro) et 11,10 p. c. (Niamkey-Konankro).

Tableau VII : Espèces végétales associées dans la ccacaoculture dans la zone d'étude

Nom scientifique	Nom local ou courant	Famille	Type biologique	Aire de répartition	AGC	AGM	PSOL
<i>Khaya grandifoliola</i>	Acajou	Meliaceae	mP	GC	X	X	
<i>Pycnathus angolensis</i>	Adrin	Myristicaceae	mP	GC	X		
<i>Ricinodendron Heudelotii</i>	Akpi	Euphorbiaceae	mP	GC	X	X	X
<i>Milicia sp</i>	Alla	Moraceae	MP	GCW	X	X	
<i>Alstonia boonei</i>	Amien	Apocynaceae	MP	GC	X		X
<i>Persea americana</i>	Avocatier	Lauraceae	Mp	I		X	X
<i>Musa spp</i>	Bananier	Musaceae	G	I		X	X
<i>Citrus limon</i>	Citronnier	Rutaceae	Mp	I		X	X
<i>Cola nitida</i>	Colatier	Sterculiaceae	mP	GC	X	X	X
<i>Terminalia superba</i>	Fraké	Combretaceae	MP	GC	X	X	
<i>Terminalia ivorensis</i>	Framiré	Combretaceae	MP	GC	X	X	
<i>Albizia zygia</i>	Gôli kpakpa	Mimosaceae	mP	GC-SZ	X	X	
<i>Irvingia gabonensis</i>	Kaklou	Invingiaceae	MP	GC		X	
<i>Vitex sp</i>	Kanankpli yassoua	Verbenaceae	Mp	GC	X	X	
<i>Bombax buonopozense</i>	Kpouka	Bombacaceae	MP	GC	X	X	X
<i>Ficus mucoso</i>	Logblô	Moraceae	mP	GC	X	X	
<i>Entandrophragma angolense</i>	Louklou	Meliaceae	MP	GC	X	X	
<i>Mangifera indica</i>	Manguier	Anacardiaceae	mP	I	X		X
<i>Ceiba pentandra</i>	N'gnien	Bombacaceae	MP	GC-SZ	X	X	X
<i>Antiaris africana</i>	Offi djedje	Moraceae	mP	GC-SZ	X		
<i>Citrus sinensis</i>	Oranger	Rutaceae	Mp	I		X	X
<i>Elaeis guineensis</i>	Palmier à huile	Arecaceae	mP	GC	X	X	X
<i>Citrus grandis</i>	Pamplemousse	Rutaceae	Mp	I		X	X
<i>Carica papaya</i>	Papayer	Caricaceae	Mp	GC		X	X
<i>Triplochiton scleroxylon</i>	Samba	Sterculiaceae	MP	GC	X		
<i>Spondias mombin</i>	Trouman	Anacardiaceae	Mp	GC-SZ	X	X	X
<i>Cola gigantea</i>	Walê	Sterculiaceae	mP	GC-SZ		X	X

GC = espèce de la région Guinéo-congolaise ; GCW = espèce endémique à l'Afrique de l'ouest ; GC-SZ = espèce de la région guinéo-congolaise et soudano-zambézienne ; G = géophyte ; np = nanophanérophite de 0.25 à 2 m de hauteur ; mp = microphanérophyte de 2 à 8 m de hauteur ; mP = mésophanérophite de 8 à 32 de hauteur ; MP= mégaphanérophite de plus de 32 m de hauteur ; I = culture associée, PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Tableau VIII : Proportions des types d'utilisations des espèces de différentes localités.

Types d'usage	Niamkey-konankro	Kimoukro
Alimentaire	74,29	63,79
Médicinale	19,12	14,01
Bois de chauffage	25,02	26,13
Bois d'œuvre	11,10	9,05
Autres	28,36	21,36

VI.1.2 - Affinités chorologiques de plantes d'usages

Les espèces utilisées par les populations sont composées de 19 espèces forestières, et 08 espèces exotiques (Tableau IX). En considérant les différents types d'usages, l'on note que les espèces alimentaires sont caractérisées par une abondance de plantes exotiques (8 espèces) et forestières (05 espèces). Les espèces de la catégorie autres usages sont constituées de plantes forestières et de l'ensemble des plantes exotiques. Pour les trois derniers types d'usages, ils restent dominés par les espèces forestières. On observe que l'ensemble des espèces exotiques sont présents sur les agrosystèmes mixtes et de plein soleil. Ces espèces représentent l'essentiel de la catégorie autre usage qui est dominée par la commercialisation des produits issus de ces plantes. La catégorie des espèces médicinales sont représentées dans des proportions similaires par les espèces forestières et exotiques.

Tableau IX : Variation des types chorologiques des espèces utilisées par les populations

Variables	Type d'espèces	Type d'agrosystème	Alimentaire	Médicinale	Bois de chauffage	Bois d'œuvre	Autres	Total
Richesse floristique	Forestière	PSOL	5	1	1	0	3	7
		AGC	5	3	6	6	6	17
		AGM	6	3	5	4	7	16
	Exotique	PSOL	8	4	2	0	8	8
		AGC	3	1	1	0	3	3
		AGM	8	4	2	0	8	8

VI.2 - Perception du rôle des espèces associées dans les plantations cacaoyères

Toutes les personnes interrogées dans les deux localités justifient la conservation des espèces dans leurs plantations par un besoin d'ombrage, pour la protection des jeunes plants lors de la

création de la plantation. Cependant, le maintien ou non de l'espèce lors du développement des cacaoyers est lié à quatre principaux facteurs : leur incidence sur la production des cacaoyers, le sol, la croissance des cacaoyers et la satisfaction des besoins du producteur.

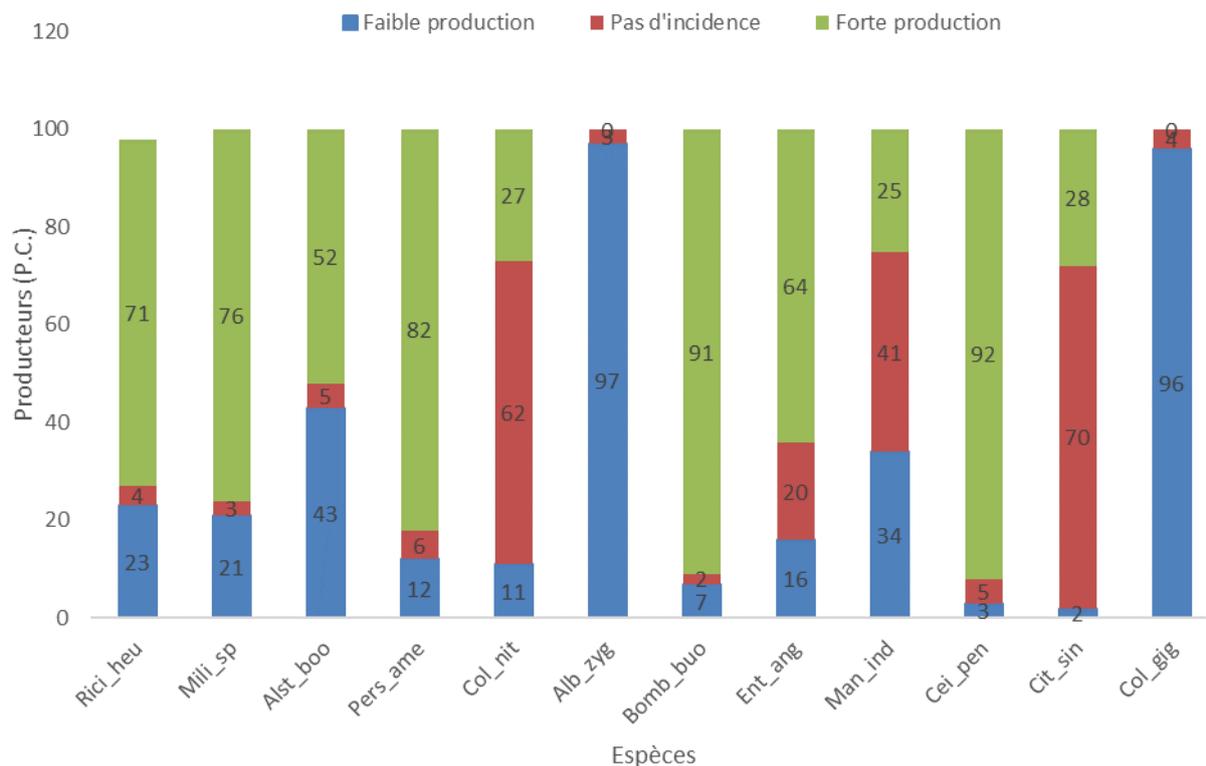
L'ensemble des plantes utilisées par les populations ont été citées comme pouvant influencer leur stratégie dans la gestion de leur plantation. Il s'agit particulièrement de *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), *Bombax buonopozense* (Bombacaceae), de *Milicia sp* (Moraceae), de *Cola nitida* (Sterculiaceae), de *Persea americana* (Lauraceae), d'*Elaeis guineensis* (Arecaceae) et de *Citrus sinensis* (Rutaceae)

VI.2.1 - Incidence des espèces sur la production des cacaoyers

Les enquêtes permettent de distinguer trois groupes d'espèces conservées ou parfois éliminées pour leur incidence sur la production des cacaoyers (Figure 21). Le premier groupe rassemble 12 espèces végétales perçues par plus de 70 p. c. des producteurs comme ayant une incidence négative sur la production. Parmi elles, cinq espèces végétales sont régulièrement citées par des producteurs interrogés (plus de 30 p. c.). Il s'agit de *Cola gigantea* (Sterculiaceae), *Albizia zygia* (Mimosaceae), *Spondias mombin* (Anacardiaceae), *Ficus mucoso* (Moraceae), et *Triplochiton scleroxylon* (Sterculiaceae).

Le second groupe rassemble 17 espèces végétales perçues par plus de 60 p. c. des producteurs comme favorisant la production des cacaoyers. Six espèces sont régulièrement citées par les paysans. Ce sont *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), *Alstonia boonei* (Apocynaceae), *Entandrophrama angolense* (Meliaceae), *Ricinodendron Heudelotii* (Euphorbiaceae), *Persea americana* (Lauraceae) et *Milicia sp.* (Moraceae). Le troisième groupe rassemble 14 espèces citées comme n'ayant aucune incidence sur la production de cacaoyers. Elles joueraient d'autres rôles (alimentaire, médicinale, commerciale...). Il s'agit pour l'essentiel d'espèces exotiques telles que *Persea americana* (Lauraceae) ou *Citrus sinensis* (Rutaceae) ou d'espèces forestières fruitières comme *Cola nitida* (Sterculiaceae).

La dernière catégorie d'espèces rassemble les espèces pour lesquelles les avis restent partagés dans la population interrogée. Elles sont représentées par sept espèces végétales dont *Mangifera indica* (Anacardiaceae), *Elaeis guineensis* (Arecaceae), *Alstonia boonei* (Apocynaceae) et *Terminalia superba* (Combretaceae).



Cola_gig : Cola gigantea ; Alb_zi: Albizia zygia; Cieb_pent : Ceiba pentandra ; Milic_sp : Milicia sp ; Perc_ame : Persea americana ; Cola_nit : Cola nitida ; Citr_sin : Citrus sinensis ; Mang_ind : Mangifera indica ; Bomb_buo : Bombax buonopozense; Alst_boo : Alstonia boonei ; Ent_ang : Entandrophragma angolense

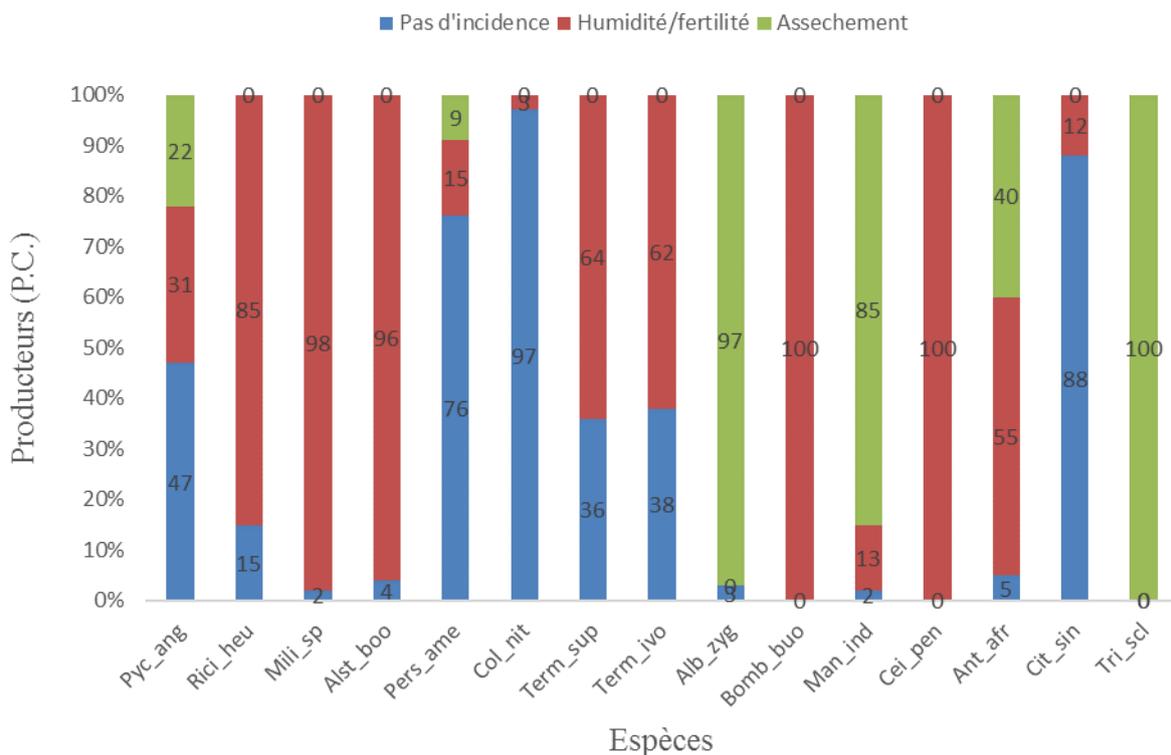
Figure 21 : Perception des producteurs sur la question de l'incidence des espèces associées sur la production des cacaoyers

VI. 2.2 - Incidence des espèces sur le sol

Dans les plantations, les producteurs décrivent 10 espèces végétales ayant une action pouvant favoriser le maintien de la fertilité et/ou l'humidité du sol, surtout pendant la saison sèche (Figure 22). Six espèces d'entre elles font l'unanimité chez les producteurs. L'on peut citer *Ceiba pentandra* (Bombacaceae) et *Alstonia boonei* (Apocynaceae), *Bombax buonopozense* (Bombacaceae), *Milicia* sp. (Moraceae), *Entandrophragma angolense* (Meliaceae) et *Terminalia superba* (Combretaceae).

Une seconde catégorie d'espèces est associée à l'assèchement des sols des plantations cacaoyères. Il s'agit de 12 espèces végétales parmi lesquelles 04 espèces sont principalement reconnues par les producteurs. L'on peut citer *Mangifera indica* (Anacardiaceae), *Cola gigantea* (Sterculiaceae), *Albizia zygia* (Mimosaceae), et *Triplochiton scleroxylon* (Sterculiaceae).

Une troisième catégorie regroupe 12 espèces végétales perçues comme n'ayant aucune incidence sur les sols des plantations pendant la saison sèche. Quatre d'entre elles font l'unanimité chez plus de 60 p. c. des paysans interrogés. Il s'agit de *Persea americana* (Lauraceae), *Citrus sinensis* (Rutaceae), et *Cola nitida* (Sterculiaceae). L'on note enfin une dernière catégorie d'espèces pour lesquelles les avis restent partagés quant à leur possible incidence sur le sol des cacaoyères. Elles sont représentées par trois espèces que sont : *Antiaris africana* (Moraceae), *Pycnanthus angolensis* (Myristicaceae), *Albizia ferruginea* (Mimosaceae).



Pyc_ang : *Pycnanthus angolensis* ; *Cola_gig* : *Cola gigantea* ; *Alb_zi* : *Albizia zygia* ; *Cieb_pent* : *Ceiba pentandra* ; *Milic_sp* : *Milicia sp* ; *Perc_ame* : *Persea americana* ; *Cola_nit* : *Cola nitida* ; *Citr_sin* : *Citrus sinensis* ; *Mang_ind* : *Mangifera indica* ; *Bomb_buo* : *Bombax buonopozense* ; *Alst_boo* : *Alstonia boonei* ; *Ent_ang* : *Entandrophragma angolense* ; *Tri_scl* : *Triplochiton scleroxylon* ; *Term_sup* : *Terminalia superba* ; *Term_ivo* : *Terminalia ivorensis* ; *Ant_afr* : *Antiaris africana*

Figure 22 : Perception des producteurs sur la question de l'incidence des espèces associées sur le sol.

VI.2.3 - Incidence des espèces sur le développement des cacaoyers

Dans l'ensemble des espèces recensées, 19 sont considérées par les producteurs comme pouvant influencer la croissance ou le développement des cacaoyers à travers des compétitions et par l'hébergement d'espèces parasites ou d'animaux. Il a été identifié six

espèces végétales perçues comme entrant en compétition avec le cacaoyer. Il s'agit principalement de *Elaeis guineensis* (Arecaceae) dont la forte densité dans les plantations pourrait entraîner la mort des cacaoyers. On peut citer également *Mangifera indica* (Anacardiaceae) et *Cola gigantea* (Sterculiaceae) pour leur ombrage excessif. Cinq autres espèces sont considérées par les paysans comme des hôtes de bioagresseurs. L'on peut citer *Alstonia boonei* (Apocynaceae) et *Elaeis guineensis* (Arecaceae) hôte des écureuils ; *Mangifera indica* (Anacardiaceae) et *Spondias mombin* (Anacardiaceae) pour les mirides. Cinq espèces sont considérées comme hôtes des Loranthaceae dans les plantations. Ce sont *Cola nitida* (Sterculiaceae), *Citrus sinensis* (Rutaceae), *Spondias mombin* (Anacardiaceae), *Persea americana* (Lauraceae) et *Alstonia boonei* (Apocynaceae).

VI.3. Densité des espèces végétales associée aux cacaoyers dans les agrosystèmes

Le tableau X montre les valeurs moyennes de la densité des cacaoyers et des espèces végétales en fonction des agrosystèmes sur une aire cacaoyère à l'hectare.

Il existe un effet significatif ($P < 0,05$) des agrosystèmes sur la densité des cacaoyers et la densité des espèces. En effet, la densité des cacaoyers en PSOL a été plus élevée que celle des AGM et AGC, respectivement, 20 et 30 P.c. Egalement, les agrosystèmes ont significativement influencé la densité des espèces végétales. Ceci s'est traduit par une faible densité des espèces végétales dans les PSOL (55 arbres à l'hectare). Toutefois, la densité des arbres est triplée dans les AGM et quadruplée avec les AGC.

Tableau X : Densité de cacaoyers et des espèces végétales associées en fonction des agrosystèmes dans la zone d'étude.

Agrosystèmes	Densité des espèces végétales dans les agrosystèmes	
	Densité des cacaoyers	Densité des espèces végétales associées aux cacaoyers
PSOL	1456, 67a	55, 00c
AGM	1206, 67b	155, 33b
AGC	1120, 00b	224, 33a
Moy. Gle	1261, 11	144, 88
Coéf.Var (p.c.)	7, 92	19, 99
P > F	< 0, 019	< 0, 001

Les valeurs dans la même colonne suivie par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$

VI.4. Caractéristiques morphologiques des sols des agrosystèmes de la zone d'étude

VI.4.1. Profils du sol

La figure 23 présente des profils du sol réalisés à différents niveaux de la toposéquence : haut de versant, mi-versant et bas de versant. On a observé que les profils ont globalement quatre (04) couches d'épaisseurs variables avec des caractéristiques morphologiques peu variables. Ces différents profils ont permis de distinguer globalement et tout au long de la toposéquence, des sols de types Cambisols, avec particulièrement, en haut de versant et à mi-versant, des Cambisols et au bas de versant, des Cambisols pseudogleyic du fait des phénomènes d'hydromorphie différemment observés.

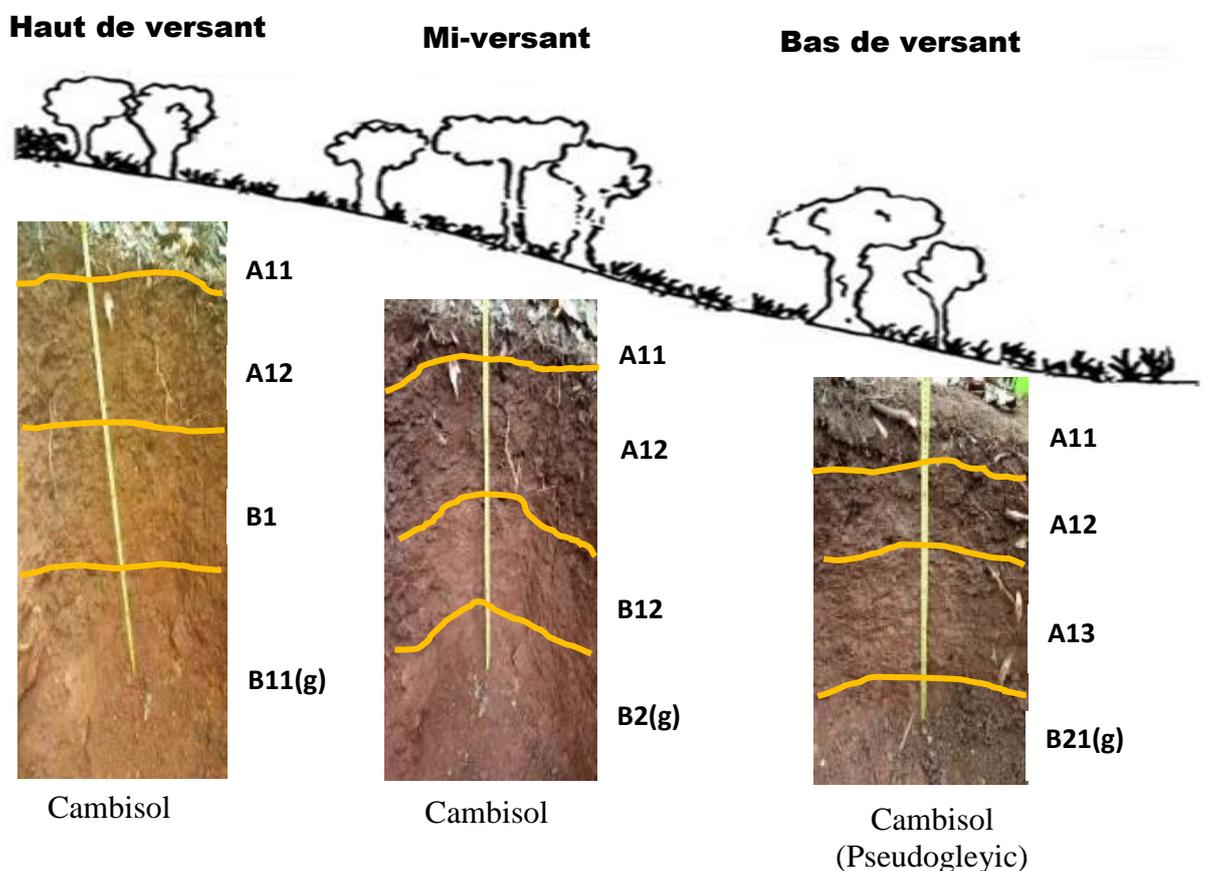


Figure 23 : Profils du sol du haut-versant au bas-versant d'un interfluve de la zone d'étude

VI.4.2. Caractéristiques morphologiques des profils des sols observés

Les caractéristiques morphologiques des profils des sols ont été décrites dans le tableau XI. Les différents profils observés présentent morphologiquement de faibles variations entre les sols du haut de versant, mi-versant et du bas versant de la toposéquence.

Ces variations sont certes peu importantes, mais s'observent sur quelques traits caractéristiques bien distincts.

Au niveau du haut de versant, un sol de type Cambisol avec quatre principales couches allant de A₁₁ à B₁₁ d'épaisseurs variables (0-41 cm), a été observé :

- La couche A₁₂ (10-23 cm) qui suit est de couleur brun foncé (10 YR 4/6), peu humifère, poreux et peu cohérent contenant de nombreuses racines millimétriques à orientation préférentielle subcouchetale. La transition est diffuse et la limite régulière. La texture est limono-sablo-argileuse avec une structure massive à débit polyédrique ;

- La couche B₁ (23-41 cm) est brun rougeâtre ; brun (10 YR 5/6), rougeâtre (2,5 YR 4/6). Il est peu poreux et cohérent avec une texture sablo-argileuse contenant quelques racines. La structure est polyédrique subanguleux. Cette couche est drainée et de transition diffuse et irrégulière ;

- la couche B₁₁ (41-73 cm) est plus en profondeur, en contact avec la roche mère en cours d'altération et de couleur brun rouille ; brun (10 YR 5/6), rouille (2,5 YR 4/6). Il est compact et cohérent, de structure massive à débit polyédrique présentant de rares racines.

A mi-versant un Cambisol de quatre couches a été également décrit. On note de façon générale que ces différentes couches possèdent les mêmes caractéristiques morphologiques que ceux du haut de versant, à la seule différence qu'ils sont un peu plus épais et de couleurs variables.

- La couche superficielle A₁₁ a une épaisseur de 12 cm et de couleur brun foncé (10 YR 4/4). Il est humifère, très poreux et meuble, contient de nombreuses racines millimétriques à orientation préférentielle subcouchetale. La transition est diffuse et la limite régulière. La texture est limono-sablo-argileuse avec une structure grumeleuse ;

- La couche A₁₂ d'épaisseur 14 cm, est de couleur brun foncé (10YR 6/6). Il est peu humifère, poreux et peu cohérent, contient de nombreuses racines millimétriques à orientation préférentielle subcouchetale. La transition est diffuse et la limite régulière. La texture est limono-sablo-argileuse avec une structure massive à débit polyédrique ;

- La couche B₁ d'épaisseur 20 cm, est de couleur brun rouille ; brun (10 YR 7/6), rouille 2,5 (YR 5/6). Il n'est pas humifère, peu poreux et cohérent, contient peu de racines. La texture est sablo-argileuse avec une structure massive à débit polyédrique subanguleux.

- La couche B₂ plus profond, d'épaisseur 42 cm, a une couleur bariolée ; brun (10 YR 5/8), jaune ocre (10 YR 7/6). On y observe une absence d'humus et de porosité. Il est cohérent et ne contient que de rares racines.

Au bas de versant, les couches sont des sols bruns, affectés des phénomènes d'hydromorphie et donc décrit comme un cambisol pseudogleyic.

- La couche superficielle A₁₁ a une profondeur de 15 cm et de couleur brun foncé (7,5 YR 3/4). Il est humifère, très poreux et meuble, contient de nombreuses racines millimétriques à orientation préférentielle subcouchetale. La transition est diffuse et la limite régulière. La texture est limono-sablo-argileuse avec une structure grumeleuse ;

- La couche A₁₂ d'épaisseur 18 cm, est de couleur brun foncé (7,5YR 4/6). Il est peu humifère, poreux et peu cohérent, contient de nombreuses racines millimétriques à orientation préférentielle subcouchetale. La transition est diffuse et la limite régulière. La texture est limono-sablo-argileuse avec une structure massive à débit polyédrique ;

- La couche A₁₃ d'épaisseur 25 cm, est de couleur brun foncée ; brun (10 YR 5/6). Il est peu humifère, peu poreux et cohérent, contient quelques racines. La texture est sablo-argileuse avec une structure massive à débit polyédrique subanguleux.

- La couche B₂ plus profond, d'épaisseur 36 cm, a une couleur bariolée ; brun (10 YR 7/8), jaune ocre (10 YR 7/6). On y observe une absence d'humus et de porosité. Il est cohérent et ne contient que de rares racines. Les couches sont beaucoup plus épaisses que ceux des sols du sommet et ceux à mi versant.

Ce sont des sols brunifiés qui varient très peu quel que soit le niveau de la toposéquence. Cependant, les couches du bas-versant sont marquées en profondeur par des traces d'hydromorphie. Ce sont généralement des cambisols selon la classification mondiale (BRM).

Tableau XI : Caractéristique morpho-pédologiques du profil de sol de la zone d'étude

Positions	Couches	Epaisseur	Couleur	MO	Porosité	Cohésion	Racines	Texture	Structure
Haut Versant	A11	0-10 cm	Brun foncé, 10 YR 4/4	Humifère	Très Poreux	Meuble	Assez nombreuses racines	LSA	Grumeleuse
	A12	10-23 cm	Brun foncé, 10 YR 4/6	Peu Humifère	Poreux	Peu Cohérent	Nombreuses racines	SAL	Polyédrique
	B1	23-41 cm	Brun 10 YR 5/6 Rougeâtre 2,5 YR 5/6	Pas Humifère	Peu Poreux	Cohérent	Quelques racines	SA	Polyédrique subanguleux
	B11	41-73 cm	Brun 10 YR 5/6 Rouille 2,5 YR 4/6	Pas Humifère	Pas Poreux	Cohérent	Rare racines	RM	Massive
Mi Versant	A11	0-12 cm	Brun foncé 10 YR 4/4	Humifère	Très Poreux	Meuble	Assez nombreuses racines	LSA	Grumeleuse
	A12	12-26 cm	Brun foncé 10 YR 6/6	Humifère	Poreux	Peu Cohérent	Nombreuses racines	SAL	polyédrique
	B12	26-46 cm	Brun 10 YR 7/6 Rouille 2,5 YR 5/6	Pas Humifère	Peu Poreux	Cohérent	Quelques racines	SA	Polyédrique subanguleux
	B2	46-88 cm	Brun 10 YR 5/8 Jaune ocre, 10 YR 7/6	Pas Humifère	Pas Poreux	Cohérent	Rare racines	RM	Massive
Bas Versant	A11	0-15 cm	Brun foncé 7,5 YR 3/4	Humifère	Très Poreux	Meuble	Assez nombreuses racines	LSA	Grumeleuse
	A12	15-33 cm	Brun foncé 7,5 YR 4/6	Peu Humifère	Poreux	Peu Cohérent	Nombreuses racines	SAL	Polyédrique
	A13	33-58 cm	Brun foncé 10 YR 5/6	Peu Humifère	Peu Poreux	Cohérent	Quelques racines	SA	Polyédrique subanguleux
	B21	58-94 cm	Brun 10 YR 7/8 Jaune ocre, 10 YR 7/6	Pas Humifère	Pas Poreux	Cohérent	Rare racines	RM	Massive

MO= matière organique ; LSA= limono-sablo-argileuse ; SAL=sablo-argilo-limoneuse ; SA= sablo-argileuse ; RM= roche mère

Outre ces caractéristiques morphologiques similaires, des variations notables sur d'autres caractéristiques physiques telles que l'humidité, l'activité biologique et le niveau de dégradation dans les différents agrosystèmes ont été observées. On note que l'humidité a été très bonne dans les AGC, bonne dans les AGM et moyenne dans les PSOL. Quant à l'activité biologique, elle a été moyenne dans les PSOL, élevée dans les AGM et très élevée dans les AGC. Les PSOL ont présenté un niveau de dégradation de sol moyen comparativement aux AGM et AGC. (Tableau XII).

Tableau XII : Caractérisation de différents agroforêts par rapport à l'humidité, l'activité biologique et le niveau de dégradation du sol

	PSOL	AGM	AGC
Humidité	Moyenne	Bonne	Très bonne
Activité biologique	Moyenne	Elévée	Très élevée
Niveau de dégradation de sol	Moyen	Faible	Faible

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

VI.4.3. Caractéristiques physico-chimiques du sol identifiés

VI.4.3.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques déterminées ont concerné la granulométrie des sols sous cacaoyers des différents agrosystèmes et sur leurs différentes couches 0-20 cm et 20-40 cm. On observe une différence significative entre les caractéristiques des sols des agrosystèmes de plein soleil (PSOL), mixte (AGM) et complexe (AGC), notamment, au niveau du limon fin, limon total et le sable grossier. De façon plus spécifique, une valeur moyenne du limon fin statistiquement plus élevée (41,82 p.c.) a été enregistrée en PSOL comparativement pour AGC (34,68 p.c.) et AGM (30,95 p.c.) par ordre décroissant. Une valeur moyenne similaire et dans le même ordre a été relevée pour le limon total. Par contre, pour ce qui concerne le sable grossier, la valeur la plus élevée a été notée en AGM (15,87p.c.) et la plus faible en PSOL (8,95 p.c.) avec une valeur statistiquement intermédiaire en AGC (11,59 p.c.).

En considérant les valeurs moyennes des différents paramètres par couches des différents agrosystèmes, on note globalement qu'il n'y a eu aucune différence statistiquement significative entre les valeurs moyennes des paramètres granulométriques déterminés par agrosystèmes quelle que soit la profondeur considérée, exceptée pour le limon grossier en

agrosystème de plein soleil (PSOL) qui affiche des valeurs significatives pour La couche 0-20 cm (10,22 p.c.) qui est le double de celle de La couche 20-40cm (5,42 P.c.).

En ce qui concerne la texture des différents couches, et partant, la texture globale des sols des agrosystèmes à base de cacaoyers, on note qu'il s'agit de sols à texture limono-sablo-argileuse si l'on se réfère aux pourcentages de l'argile, du limon et du sable total quel qu'en soit l'agrosystème (PSOL, AGM ou AGC) et les couches (0-20 cm ou 20 cm-40 cm) considérées (Tableau XIII).

Tableau XIII : Granulométrie des sols sous cacaoyer de la zone d'étude

Paramètres	Granulométrie des sols en pourcentage								
	PSOL			AGM			AGC		
	Sol Global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm
Argile	17,39 A	14,25 a	20,50 a	29,65 A	29,03 a	30,26 a	24,23 A	21,77 a	26,67 a
Limon fin	41,82 A	40,65 a	43,00 a	30,95 B	32,00 a	29,90 a	34,68 AB	33,87 a	35,50 a
Limon grossier	7,82 A	10,22 a	5,42 b	7,22 A	6,12 a	8,32 a	8,73 A	8,90 a	8,57 a
Limon total	49,64 A	50,87 a	48,42 a	38,17 B	38,12 a	38,22 a	43,41 AB	42,77 a	44,07 a
Argile + Limon	67,02 A	69,54 a	67,62 a	67,81 A	67,26 a	69,10 a	67,63 A	64,54 a	70,73 a
Sable fin	24,02 A	24,77 a	23,27 a	16,31 A	18,00 a	14,62 a	20,77 A	24,36 a	17,18 a
Sable grossier	8,95 B	10,10 a	7,80 a	15,87 A	14,85 a	16,90 a	11,59 AB	11,10 a	12,08 a
Sable total	32,97 A	34,87 a	31,07 a	32,18 A	32,85 a	31,52 a	32,36 A	35,46 a	29,26 a
Texture	LSA	LSA	LSA	LSA	LSA	LSA	LSA	LSA	LSA

Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement
LSA= Limono-sablo-argileuse

VI.4.3.2. Caractéristiques chimiques

a. pH du sol

La comparaison des valeurs moyennes des pH (eau) et pH (kcl) indique qu'il n'y a pas eu de différence statistiquement significative entre les pH (eau) et pH (kcl) des sols des différents agrosystèmes. Par ailleurs, les valeurs des pH des sols quelles que soit l'agrosystème et le niveau de la profondeur considéré varient entre 6,70 et 7,00 pour l'acidité réelle du sol, déterminée par le pH (eau) et entre 5,65 et 6,37 pour l'acidité potentielle, déterminée par le pH (kcl). Ces valeurs de pH globalement inférieures à la neutralité ((pH (eau) = 7) montrent que ces sols sous cacaoyer sont proches de la neutralité. La différence des moyennes Δ pH

entre pH (eau) et pH (kcl) qui dénote de l'acidité potentielle du sol est significative statistiquement par agrosystème et par niveau d'couche. L'écart ΔpH variant entre 0,50 et 1,13 indique une variation d'acidité faible ($\Delta\text{pH} = 0,50$) au niveau de La couche 0-20 cm et une acidité potentielle élevée ($\Delta\text{pH} > 1$) au niveau de La couche 20-40 cm pour tous les sols sous cacaoyers des agrosystèmes (tableau XIV).

Tableau XIV : Acidité des sols sous cacaoyers de la zone d'étude

Paramètres	pH du sol									Normes*
	PSOL			AGM			AGC			
	Sol global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	Sol global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	Sol global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	
pH (eau)	6,70A	6,70a	6,70a	6,80A	6,85a	6,75a	6,90A	7,00a	6,80a	6-7
pH (kcl)	5,92A	6,20a	5,65a	5,90A	6,20a	5,70a	6,02A	6,37a	5,67a	5-6
ΔpH	0,77A	0,50b	1,05a	0,85A	0,65b	1,05a	0,88A	0,63b	1,13a	0,5-1

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement

*Valeurs normatives de références (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse, 2004 ; Doucet, 2006 ; Koko *et al*, 2008)

b. Taux de matière organique et Phosphore assimilable du sol étudié

De façon générale, aucune différence significative n'a été observée entre les agrosystèmes pour le taux de matières organiques et la teneur en phosphore. Par ailleurs, on note une variabilité significative des moyennes des taux de la matière organique et de la teneur moyenne en phosphore assimilable en agrosystème mixte (AGM) respectivement, dans les couches 0-20 cm et 20-40 cm. De façon plus explicite, les taux respectifs de la matière organique (MO =19,90 p.c.) ; du carbone (Carb =11,52 p.c.) ; de l'azote total (Nt =0,87 p.c.) et de la teneur en phosphore assimilable (Pass = 107,25 ppm) sont moyennement élevés au niveau de la couche superficielle 0-20 cm qu'au niveau de la couche 20-40 cm dans l'agrosystème mixte. En revanche, on note une bonne minéralisation de la MO par endroits (C/N comprise entre 9,69 et 12,77) quel que soit la couche considérée. Pour ce qui concerne les agrosystèmes de plein soleil (PSOL) et Complexe (AGC), aucune différence significative des moyennes n'a été observée quel que soit le niveau de la couche considérée. En se référant aux valeurs normatives de ces différents paramètres, on déduit que le taux de la matière organique, du carbone, de l'azote total et du phosphore assimilable sont respectivement élevés bien qu'ils ne soient pas statistiquement différents. Cependant, il convient d'indiquer que les

valeurs moyennes les plus élevées ont été notées avec l'agrosystème mixte (AGM) pour ces paramètres (tableau XV).

Tableau XV : Taux de matière organique et de phosphore assimilable des sols étudiés

Paramètres	Matière organique du sol									Normes *
	PSOL			AGM			AGC			
	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	
M.org. (p.c.)	12,77 A	15,86 a	9,69 a	18,89A	19,90 a	17,88 b	15,54 A	19,23 a	11,86 a	3,6-6,5
Carb (p.c.)	7,43A	9,22 a	5,63 a	10,98A	11,52 a	10,37 b	9,04A	11,18 a	6,89 a	6,2-11,2
Ntotal (p.c.)	0,57A	0,71 a	0,43 a	0,81A	0,87 a	0,75 b	0,67A	0,83 a	0,51 a	0,1-0,15
C/N	12,45 A	12,91 a	11,99 a	13,54A	13,23 b	13,86 a	13,35 A	13,46 a	13,24a	11-15
Pass (ppm)	116,70 A	103,45 a	129,95 a	105,20 A	107,25 a	99,15 b	126,18 A	101,43 a	150,93 a	50-100

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement

*Valeurs normatives de références (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse, 2004 ; Doucet, 2006 ; Koko et al., 2008)

c. Cations échangeables et capacité d'échange cationique des sols étudiés

On note qu'aucune différence significative des valeurs moyennes des teneurs des cations échangeables n'est observée entre les différents agrosystèmes d'une part et d'autre part sur les couches 0-20 cm et 20-40 cm quel que soit l'agrosystème, excepté pour le magnésium qui a affiché des valeurs moyennes significatives particulièrement en agrosystèmes mixte et plein soleil sur les couches considérés. Par ailleurs, la comparaison des valeurs moyennes des teneurs en magnésium indique une teneur plus élevée dans la couche 0-20 cm que dans la couche 20-40 cm. En outre, la somme des cations échangeables indique des valeurs moyennes significatives ($P < 0,05$) en agrosystème mixte (AGM) sur La couche 0-20 cm et 20-40 cm avec une valeur moyenne plus élevée dans La couche 0-20 cm. De même, la CEC n'a affiché aucune valeur moyenne significative que pour l'agrosystème de plein soleil. La CEC a eu une valeur moyenne plus élevée dans la couche 0-20 cm que dans la couche 20-40 cm. On note aussi que de façon globale, les valeurs moyennes les plus élevées ont concerné l'agrosystème mixte (AGM) bien que statistiquement aucune différence notable n'est observée entre ces paramètres. La comparaison dans l'ensemble des teneurs moyennes des cations échangeables

par rapport à la norme montre bien des teneurs qui vont de satisfaisant à plus élevé (Tableau XVI).

Tableau XVI : Cations échangeables et capacité d'échange cationique des sols étudiés

Paramètres ($\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cations échangeables et capacité d'échange cationique									Normes *
	PSOL			AGM			AGC			
	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	
Ca	5,22A	4,93a	5,51a	6,01A	6,31a	5,14a	5,60A	6,41a	4,79a	5-8
Mg	2,51A	2,96a	2,07b	3,40A	3,87a	2,92b	2,83A	3,37a	2,28a	1,5-3
K	0,08A	0,09a	0,07a	0,09A	0,11a	0,07a	0,09A	0,11a	0,08a	0,15-0,25
Na	0,15A	0,18a	0,11a	0,11A	0,13a	0,10a	0,12A	0,13a	0,11a	0,3-0,7
S	7,96A	8,17a	7,75a	9,62A	10,43a	8,81b	8,64A	10,02a	7,27a	7,5-15
CEC	25,45A	28,00a	22,90b	28,55A	30,60a	26,50a	25,93A	23,53a	25,33a	10-20
V (p.c.)	31,66A	29,37a	33,94a	33,70A	34,17a	33,23a	33,24A	38,30a	28,17a	60-90

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement

*Valeurs normatives de références (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse, 2004 ; Doucet, 2006 ; Koko *et al.*, 2008)

d. Taux de saturation par bases échangeables sur le complexe absorbant des sols agrosystémiques étudiés

A l'analyse, aucune différence significative des valeurs moyennes des taux de saturation par bases échangeables sur le complexe absorbant n'est observée aussi bien entre les différents agrosystèmes que par les couches 0-20 cm et 20-40 cm, excepté pour le magnésium qui a affiché des valeurs moyennes significatives particulièrement en agrosystèmes mixte et plein soleil sur les couches considérées respectivement 0-20 cm = 12,68 p.c. et 20-40 cm = 10,98 p.c. en AGM ; 0-20 cm = 10,57 p.c. et 20-40 cm = 9,03 p.c. en PSOL. Par ailleurs, la comparaison des valeurs moyennes des taux de saturation en magnésium indique un taux plus élevé dans la couche 0-20 cm que dans la couche 20-40 cm en AGM tout comme en PSOL. On note aussi la comparaison des taux moyens de saturation par bases échangeables sur le complexe absorbant des sols à la valeur normative montre des taux de saturation en calcium- Ca^{2+} et en potassium- K^+ respectivement faibles ($\text{Ca}^{2+} < 60$ et $\text{K}^+ < 2,5$) alors que ceux du magnésium- Mg^{2+} et sodium- Na^+ sont satisfaits ($\text{Mg}^{2+} < 10$ et $\text{Na}^+ < 1$) (Tableau XVII).

Tableau XVII : Taux de saturation des bases échangeables sur le complexe absorbant des sols étudiés

Nutriments (p.c.)	Cations échangeables et capacité d'échange cationique									Normes *
	PSOL			AGM			AGC			
	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	Sol global	Couche 0 -20 cm	Couche 20 -40 cm	
Ca ²⁺	20,92A	17,74a	24,09a	21,12A	20,64a	21,59a	21,65A	24,46a	18,74a	60-70
Mg ²⁺	9,80A	10,57a	9,03b	11,84A	12,68a	10,98b	10,72A	12,81a	8,63a	10-12
K ⁺	0,32A	0,33a	0,30a	0,32A	0,38a	0,27a	0,38A	0,42a	0,34a	2,5-3,5
Na ⁺	0,57A	0,66a	0,48a	0,41A	0,44a	0,38a	0,48A	0,50a	0,46a	< 1

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement

*Valeurs normatives de références (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse, 2004 ; Doucet, 2006 ; Kokoet al, 2008)

e. Ratio d'équilibre entre les cations des sols étudiés

Le tableau XVIII présente les ratios d'équilibre entre les cations des sols étudiés particulièrement entre les cations Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺.

Tableau XVIII : Ratio d'équilibre entre les cations Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺ (cmol.kg⁻¹) des sols étudiés

Nutriments	Ratio d'équilibre entre les cations									Normes *
	PSOL			AGM			AGC			
	Sol global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	Sol global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	Global	Couche 0-20 cm	Couche 20-40 cm	
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	2,07A	1,67b	2,66a	1,76A	1,63b	1,76a	1,98A	1,90a	2,10a	2-9
K ⁺ /Mg ²⁺	0,03A	0,03a	0,03a	0,03A	0,03a	0,02a	0,07A	0,03a	0,04a	0,05-0,1
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ /K	96,62A	37,82a	35,08a	43,78A	41,49a	46,85a	37,04A	37,05a	33,29a	12-15

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe Les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$ sur une ligne pour les majuscules entre agrosystème et pour les minuscules entre couches d'un agrosystème respectivement

*Valeurs normatives de références (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse, 2004 ; Doucet, 2006 ; Koko et al., 2008)

Les valeurs moyennes des ratios d'équilibre entre les cations ne présentent pas de différence significative entre les agrosystèmes d'une part et d'autre part entre les couches 0-20 cm et 20-40 cm quel que soit l'agrosystème. Cependant, pour le rapport Ca²⁺/Mg²⁺, on note des valeurs moyennes significatives. Ces valeurs sont de 1,63 et 1,76 pour les couches 0-20 cm et 20-40

cm respectivement dans l'agrosystème mixte et de 1,67 et 2,66 pour les mêmes couches en plein soleil. La comparaison des ratios moyens d'équilibre des cations des sols à la valeur normative dans le tableau montre que :

Le ratio ($\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 2$) est faible tandis que le ratio ($\text{K}^+ / \text{Mg}^{2+} < 0,05$) est inférieur à la norme dans l'ensemble des agrosystèmes. Celui du ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{K}^+ > 15$) est élevé.

f. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques selon les sols agrosystémiques étudiés

▪ Pour l'agrosystème de plein soleil

Le tableau XIX présente les valeurs de corrélations globales établies entre les paramètres physico-chimiques au niveau du sol sur l'agrosystème de plein soleil.

On observe généralement que, les corrélations entre les paramètres physico-chimiques sont tantôt significatives et négatives, tantôt significatives et positives. Explicitement, on note des valeurs de corrélations significativement positives ($R = 0,80$; $P < 0,05$) entre les paramètres chimiques, notamment, le pH (eau), le pH (kcl), la matière organique, le carbone, l'azote total, le rapport C/N, le potassium, la somme des cations échangeables et la CEC.

Un résultat de corrélation similaire a été obtenu entre les paramètres chimiques et la granulométrie (limon fin, limon grossier et limon total). En revanche, des valeurs de corrélation significatives et négatives ($R = -0,80$; $P < 0,05$) ont été enregistrées entre ces mêmes paramètres chimiques et l'argile. En ce qui concerne les relations entre les paramètres physiques à travers la granulométrie, une corrélation significative et positive a été notée entre le limon total et le limon fin d'une part et d'autre part entre l'argile + le limon et l'argile, alors que le limon fin et l'argile + le limon, de même que l'argile + le limon affiche des valeurs de corrélation significatives et négatives respectivement avec l'argile, le limon fin et le limon total.

En considérant les corrélations établies entre les paramètres physico-chimiques des différents niveaux des couches (0-20 cm et 20-40 cm) respectivement présentées dans les tableaux XX et XXI ci-dessous, on note qu'il y a une variabilité de corrélations significatives de même sens ($R = 0,80$; $P < 0,05$) ou de sens contraire ($R = -0,80$; $P < 0,05$) entre les paramètres physico-chimiques, aussi bien à la profondeur 0-20 cm qu'à la profondeur 20-40 cm. De façon plus explicite, à la profondeur 0-20 cm, une corrélation tantôt significative et positive, tantôt significative et négative a été établie entre les paramètres de granulométrie.

Cette corrélation est aussi observée entre les paramètres chimiques et entre les paramètres physiques, excepté pour le sable fin et le sable grossier avec ces différents paramètres.

Un résultat similaire a été obtenu à la profondeur 20-40 cm entre les paramètres physiques, chimiques et physico-chimiques, excepté pour le sable fin, le sable grossier et le sable total.

Tableau XIX : Matrice de corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simples ou plein soleil

	Argile	Lim. Fin	Lim. Gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.or g	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim..fin	-0,90*	1																			
Lim.gros	-0,25	-0,12	1																		
Lim.total	-0,96**	0,91*	0,30	1																	
Arg + Lim	0,95**	-0,80*	-0,17	-0,84*	1																
Sable fin	0,63	-0,42	-0,58	-0,65	0,55	1															
Sable gros.	-0,11	-0,00	-0,27	-0,11	-0,36	-0,06	1														
Sable total	0,57	-0,40	-0,65	-0,66	0,41	0,95**	0,26	1													
pH(eau)	-0,94**	0,97**	0,12	0,98***	-0,81*	-0,56	-0,11	-0,57	1												
pH(kcl)	-0,87*	0,60	0,68	0,86*	-0,82*	-0,76	-0,00	-0,73	0,75	1											
M.org	-0,92*	0,65	0,57	0,86*	-0,90*	-0,72	0,14	-0,65	0,76	0,98** *	1										
Carb	-0,92*	0,65	0,57	0,86*	-0,90*	-0,72	0,14	-0,65	0,76	0,98** *	1,00** *	1									
Ntotal	-0,87*	0,56	0,59	0,79*	-0,89*	-0,70	0,22	-0,61	0,68	0,97* *	0,99** *	0,99***	1								
C/N	-0,99***	0,84*	0,40	0,97**	-0,92**	-0,69	0,03	-0,65	0,92**	0,94	0,95***	0,95**	0,91*	1							
P ass	-0,28	0,64	-0,83*	0,27	-0,27	0,22	0,14	0,26	0,44	-0,22	-0,12	-0,12	-0,18	0,14	1						
Ca éch	-0,50	0,69	0,09	0,70	-0,23	-0,35	-0,63	-0,54	0,75	0,37	0,29	0,29	0,17	0,52	0,36	1					
Mg éch	-0,26	-0,19	0,75	0,13	-0,39	-0,44	0,35	-0,31	-0,04	0,61	0,61	0,61	0,70	0,35	0,73	-0,46	1				
K éch	-0,94**	0,71	0,57	0,92	-0,87*	-0,74	0,01	-0,71	0,84*	0,99* **	0,99** *	0,99***	0,96**	0,98***	0,06	0,44	0,50	1			
Na éch	-0,50	0,28	0,87*	0,63	-0,30	-0,67	-0,50	-0,81*	0,51	0,78	0,66	0,66	0,61	0,63	0,49	0,57	0,40	0,73	1		
S	-0,72	0,65	0,56	0,86*	-0,49	-0,66	-0,50	-0,79*	0,81*	0,78	0,70	0,70	0,61	0,79	0,04	0,84*	0,09	0,80*	0,89*	1	
CEC	-0,09	-0,36	0,75	-0,03	-0,22	-0,35	0,30	-0,24	-0,21	0,48	0,47	0,47	0,56	0,19	-0,82*	-0,54	0,98***	0,36	0,36	-0,01	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$
 * = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative(P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative(P<0,0005)

Tableau XX : Matrice de la corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simple ou plein soleil étudiés

	Argile	Lim. fin	Lim. gros	Lim Total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim.fin	-1,00 ***	1																			
Lim.gros.	-1,00 ***	1,00 ***	1																		
Lim.total	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1																	
Arg + Lim	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1																
Sable fin	0,61	-0,61	-0,61	-0,61	0,61	1															
Sable gros.	0,87	-0,87	-0,87	-0,87	0,87	0,14	1														
Sable total	0,86	-0,86	-0,86	-0,86	0,86	0,93	0,50	1													
pH(eau)	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1												
pH(kcl)	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1											
M.org.	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1										
Carb	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1									
Ntotal	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1								
C/N	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1							
P ass	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,61	0,87	0,86	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1						
Ca éch	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	-1,00 ***	1										
Mg éch	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,61	0,87	0,86	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1				
K éch	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1			
Na éch	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1		
S	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,61	-0,87	-0,86	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1	
CEC	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,61	0,87	0,86	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$

Tableau XXI : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes simples ou de plein soleil

	Argile	Lim. Fin	Lim. gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim.fin	-1,00 ***	1																			
Lim.gros.	1,00 ***	-1,00 ***	1																		
Lim.total	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																	
Arg + Lim	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																
Sable fin	0,78	-0,78	0,78	-0,78	0,78	1															
Sable gros,	-0,82	0,82	-0,82	0,82	-0,82	-0,78	1														
Sable total	0,58	-0,58	0,58	-0,58	0,58	0,96	-0,02	1													
pH(eau)	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1												
pH(kcl)	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
M.org.	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1,00 ***	1										
Carb	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1									
Ntotal	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1								
C/N	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1							
P ass	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1						
Ca éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
Mg éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
K éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
Na éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
S	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,78	0,82	-0,58	1,00 ***	1											
CEC	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,78	-0,82	0,58	-1,00 ***												

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$

* = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative(P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative(P<0,0005)

▪ Pour l'agrosystème complexe

Le tableau XXII présente les valeurs de corrélations globales établies entre les paramètres physico-chimiques au niveau du sol de l'agrosystème complexe.

On note que globalement des corrélations significatives positives ou négatives ont été établies entre les paramètres physiques et chimiques au niveau de l'agrosystème complexe. Explicitement, au niveau des paramètres chimiques, seuls la matière organique, le carbone, l'azote total, le calcium et le magnésium ont eu des valeurs de corrélation significativement positives. De même, la CEC et la somme des bases des cations échangeables ont été corrélées significativement et positives avec respectivement, la matière organique le carbone, l'azote total, le rapport C/N et le phosphore assimilable.

Par ailleurs, le phosphore assimilable a affiché une valeur de corrélation significative et négative avec respectivement, la matière organique, le carbone, l'azote total, le calcium et le magnésium.

Au niveau de la granulométrie, seuls le limon total et la somme argile + limon ont eu leur valeur de corrélation significativement positive avec le limon fin et le limon grossier. En ce qui concerne les paramètres physico-chimiques, aucune corrélation significative n'a été notée. Il ressort qu'au niveau de La couche 0-20 cm, les paramètres chimiques ayant eu des valeurs de corrélation significatives et positives sont le pH (kcl), le carbone, l'azote total avec respectivement le pH (eau), la matière organique et le carbone. Aussi, une corrélation significativement positive a été obtenue entre le calcium et le pH d'une part, et d'autre part, entre la somme des bases des cations échangeables respectivement et le pH (eau) et le calcium. Par ailleurs, le pH (kcl) a établi une corrélation significative et négative avec respectivement, la matière organique, le carbone et l'azote total (Tableau XXIII).

Au niveau des paramètres de la granulométrie, seul, le sable grossier a eu une corrélation significative et négative avec le limon fin et la somme argile et le limon.

Pour les paramètres physico-chimiques, il n'y a pas eu de corrélation significative, excepté la relation entre le limon fin et le sodium qui a affiché une corrélation significative et positive.

Au niveau de La couche 20-40 cm, un ensemble de corrélation significative, tantôt positive, tantôt négative a été enregistrée entre les paramètres granulométriques, chimiques et physico-chimiques. Le carbone, l'azote total et le calcium ont des valeurs de corrélation négatives avec l'argile et positives avec la matière organique, le carbone et l'azote. Le sodium, a eu une valeur de corrélation significative contraire avec les mêmes paramètres. Au niveau de la granulométrie, le sable total a établi une corrélation significative et négative avec le limon fin et le limon total (Tableau XXIV).

Tableau XXII : Matrice de la corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés

	Argile	Lim Fin	Lim. gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim.fin	-0,71	1																			
Lim.gros.	0,41	0,15	1																		
Lim.total	-0,55	0,97**	0,39	1																	
Arg + Lim.	0,67	0,03	0,83*	0,24	1																
Sable fin	0,61	-0,41	0,41	-0,27	0,47	1															
Sable gros,	-0,09	-0,50	-0,40	-0,57	-0,61	-0,18	1														
Sable total	0,49	-0,68	0,11	-0,61	0,03	0,78	0,48	1													
pH(eau)	0,09	-0,04	0,51	0,09	0,19	-0,34	0,14	-0,21	1												
pH(kcl)	-0,20	0,14	0,46	0,25	-0,00	-0,31	0,39	-0,03	0,84*	1											
M.org.	-0,64	0,54	0,22	0,56	-0,25	0,07	0,04	0,09	0,03	0,43	1										
Carb	-0,64	0,54	0,22	0,56	-0,25	0,07	0,04	0,09	0,03	0,43	1,00***	1									
Ntotal	-0,63	0,53	0,23	0,55	-0,25	0,07	0,06	0,10	0,05	0,46	1,00***	1,00***	1								
C/N	-0,70	0,72	0,18	0,72	-0,17	-0,01	-0,31	-0,20	-0,05	0,21	0,91*	0,91*	0,90*	1							
P ass	0,60	-0,64	-0,40	-0,70	0,08	0,15	-0,07	0,09	-0,32	-0,71	-0,89*	-0,89*	-0,90*	-0,77	1						
Ca éch	-0,53	0,44	0,41	0,52	-0,16	-0,12	0,17	0,00	0,49	0,79	0,88*	0,88*	0,89*	0,74	-0,94**	1					
Mg éch	-0,63	0,57	0,32	0,61	-0,19	-0,03	0,07	0,02	0,20	0,59	0,98***	0,98***	0,98***	0,87	-0,96**	0,95***	1				
K éch	0,34	-0,47	0,50	-0,31	0,12	0,19	0,43	0,45	0,77	0,74	0,15	0,15	0,17	-0,10	-0,26	0,49	0,25	1			
Na éch	0,44	-0,50	0,32	-0,38	0,17	0,78	0,41	0,97**	-0,13	0,13	0,24	0,24	0,25	-0,08	-0,13	0,17	0,20	0,48	1		
S	-0,57	0,49	0,38	0,55	-0,17	-0,07	0,13	0,02	0,37	0,72	0,93**	0,93**	0,94**	0,78*	-0,96	0,99***	0,98***	0,41	0,20	1	
CEC	-0,72	0,75	-0,03	0,69	-0,23	0,04	-0,25	-0,12	-0,43	-0,05	0,83*	0,83*	0,81*	0,89*	-0,66	0,51	0,75	-0,42	-0,00	0,61	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$
 * = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative (P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative (P<0,0005)

Tableau XXIII : Matrice de la corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés

	Argile	Lim. fin	Lim. gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC	
Argile	1																					
Lim.fin	-0,97	1																				
Lim.gros	0,93	-0,83	1																			
Lim.total	-0,53	0,71	-0,20	1																		
Arg + Lim	0,98	-0,92	0,98	-0,38	1																	
Sable fin	0,81	-0,92	0,55	-0,93	0,70	1																
Sable gros,	-0,99*	0,95	-0,96	0,45	-1,00*	-0,75	1															
Sable total	0,70	-0,84	0,40	-0,98	0,57	0,98	-0,63	1														
pH(eau)	0,25	-0,01	0,57	0,69	0,40	-0,37	-0,33	0,52	1													
pH(kcl)	0,16	0,08	0,50	0,75	0,32	-0,45	-0,25	0,60	0,99*	1												
M.org	-0,15	-0,08	-0,49	-0,75	-0,31	0,45	0,24	0,60	-0,99	-1,00**	1											
Carb	-0,15	-0,08	-0,49	-0,75	-0,31	0,45	0,24	0,60	-0,99	-1,00**	1,00***	1										
Ntotal	-0,11	-0,13	-0,45	-0,78	-0,27	0,50	0,19	0,64	-0,99	-1,00*	1,00*	1,00*	1									
C/N	-0,58	0,38	-0,83	-0,37	-0,71	0,00	0,65	0,18	-0,93	-0,89	0,89	0,89	0,87	1								
P ass	0,14	-0,36	-0,22	-0,91	-0,03	0,69	-0,05	0,81	-0,92	-0,96	0,96	0,96	0,97	0,72	1							
Ca éch	0,21	0,02	0,54	0,72	0,37	-0,40	-0,30	-0,55	1,00*	1,00*	-0,99*	-1,00	-0,99	-0,91	-0,94	1						
Mg éch	-0,99	0,94	-0,97	0,43	-1,00	-0,74	1,00	-0,61	-0,35	-0,27	0,26	0,26	0,22	0,67	-0,02	-0,32	1					
K éch	0,73	-0,55	0,92	0,19	0,83	0,19	-0,79	0,02	0,84	0,79	-0,79	-0,79	-0,76	-0,98	-0,58	0,82	-0,80	1				
Na éch	0,77	-0,90	0,50	-0,95	0,65	1,00*	-0,71	0,99	-0,43	-0,51	0,51	0,51	0,55	0,06	0,74	-0,46	-0,69	0,13	1			
S	0,26	-0,03	0,58	0,68	0,41	-0,36	-0,34	-0,51	1,00**	0,99	-0,99	-0,99	-1,00	-0,93	-0,92	1,00*	-0,36	0,85	-0,42	1		
CEC	-0,46	0,24	-0,74	-0,51	-0,60	0,15	0,53	0,32	-0,97	-0,95	0,95	0,95	0,93	1,00	0,82	-0,96	0,55	-0,94	0,21	-0,98	1	

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$
 * = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative(P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative(P<0,0005)

Tableau XXIV : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes complexes étudiés

	Argile	Lim. Fin	Lim. gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim.fin	-0,87	1																			
Lim.gros.	-0,68	0,95	1																		
Lim.total	-0,86	1,00*	0,96	1																	
Arg + Lim.	-0,09	0,56	0,79	0,59	1																
Sable fin	0,16	-0,62	-0,83	-0,64	-1,00*	1															
Sable gros.	0,98	-0,96	-0,82	-0,95	-0,31	0,36	1														
Sable total	0,85	-1,00*	-0,96	-1,00**	-0,60	0,65	0,94	1													
pH(eau)	-	-	-	-	-	-	-	-	1												
pH(kcl)	-0,62	0,92	0,99*	0,93	0,84	-0,87	-0,77	-0,94	-	1											
M.org.	-1,00*	0,85	0,65	0,83	0,04	-0,11	-0,96	-0,82	-	0,58	1										
Carb	-1,00*	0,85	0,65	0,83	0,04	-0,11	-0,96	-0,82	-	0,58	1,00***	1									
Ntotal	-1,00*	0,86	0,66	0,84	0,07	-0,13	-0,97	-0,84	-	0,59	1,00*	1,00*	1								
C/N	-0,99	0,81	0,60	0,79	-0,02	-0,05	-0,95	-0,79	-	0,52	1,00*	1,00*	1,00*	1							
P ass	0,92	-0,99	-0,91	-0,99	-0,47	0,53	0,98	0,99	-	-0,87	-0,90	-0,90	-0,91	-0,87	1						
Ca éch	-1,00*	0,89	0,70	0,87	0,12	-0,18	-0,98	-0,86	-	0,63	1,00*	1,00*	1,00*	0,99	-0,93	1					
Mg éch	-0,99*	0,92	0,75	0,90	0,19	-0,25	-0,99	-0,90	-	0,69	0,99	0,99	0,99	0,98	-0,95	1,00*	1				
K éch	0,57	-0,89	-0,99	-0,91	-0,87	0,90	0,73	0,91	-	-1,00*	-0,52	-0,52	-0,54	-0,47	0,84	-0,59	-0,64	1			
Na éch	1,00*	-0,89	-0,71	-0,87	-0,13	0,19	0,98	0,87	-	-0,64	-1,00*	-1,00*	-1,00*	-0,99	0,93	-1,00**	-1,00*	0,59	1		
S	-1,00*	0,90	0,72	0,88	0,15	-0,21	-0,97	-0,88	-	0,66	0,99	0,99	1,00*	0,99	0,94	1,00*	1,00*	-0,61	-1,00*	1	
CEC	-0,99	0,93	0,78	0,92	0,23	-0,30	-1,00*	-0,92	-	0,72	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,99	1,00*	-0,68	-0,99	1,00*	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$

* = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative (P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative (P<0,0005) ; - pas de valeur de corrélation

▪ Pour l'agrosystème mixte

Les valeurs de corrélations globales établies entre les paramètres physico-chimiques du sol de l'agrosystème mixte sont présentées dans le tableau XXV.

On note que diverses corrélations significatives positives ou négatives ont été globalement établies entre les paramètres physiques et chimiques au niveau de l'agrosystème mixte.

De façon spécifique, au niveau de la granulométrie, on note des valeurs de corrélations significatives et négatives ($R = -0,80$; $P < 0,05$) entre l'argile et les limons fin et grossier d'une part, et d'autre part, le limon fin avec le limon grossier et la somme argile et limon alors qu'une corrélation significative et positive ($R = 0,80$; $P < 0,05$) apparaît entre l'argile et la somme argile + limon. Au niveau chimique, la matière organique et le phosphore assimilable ont eu une corrélation significative et positive, de même que la CEC, les cations échangeables et la somme des bases. On note également une corrélation significative positive ou négative entre l'argile et les limons fins et grossier et le potassium-K, le sodium-Na, le carbone, l'azote et le C/N.

On note une variation de corrélations significatives de même sens ($R = 0,80$; $P < 0,05$) ou de sens contraire ($R = -0,80$; $P < 0,05$) est notée entre les paramètres physico-chimiques, aussi bien dans la couche 0-20 cm que dans celle de 20-40 cm. Dans la couche 0-20 cm, une corrélation tantôt significative et positive, tantôt significative et négative est établie entre les paramètres physiques et chimiques, excepté les valeurs de corrélations pour le sable fin, le sable grossier et le sable total et les paramètres de granulométrie qu'avec ceux de la chimie du sol (Tableau XXVI).

Un résultat similaire a été obtenu dans la couche 20-40 cm, excepté pour le sable fin et le sable grossier qui ont affiché des valeurs non corrélées positives ou négatives (Tableau XXVII).

Tableau XXV : Matrice de la corrélation globale entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés

	Argile	Lim. fin	Lim. Gros	Lim. Total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC	
Argile	1																					
Lim.fin	-0,81*	1																				
Lim.gros.	0,76	-1,00***	1																			
Lim.total	-0,83*	0,65	-0,55	1																		
Arg + Lim.	1,00***	-0,82*	0,77	-0,79	1																	
Sable fin	-0,58	0,24	-0,23	0,17	-0,61	1																
Sable gros,	0,40	-0,11	0,10	-0,14	0,42	-0,45	1															
Sable total	-0,42	0,20	-0,21	0,11	-0,45	0,87*	0,04	1														
pH(eau)	0,85*	-0,63	0,53	-1,00***	0,81*	-0,24	0,19	-0,61	1													
pH(kcl)	0,46	-0,00	-0,12	-0,75	0,41	-0,17	0,20	-0,09	0,77	1												
M.org.	-0,29	0,74	-0,81*	-0,02	-0,32	0,05	0,06	0,09	0,05	0,67	1											
Carb	-0,29	0,74	-0,81*	-0,02	-0,32	0,05	0,06	0,09	0,05	0,67	1,00***	1										
Ntotal	-0,47	0,80*	-0,90*	0,08	-0,50	0,26	-0,09	0,24	-0,07	0,56	0,97**	0,97**	1									
C/N	0,72	-0,80*	0,84*	-0,25	0,76	-0,61	0,37	-0,47	0,28	-0,25	-0,76	-0,76	-0,89*	1								
P ass	-0,26	0,69	-0,77	-0,10	-0,29	0,10	0,02	0,13	0,13	0,72	0,99***	0,99***	0,97**	-0,78	1							
Ca éch	0,30	-0,10	-0,01	-0,78	0,24	0,25	-0,12	0,21	0,75	0,86*	0,50	0,50	0,50	-0,41	0,59	1						
Mg éch	-0,00	0,18	-0,29	-0,54	-0,07	0,52	-0,23	0,33	0,52	0,78	0,66	0,66	0,70	-0,67	0,74	0,95**	1					
K éch	-0,81*	0,85*	-0,87*	0,38	-0,84*	0,61	-0,38	0,47	-0,40	0,14	0,72	0,71	0,86*	-0,99***	0,73	0,29	0,57	1				
Na éch	-0,82*	0,79*	-0,81*	0,37	-0,95*	0,68	-0,44	0,55	-0,40	0,09	0,64	0,64	0,81*	-0,98***	0,66	0,30	0,57	0,99***	1			
S	0,09	0,10	-0,21	-0,62	0,02	0,37	-0,20	0,30	0,59	0,81*	0,62	0,64	0,81*	-0,98***	0,70	0,97**	1,00***	0,49	0,50	1		
CEC	0,43	-0,09	-0,03	-0,79	0,28	0,17	-0,06	0,16	0,78	0,90*	0,54	0,54	0,51	-0,38	0,63	0,99***	0,94**	0,26	0,26	0,96**	1	

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$
 * = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative (P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative (P<0,0005)

Tableau XXVI : Matrice de corrélation (0-20 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés

	Argile	Lim fin	Lim Gros	Lim Total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC
Argile	1																				
Lim.fin	-1,00 ***	1																			
Lim.gros.	1,00 ***	-1,00 ***	1																		
Lim.total	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																	
Arg + Lim.	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																
Sable fin	-0,89	0,89	-0,89	0,89	-0,89	1															
Sable gros.	0,64	-0,64	0,64	-0,64	0,64	-0,23	1														
Sable total	-0,55	0,55	-0,55	0,55	-0,55	0,87	0,28	1													
pH(eau)	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1												
pH(kcl)	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1											
M.org.	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1										
Carb	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1									
Ntotal	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	0,89	-0,64	0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1								
C/N	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1							
P ass	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1						
Ca éch	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1					
Mg éch	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1				
K éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	0,89	-0,64	0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1			
Na éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	0,89	-0,64	0,55	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1		
S	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1	
CEC	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-0,89	0,64	-0,55	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$

* = corrélation significative (P<0,05) ; * * = corrélation très significative(P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative(P<0,0005)

Tableau XXVII : Matrice de la corrélation (20-40 cm) entre les paramètres physico-chimiques des sols des agrosystèmes mixtes étudiés

	Argile	Lim. fin	Lim. gros	Lim. total	Arg + Lim	Sable fin	Sable gros	Sable total	pH (eau)	pH (kcl)	M.org	Carb	N total	C/N	P ass	Ca éch	Mg éch	K éch	Na éch	S	CEC		
Argile	1																						
Lim.fin	-1,00 ***	1																					
Lim.gros	1,00 ***	-1,00 ***	1																				
Lim.total	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																			
Arg + Lim.	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1																		
Sable fin	0,91	-0,91	0,91	-0,91	0,91	1																	
Sable gros.	-0,69	0,69	-0,69	0,69	-0,69	-0,93	1																
Sable total	1,00 *	-1,00 *	1,00 *	-1,00 *	1,00 *	0,94	-0,75	1															
pH (eau)	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1														
pH (kcl)	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1													
M.org.	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1												
Carb	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1											
Ntotal	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1										
C/N	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1									
P ass	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1								
Ca éch	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1							
Mg éch	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1						
K éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1					
Na éch	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-0,91	0,69	-1,00 *	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1				
S	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1	
CEC	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	0,91	-0,69	1,00 *	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	-1,00 ***	1,00 ***	1

En gras, valeurs significatives, corrélées négatives et en gris, valeurs significatives, corrélées positives avec un coefficient de corrélation R = 0,80 et au seuil $\alpha = 0,05$

* = corrélation significative (P<0,05) ; ** = corrélation très significative (P<0,005) ; *** = corrélation hautement significative (P<0,0005)

VI.5. Production des plantations des cacaoyers dans les agrosystèmes

Les paramètres du rendement rendant compte de la production des plantations cacaoyères sous les différents agrosystèmes sont présentés dans le tableau XXVIII.

Tableau XXVIII : Rendements des parcelles cacaoyères sous les différents agrosystèmes étudiés

	Rendements des plantations cacaoyères à l'hectare							
	Nb cab.	Pmoy/ Cab (g)	Nb Fèv / Cab	PF Fèv. (Kg)	PS Fèv. (kg)	Prod, PC (kg)	Prod, GC (kg)	Prod/ An (kg)
PSOL	9366,7a	126,68a	56,66a	1186,52a	403,42a	100,85a	302,56a	403,42a
AGM	8000,0b	107,94b	53,33b	863,55b	293,61b	66,06b	227,55b	293,61b
AGC	5833,3c	103,22c	50,00c	602,00c	204,68c	nd	204,68c	204,68c
Moy. Gle	7733,33	112,61	53,33	884,02	300,57	55,64	244,93	300,57
Coéf.Var (p.c.)	3,05	0,75	2,58	2,91	2,91	2,98	3,08	2,91
P > F	< 0,0001	<0,0001	<0,0031	<,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

PSOL= agrosystème de plein soleil ; AGM= agrosystème mixte ; AGC= agrosystème complexe

Les valeurs dans la même colonne suivies par la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha=0,05$

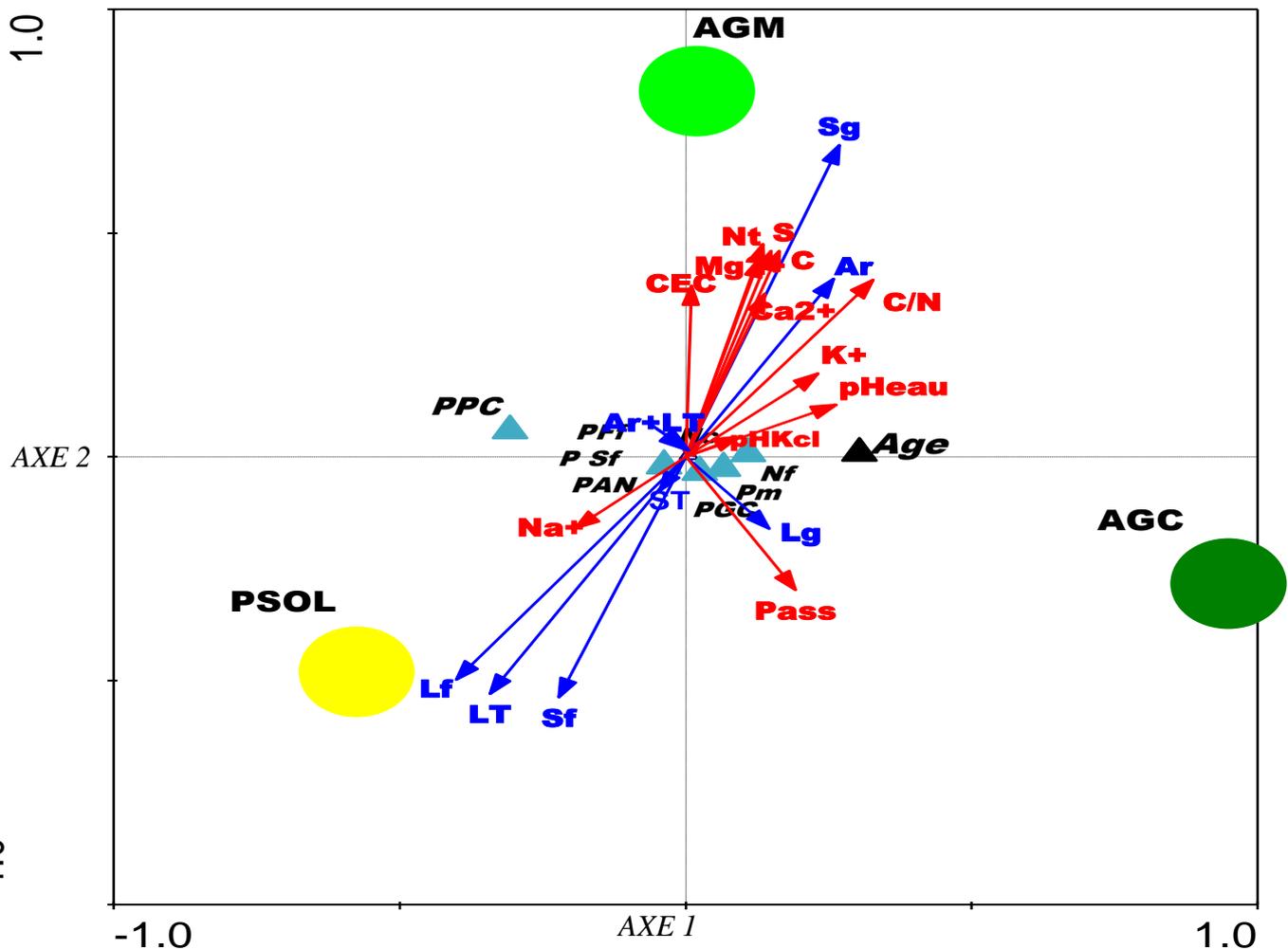
Nb cab = nombre de cabosse ; Pmoy/cab = poids moyen par cabosse ; Nb Fèv/cab = nombre de fèves par cabosse ; PF Fèv = poids frais des fèves ; PS Fèv = poids sec des fèves ; Prod. PC = production en petite campagne ; Prod. GC = production en grande campagne ; Prod/An = production annuelle ; nd = non déterminé

Il y a une variation des valeurs des différentes composantes du rendement selon les agrosystèmes. Les valeurs des composantes du rendement dans les agrosystèmes de plein soleil sont plus élevées que celles des agrosystèmes mixtes et des agrosystèmes complexes respectivement dans un ordre décroissant quel que soit le paramètre du rendement considéré. Cela dénote qu'une plantation cacaoyère en agrosystème de plein soleil est la plus productrice comparativement à une plantation cacaoyère dans les agrosystèmes mixtes ou complexes. En comparant les agrosystèmes, il ressort que la production annuelle de PSOL représente 44,73 p.c. de la production totale des parcelles étudiées ; celle de l'AGC est de 22,70 p.c. tandis que la production des AGM compte pour 32,57 p.c. En tout état de cause, la plantation de cacaoyer en agrosystème complexe est la moins productrice.

VI.6. Corrélation entre les paramètres du rendement des cacaoyers et les paramètres physico-chimiques dans les agrosystèmes

La figure 24 établit la relation entre les caractéristiques physico-chimiques du sol et le rendement des cacaoyers selon les agrosystèmes. On note que les différents paramètres sont

variablement liés aux paramètres de rendement et à la productivité selon le type d'agrosystèmes. Généralement, bien qu'il existe une relation positive ou négative entre les paramètres physico-chimiques du sol caractérisant ces paramètres de fertilité avec ceux du rendement déterminant la productivité des agroforêts à base de cacaoyers.



Les cercles sont les agrosystèmes : en jaune = PSOL : Agrosystème simple ou de plein soleil ; en vert clair = AGM : Agrosystème mixte ; en vert foncé = AGC : Agrosystème complexe,
 Les flèches bleues sont les paramètres de granulométries : Ar : Argile ; Lf : Limon fin ; Lg : Limon grossier ; LT : Limon total ; Sf : sable fin ; Ar+LT : Argile + Limon ; Sg : sable grossier ; ST : Sable Total,
 Les flèches rouges sont les paramètres chimiques : pH(eau) ; pH(kcl) ; C : Carbone organique ; Nt : Azote total ; C/N : rapport carbone sur azote ; Pass : phosphore assimilable ; Ca : Calcium ; Mg :Magnésium ; Na : Sodium ; S : Somme des bases échangeables ; CEC : Capacité d'échange cationique. Les triangles bleu-ciel sont les paramètres de rendement : Nc : Nombre de cabosses ; Pm : Poids moyen des fèves /cabosse ; Nf : Nombre de fèves /cabosse ; Pff : Poids Frais des fèves ; Psf : Poids sec des fèves ; PPC : Production petite Campagne ; PGC : Production Grande Campagne ; PAN : Production Annuelle.

Figure 24 : Corrélation globale entre le rendement et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés

Il convient d'indiquer qu'au niveau chimique, tous les paramètres déterminés sont positivement liés aux paramètres de rendement et à la productivité dans l'agrosystème mixte, excepté pour le sodium qui a indiqué un lien négatif aussi bien sur l'axe 1 que l'axe 2 respectivement avec l'agrosystème de plein soleil. De même pour le phosphore assimilable, une relation positive sur l'axe 2 et négative sur l'axe 1 a été notée en agrosystème complexe. Toutes ces relations établies avec les paramètres de rendement ont été des relations de moyenne intensité excepté pour le pH (kcl), le potassium-K et le sodium-Na qui ont eu une relation relativement faible avec les différents agrosystèmes. Pour ce qui concerne, les paramètres de granulométrie, le sable grossier-Sg et l'argile-Ar sont plus liés et positivement sur les deux axes aux paramètres de rendement dans l'agrosystème mixte-AGM alors que le limon fin-Lf, le limon total-LT et le sable fin-Sf, affichent une relation négative avec les paramètres du rendement et de la productivité sur les deux axes en agrosystème de plein soleil. Seul, le limon grossier-Lg a indiqué une relation positive et négative respectivement sur les axes 2 et 1 en agrosystème complexe. Le sable total-ST et la somme argile et le limon total-Ar+LT, n'ont pas véritablement influencé les paramètres de rendement et donc la productivité quel que soit l'agrosystème. Les relations de granulométrie quoique positives ou négatives avec le rendement, ont été de fortes relations avec respectivement le limon fin, le limon total, le sable fin et le sable grossier, de relations moyennes avec l'argile et de faibles relations avec le limon grossier dans les différents agrosystèmes.

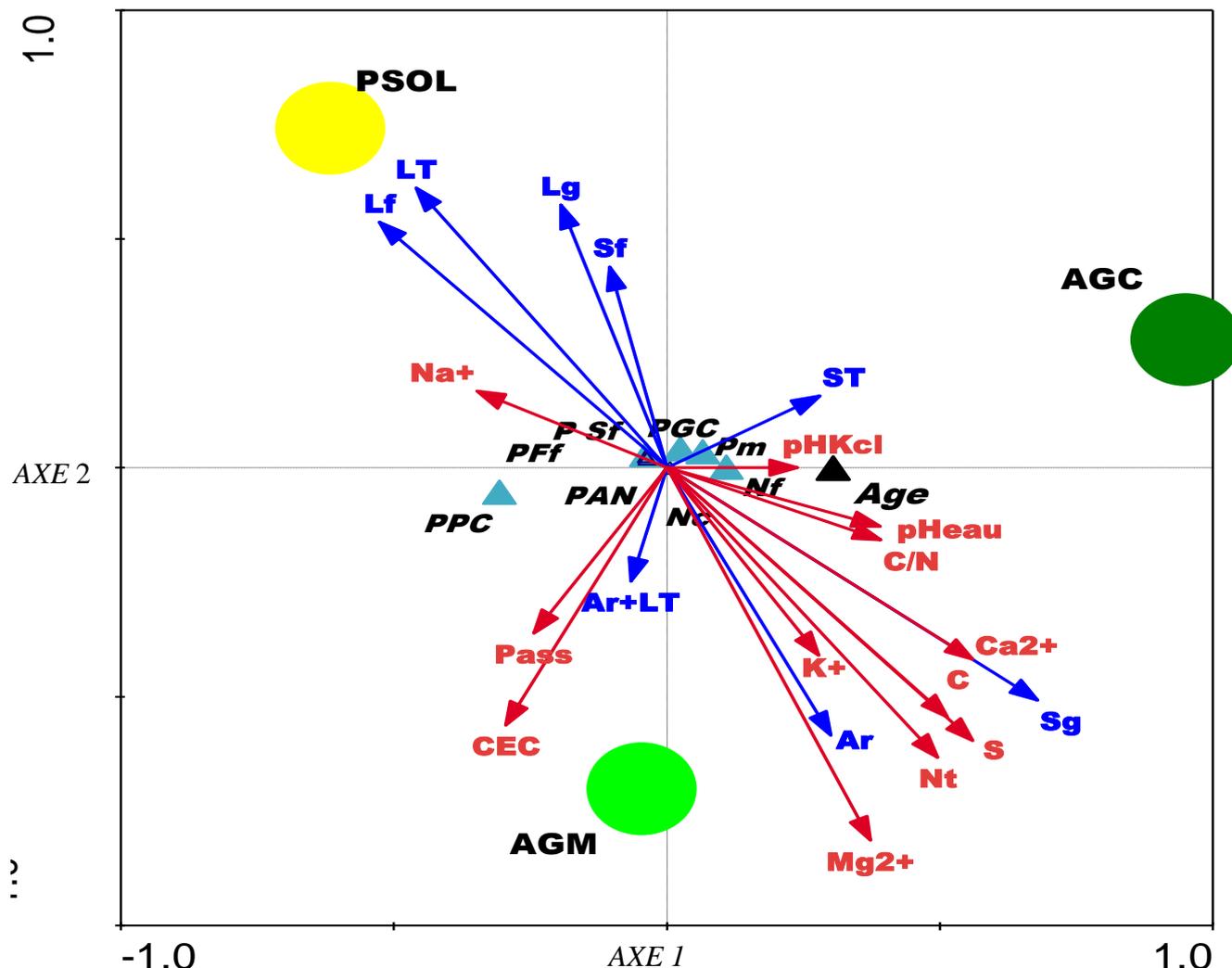
L'âge des plantations, quel que soit l'agrosystème a une relation positive avec les paramètres du rendement et la productivité.

La présentation canonique des différents paramètres physico-chimiques mettant en relation les paramètres du rendement varie selon le type d'agrosystème et la teneur des paramètres physiques de granulométrie d'une part, et d'autre part, selon la disponibilité des paramètres chimiques de nutrition dans les couches considérées 0-20 cm et 20-40 cm tels présentés dans les figures 25 et 26 respectivement.

Au niveau de la couche 0-20 cm, en considérant la granulométrie, on note que contrairement au cas global précédemment présenté (figure 25), le limon fin-Lf, le limon total-LT, le limon grossier-Lg et le sable fin-Sf ont eu des liens de sens négatif sur l'axe 2 et négatif sur l'axe 1 en agrosystème de plein soleil (figure 26), .

En agrosystème complexe, c'est le sable total-ST seul qui a eu une relation avec les paramètres du rendement qui est à la fois positive sur l'axe 1 et l'axe 2. L'argile-Ar et le sable grossier-Sg ont établi une relation négative sur l'axe 1 positive sur l'axe 2 tandis que la

somme argile et limon total-Ar+LT a eu une relation négative à la fois sur les deux axes 1 et 2 avec les paramètres du rendement en agrosystème mixte. Toutes ces relations établies entre la granulométrie et le rendement ont été de fortes relations avec le limon fin, le limon total, le sable grossier, des relations moyennes avec le limon grossier, l'argile et plus ou moins de faibles relations avec le sable fin, le sable total et la somme argile et limon total dans les différents agrosystèmes.



Les cercles sont les agrosystèmes : en jaune = PSOL : Agrosystème simple ou de plein soleil ; en vert clair = AGM : Agrosystème mixte ; en vert foncé = AGC : Agrosystème complexe,

Les flèches bleues sont les paramètres de granulométries : Ar : Argile ; Lf : Limon fin ; Lg : Limon grossier ; LT : Limon total ; Sf : sable fin ; Ar+LT : Argile + Limon ; Sg : sable grossier ; ST : Sable Total,

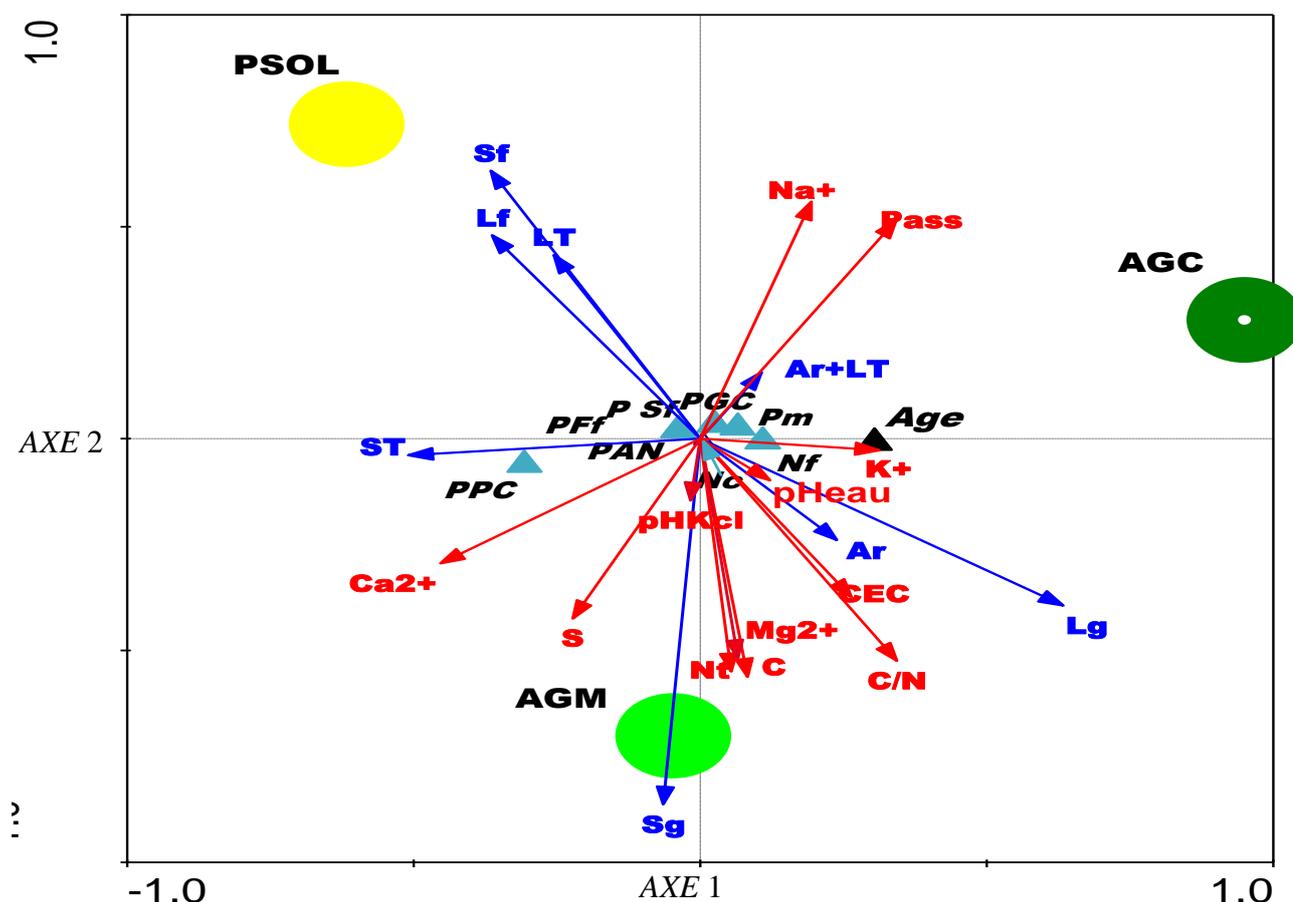
Les flèches rouges sont les paramètres chimiques : pH(eau) ; pH(kcl) ; C : Carbone organique ; Nt : Azote total ; C/N : rapport carbone sur azote ; Pass : phosphore assimilable ; Ca : Calcium ; Mg : Magnésium ; Na : Sodium ; S : Somme des bases échangeables ; CEC : Capacité d'échange cationique. Les triangles bleu-ciel sont les paramètres de rendement : Nc : Nombre de cabosses ; Pm : Poids moyen des fèves /cabosse ; Nf : Nombre de fèves /cabosse ; Pff : Poids Frais des fèves ; PSf : Poids sec des fèves ; PPC : Production petite Campagne ; PGC : Production Grande Campagne ; PAN : Production Annuelle.

Figure 25 : Corrélation (0 – 20 cm) entre la productivité et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés.

Les différentes relations établies au niveau de la chimie du sol et le rendement montrent aussi des corrélations positives ou négatives selon les agrosystèmes. Ainsi, on a noté que, en agrosystème mixte, le pH (eau), le carbone-C, l'azote total-Nt, le rapport C/N, les cations échangeables (K^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ont eu respectivement un lien négatif sur l'axe 1 et un lien positif sur l'axe 2 dans l'agrosystème mixte alors que le phosphore assimilable-Pass et la capacité d'échange cationique-CEC y ont eu un lien négatif à la fois sur les axes 1 et 2. Le sodium-Na a établi une relation négative sur l'axe 2 et une relation positive sur l'axe 1 en agrosystème de plein soleil quand le pH (kcl) reste positif sur l'axe 2 en agrosystème complexe. Ces différentes relations chimiquement établies avec les paramètres de rendement, bien que positives ou négatives suivant les axes, sont d'importances variables. Le carbone-C, l'azote total-Nt, le calcium-Ca, le magnésium-Mg, la somme-S des cations échangeables et la capacité d'échange cationique-CEC ont une relations plus ou moins fortes alors que le pH (eau), le rapport C/N, le phosphore assimilable-Pass, le potassium-K et le sodium-Na ont eu leur relation qui est plus ou moins faible quel que soit l'agrosystème.

En considérant la couche 20-40 cm illustré par la figure 28, on a noté qu'avec la granulométrie, le limon fin-Lf, le limon total-LT et le sable fin-Sf maintiennent une relation positive sur l'axe 1 et une relation négative sur l'axe 2 avec les paramètres du rendement en agrosystème de plein soleil tandis que le limon grossier-Lg, l'argile-Ar, le sable grossier-Sg et le sable total-ST se trouvent en agrosystème mixte, tantôt positifs ou négatifs sur l'axe 2, tantôt négatifs sur l'axe 1 en rapport avec le rendement. Seule, la somme de l'argile et le limon total-Ar+LT a établi une relation complètement positive avec les paramètres du rendement en agrosystème complexe. Au niveau de la chimie du sol, tous les paramètres déterminés ont présenté une relation tantôt positive ou négative sur l'axe 2, tantôt négatives sur l'axe 1 avec les rendements en agrosystème mixte, excepté pour le sodium-Na et le phosphore assimilable-Pass qui ont affiché une relation complètement positive sur les axes 1 et 2 en agrosystème complexe.

L'importance de l'ensemble de ces relations établies avec le rendement va de plus fortes à moyennes ou faibles selon le paramètre considéré et quel que soit l'agrosystème. A l'analyse de l'ensemble des résultats de corrélation établis entre les paramètres physico-chimiques et ceux du rendement ou la productivité, on peut en définitif déduire que chimiquement, l'agrosystème mixte présente plus de potentialité que les agrosystèmes de plein soleil et complexe. En revanche, au niveau de la granulométrie, c'est l'agrosystème de plein soleil qui se trouve plus intéressant dans sa relation avec le rendement.



Les cercles sont les agrosystèmes : en jaune = PSOL : Agrosystème simple ou de plein soleil ; en vert clair = AGM : Agrosystème mixte ; en vert foncé = AGC : Agrosystème complexe,

Les flèches bleues sont les paramètres physiques de granulométries : Ar : Argile ; Lf : Limon fin ; Lg : Limon grossier ; LT : Limon total ; Sf : sable fin ; Ar+LT : Argile + Limon ; Sg : sable grossier ; ST : Sable Total, Les flèches rouges sont les paramètres chimiques : pH (eau) ; pH (kcl) ; C : Carbone organique ; Nt : Azote total ; C/N : carbone sur l'azote ; Pass : phosphore assimilable ; Ca : Calcium ; Mg : Magnésium ; Na : Sodium ; S : Somme des bases échangeables ; CEC : Capacité d'échange cationique

Les triangles bleu-ciel sont les paramètres de rendement : Nc : Nombre de cabosses ; Pm : Poids moyen des fèves /cabosse ; Nf : Nombre de fèves /cabosse ; Pff : Poids Frais des fèves ; PSf : Poids sec des fèves ; PPC : Production petite Campagne ; PGC : Production Grande Campagne ; Pan : Production Annuelle.

Figure 26 : Corrélation (20 -40 cm) entre la productivité et les paramètres physico-chimiques des sols selon les agrosystèmes étudiés

Conclusion partielle

Les résultats de l'étude montrent que les agrosystèmes étudiés présentent une variabilité d'espèces floristiques, appartenant à différentes familles. Ces espèces se retrouvent à des densités variables selon que nous sommes en agrosystème simple ou plein soleil, en agrosystème mixte ou complexe. Au niveau des potentialités agrosystémiques, ce sont des cambisols peu acides à texture limono-sablo-argileuse qui ont été caractérisés avec une disponibilité en éléments nutritifs très variable selon les agrosystèmes et dans les couches 0-20 cm et 20-40 cm respectivement. Le rendement global ou la productivité des cacaoyers s'est révélé plus important en agrosystème simple ou plein soleil qu'en agrosystème mixte et complexe.

CHAPITRE VII : DISCUSSION

Dans le présent chapitre, les différents résultats obtenus sont discutés en quatre points. Le premier point aborde les espèces végétales associées à la cacaoculture, le second point met l'accent sur l'intérêt des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers, le troisième point est relatif aux caractéristiques morphologiques et à la fertilité du sol des agrosystèmes à base de cacaoyers. Le dernier point quant à lui traite de la productivité des plantations cacaoyères sous les systèmes agroforestiers dans l'agro-écosystème étudié.

VII.1. Espèces végétales associées à la cacaoculture et agrosystème

De cette étude il ressort que les espèces arboricoles identifiées ne sont pas spécifiques à chaque agrosystème, bien qu'il y ait une différente densité selon le type d'agrosystèmes. Ceci permet d'ailleurs de définir les différents types d'agrosystèmes dits de plein soleil avec 12,65 p.c. d'espèces associées, mixte avec 35,73 p.c. des espèces associées et complexe avec 51,61 p.c. d'espèces associées. Ces caractéristiques des agrosystèmes sont directement liées aux itinéraires techniques des pratiques culturales choisies par les planteurs par tradition ou par expériences. Dans la zone d'étude, les trois principales variétés (Amelonado (français), Forastero haut-Amazone (ghana) et mercedes (hybride) cultivées en Côte d'Ivoire ont été rencontrées dans toutes les plantations cacaoyères de façon concomitante ou en monoculture selon les objectifs du planteur et bien plus selon les moyens ou la semence disponible lors de la mise en place de la plantation.

La variété Forastero Bas-amazonienne (Amelonado), communément appelée « Cacao français » a été introduite en Côte d'Ivoire depuis l'époque coloniale (Ruf & Schroth, 2004). Sa culture est directement associée à la disponibilité de la forêt et est exigeante vis-à-vis de l'ombrage pendant toute la durée de vie de la plantation. La proportion importante de cette variété dans les vieilles plantations cacaoyères induit l'application d'un itinéraire technique associant un taux élevé d'espèces végétales qui aboutit à un système agroforestier mixte (155,33 arbres/ha) ou complexe (224,33 arbre/ha) dont la structure est assez proche de celle des forêts résiduelles. Ces résultats rejoignent ceux de Kpangui (2015) qui affirme que la densité des espèces forestières s'accroît avec le vieillissement des plantations cacaoyères. Ceci est attesté par les conclusions de Geilfus (1994) indiquant qu'un seuil de densité de 100 à 150 arbres associés par hectare dans une cacaoyère est nécessaire pour observer un effet bénéfique de l'agroforesterie en cacaoculture. Ce qui éviterait un trop grand abattage des

arbres pendant la mise en place des plantations qui entraînerait le dépérissement des cacaoyers de type « Français ». Ces résultats corroborent les travaux de Ruf (1991) qui ont montré que la variété Amelonado est adaptée à une culture sous ombrage et que l'abattage des arbres est source de dépérissement et de dégradation des plantations de cacaoyers. Ruf & Schroth (2004) abondent dans le même sens en précisant que c'est un système agroforestier complexe qui convient à cette variété de cacao « Français » vu son caractère ombrophile.

La variété de cacao « Mercedes » issue des croisements entre Forasteros Haut Amazoniens, Amelonados et Trinitarios, mise à la disposition des structures de vulgarisation par le Centre Nationale de Recherche Agronomique (CNRA) est assez récente (Pokou *et al*, 2009). Cette variété est héliophile et sa mise en place est liée à l'abattage total de la parcelle en exploitation car elle ne semble pas supporter l'ombrage comme le font remarquer les planteurs. C'est donc une variété de plein soleil d'où, un agrosystème simple ou de plein soleil. Avec l'introduction récente des variétés hybrides « Ghana » et « Mercedes », les planteurs de cacao se penchent de plus en plus vers les systèmes agroforestiers mixte ou de plein soleil tel qu'observé par Ruf (2011) dans les plantations cacaoyères.

La composition et/ou la densité des espèces floristiques associées à la cacaoculture est basée sur l'expérience du planteur en matière de pratique culturale, de la variété cultivée ou la valeur économique des espèces associées (Adou & N'Guessan, 2006). L'on note que dans les plantations, la préférence des planteurs est portée sur les espèces exotiques telles que *Persea americana Mill.* (Lauraceae), *Citrus spp* (Rutaceae). Généralement, les planteurs de cette zone, possédant les parcelles vieilles de plus de quarante années, ont opté pour une densité des arbres associés élevée donc un système agroforestier complexe ou mixte parce que, les conditions climatiques sont jugées défavorables à la culture cacaoyère (Herzog, 1994). Cette pratique a été aussi observée dans les zones forestières denses et les zones de transition de la Côte d'Ivoire (Herzog, 1992, 1994 ; Adou & N'Guessan, 2006 ; Konan, 2009). De même, au Cameroun, Carrière (1999) et Sonwa *et al.* (2002) ont également décrits des pratiques culturales semblables. Pour ces auteurs, il s'agit d'un processus de sélection commun aux systèmes agroforestiers tropicaux destiné à diversifier les revenus tirés des plantations. N'Goran (1998) et Cissé (2013), quant à eux, expliquent les pratiques culturales basées sur le système agroforestier de plein soleil comme étant une nouvelle technique dont le but est de réduire la compétition nutritionnelle avec les cacaoyers.

Par ailleurs, la question liée à la propriété de l'arbre constitue également un élément de la promotion des systèmes de culture du cacaoyer en système mono-spécifiques ou plein

soleil. En effet, un arbre bien qu'introduit ou non dans une plantation, n'appartient pas aux propriétaires de ladite plantation. Ainsi les conflits entre exploitants forestiers, les propriétaires coutumiers d'un côté et les exploitants des terres de l'autre, sont constamment signalés dans cette zone. Pour préserver leurs plantations, de la destruction lors de l'abattage des arbres par des opérateurs forestiers privés accrédités par le gouvernement, les jeunes exploitants se tournent vers une cacaoculture sans arbres d'ombrage ou procèdent eux-mêmes à l'abattage des arbres laissés sur les plantations par leurs ascendants.

La présence des mirides est une préoccupation majeure des producteurs de la région comme souligné par Kpangui (2015). Seulement, les producteurs possédant des plantations de plus de 60 ans, attribuent cette présence des mirides, punaises vertes et autres insectes du cacaoyer dans leurs parcelles par le fait de la mitoyenneté d'avec les plantations de plein soleil. Selon eux, ces insectes ont fait leur apparition dans les années 1990 et 2000 avec l'expansion des nouvelles variétés et la technique du plein soleil.

VII.2. Intérêts des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

L'intérêt que porte aujourd'hui, les producteurs de la zone de Kokumbo aux systèmes agroforestiers l'a été par la découverte. Selon les producteurs, les premières plantations de cacaoyers sous les grands arbres l'ont été par défiance à l'autorité coloniale qui a introduit cette culture. En effet, habitués à produire leurs denrées alimentaires (igname) en plein soleil, ils pensaient que les cacaoyers ne connaîtraient pas un bon développement, une fois abandonnés dans la forêt. La réussite qu'ont connue ces premières plantations, a fortifié les producteurs sur l'importance d'une association entre les cacaoyers et les arbres. Les producteurs de la zone de Kokumbo reconnaissent avant tout deux avantages majeures à la pratique de l'agroforesterie à base de cacaoyers. Ce sont d'une part, la compatibilité des espèces avec les cacaoyers et d'autre part la contribution de celles-ci au plan médical, alimentaire, ornemental et commercial.

▪ Compatibilité des espèces avec les cacaoyers

Les producteurs de la zone de Kokumbo, conduisent leurs plantations en maintenant des espèces locales appartenant aux familles des Sterculiaceae, Anacardiaceae, Euphorbiaceae, Apocynaceae, Moraceae, Combretaceae, qu'ils considèrent comme compatibles avec le cacaoyer d'une part et d'autre part celles qui leurs sont utiles, surtout des espèces introduites par eux-mêmes appartenant à des familles telles que les Lauraceae, Musaceae, Rutaceae, Caricaceae. Ces espèces ont aussi pour rôle de combattre l'enherbement

excessif. En effet, selon les producteurs, les nouvelles variétés de cacaoyers nécessitent plus d'entretiens que la vieille variété (Amelonado) Kpangui (2015). Cependant, le choix des espèces exotiques comestibles et aisément commercialisables telles que les bananiers (*Musa* spp), avocatiers (*Persea americana*), oranger, citronnier, pomplemousses (*Citrus* spp) dénote d'une stratégie de gestion des producteurs qui prend en compte certes l'ombrage dont a besoin les jeunes plants, mais plus encore de l'autoconsommation et la diversification des revenus. En somme, la préférence des espèces résulte d'un compromis entre leurs utilisations domestiques et leur incidence sur le cacaoyer (Sonwa *et al.* 2007). Ainsi, les espèces identifiées comme étant favorables à la culture cacaoyère par un accroissement de la production ou le maintien de la fertilité du sol par les producteurs, sont présentes dans les trois agrosystèmes (tableau X). Selon Isaac *et al.* 2007 et Dupraz & Liagre 2008, le choix de ces espèces peut s'expliquer par le décalage de leur phénologie par rapport à celle du cacaoyer qui pourrait jouer en faveur d'un phénomène de facilitation par l'augmentation de la ressource disponible. Si pour les espèces locales telles le Fromager (*Ceiba pentandra*), l'Iroko (*Milicia* sp.), le Kapokier (*Bombax buonopozense*), l'Acajou (*Khaya grandifoliola*) et le Tiama (*Entandrophragma angolense*), la faculté à maintenir la fertilité du sol est l'argument principal de leur maintien sur les plantations, le choix des espèces exotiques est à contrario fondé sur l'usage domestique. En effet, ces espèces locales ont un ombrage léger et perdent leurs feuilles pendant la saison sèche. Les paysans leur concèdent ainsi également une décomposition rapide des feuilles. Cette appréhension des producteurs rejoint les conclusions de Mollet *et al.* (2000).

- **Contribution au plan médical, alimentaire, ornemental et commercial**

Le choix des espèces végétales locales par les producteurs de cette zone, est secondairement guidé par leur contribution au plan médical, alimentaire, ornemental. Il s'agit principalement de l'akpi (*Ricinodendron Heudelotii*), l'amien (*Alstonia boonei*), le fromager (*Ceiba pentandra*), l'iroko (*Milicia* sp) et offi djédjé (*antiarris africana*). La présence des espèces à usages médicaux atteste d'une bonne connaissance de leurs vertus par les paysans. Leur importance dans les plantations pourrait se justifier par le désir des populations de se soigner à l'ancienne et surtout de pérenniser et transmettre ce savoir à la jeune génération. C'est le cas d'*Alstonia boonei* (Apocynaceae) connue sous le nom local d'Amien qui est reconnue pour son efficacité dans le traitement du paludisme (Vroh *et al.* 2014). Par contre certains auteurs (Zapfack *et al.* 2002, Adou & N'Guessan, 2006) lient la présence de ces espèces dans les plantations, à l'incapacité des producteurs à les abattre. Cependant, leur

contribution à la diversification des produits alimentaires ou des sources de revenus des producteurs leur offre une place de choix dans la gestion des exploitations cacaoyères. Ceci a pris beaucoup d'importance pour les producteurs de la zone de Kokumbo. Cela est aussi vrai pour les autres producteurs depuis les crises successives des années 1980 (Bidzanga *et al.* 2009, Tano 2012).

Dans cette zone, le maintien des espèces reconnues non favorables à la culture du cacao est fondé sur l'utilisation qu'ils en font. En effet, elles sont utilisées comme bois de chauffage et/ou bois d'œuvre. Gôli kpakpa (*Albizia zygia*), Kanankpli yassoua (*Vitex sp.*), Offi djedje (*Antiaris africana*), samba (*Triplochiton scleroxylon*) et le Walê (*Cola gigantea*). En réalité, les différentes associations, combinaison ou interaction des espèces présentent sur les plantations et aux alentours, sont mal connues. Cependant, leur utilisation par les producteurs, reposent sur des connaissances empiriques acquises auprès des parents et transmises de génération en génération.

Les recettes issues des produits forestiers non ligneux et autres fruitiers permettent de préparer la rentrée scolaire pour certains producteurs et de satisfaire d'autres besoins socio-économiques des familles. Cette pratique a été également observée aux Cameroun (Sonwa *et al.*, 2007)

VII.3. Caractéristiques morphologiques et fertilité du sol des agrosystèmes à base de cacaoyers

▪ Caractéristiques morphologiques et physiques du sol des agrosystèmes à base de cacaoyers

Cette étude a révélé qu'au niveau des caractéristiques morphologiques et physiques du sol, aucune variation notable n'est observable d'un type d'agrosystème à base de cacaoyers à un autre. Généralement, les contraintes observées (indurations superficielles et présence d'éléments grossiers) sont identiques le long de la toposéquence.

La description des profils identifie des cambisols qui vont des cambisols au niveau du haut et mi de versant aux cambisols pseudogleyic au niveau des bas de versant selon la WRB (2014). Ces cambisols sont des sols brunifiés dont les caractéristiques morphologiques varient très peu quel que soit le niveau de la toposéquence. Ils sont affectés en profondeur par des phénomènes d'hydromorphie. Ces résultats ont été montrés par Yao-Kouamé (2007) dans la zone de Toumodi. Ce sont des sols qui présentent parfois des contraintes morphologiques le long des paysages qui se résument à une induration superficielle, avec une abondance d'éléments grossiers, à une texture limono-sableuse et à l'hydromorphie.

Les sols de la zone de Kokumbo se caractérisent par une induration qui se situe à moins de 100 cm de profondeur qui se présente sous forme de cuirasse et est souvent associée à des gravillons dont le taux est compris entre 20 et 70 p.c. Selon Brou (2005), la présence de cette induration serait la conséquence d'une alternance de périodes humides de courte durée et de périodes sèches de plus en plus longues. En effet la pluviométrie de la zone de Kokumbo est bimodale où les périodes de pluies alternent avec les périodes de sécheresse avec des intensités variables d'une année à l'autre. La prédominance des sols cuirassés dans les paysages a également été mise en évidence par Koné (2007) au Nord de la Côte d'Ivoire, zone à saisons très contrastées. Les résultats obtenus concordent également avec ceux de Koko (2008) et de Kassin *et al.* (2008 & 2012) au Sud- Ouest, dans les régions de Méagui et de San- Pédro.

La contrainte morphologique principale des sols des agrosystèmes à base de cacaoyers étudiés dans la zone est l'abondance des éléments grossiers avec un taux qui pourrait s'évaluer à plus de 50 P.c. L'abondance de ces éléments grossiers (graviers, cailloux, etc.) est aussi associée à la cuirasse. Koko *et al.* (2008) ont également révélé que la cuirasse et les éléments grossiers sont fréquemment observés sur certaines positions topographiques des sols.

La texture limono-sableuse et l'hydromorphie caractérisent également ces sols. Les contraintes morphologiques des sols à la cacaoculture ont été démontrées par Koko (2008) dans le Centre-Ouest et le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Ces contraintes morphologiques ont une incidence sur la cacaoculture dans la mesure où la profondeur du sol est fondamentale quant à la mise en place de cette culture. Selon les travaux de Koko (2008), une profondeur de sol de moins de 100 cm n'est pas propice à la cacaoculture car sa durabilité n'y est pas garantie à cause du développement de la racine pivotante. Les éléments grossiers ont des actions similaires à celle de la profondeur selon Kassin (2009). La conséquence immédiate de l'action de l'induration à moins de 100 cm de profondeur et du taux d'éléments grossiers élevé est le déficit hydrique qui causerait la mortalité des pieds du cacao. Jagoret & Jadin (1993) ont indiqué les mêmes préoccupations pour des sols indurés et à forts taux gravillonnaire au Togo.

- **Caractéristiques chimiques et fertilité du sol des agrosystèmes à base de cacaoyers**

Cette étude a montré que la fertilité globale des sols de Kokumbo est satisfaisante si l'on tient compte des valeurs normatives référées par (Howeler, 1996, 2001 ; Giroux & Audesse,

2004 ; Doucet, 2006 et Koko *et al*, 2008). De même, des équilibres importants entre les différents minéraux sont également observés, notamment l'équilibre K/Mg (Optimum fixé à 0,05-0,1). Cependant, les déséquilibres Ca/Mg (Optimum fixé à 2-9), et Ca+Mg/K (Optimum fixé à 12-15) observés respectivement sur les AGM et AGC, pourraient inhiber l'absorption des minéraux (phosphore-P et potassium-K) responsables de la fructification, de la nouaison, le développement des chérelles et la consolidation des cabosses. Des études menées en Côte d'Ivoire et ailleurs (Lotode & Jadin, 1981 ; Koko, 2008 ; Ouattara *et al.*, 2017) recommandent une correction minérale par apport des engrais chimiques. L'apport d'engrais minéral est une solution certes satisfaisante dans l'immédiat, mais ne s'inscrit pas dans la durabilité. Elle n'est efficace que par la répétition de l'amendement recommandé. Elle est onéreuse pour les petits producteurs à moyen et long termes. Ainsi, on pourrait opter pour un SAF à base de cacaoyers où les plantes associées sont choisies en fonction de leur capacité à établir un équilibre nutritionnel dans le sol.

Les relations de corrélations entre les paramètres physiques et chimiques positives obtenues dans les agrosystèmes mixte et complexe justifient d'une fertilité satisfaisante des sols desdits agrosystèmes à base de cacaoyers. Cette bonne disponibilité minérale des sols des agrosystèmes à la cacaoculture serait liée à la présence et à la densité des espèces arboricoles associées dans les plantations de cacaoyers par effet d'ombrage, qui, éviterait une éventuelle dégradation des sols au profit de leur enrichissement en éléments minéraux. Il y a donc une certaine liaison qui existe entre les besoins minéraux d'une cacaoyère et son mode de mise en place par systèmes agrosystèmes. L'influence de la richesse minérale du sol sur la production en cacao dépend du degré d'ombrage permanent de l'agrosystème (Freud *et al.*, 2000, Assiri, 2006). La persistance de la végétation et surtout la sélection des espèces contribue à une amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol. L'amélioration des teneurs en matière organique du sol notées dans les parcelles des agrosystèmes mixtes et complexes est due principalement à la présence continue des espèces végétales qui, par la chute des feuilles, constitue une source durable d'apport de litière au sol (Soro *et al.*, 2016). Sonwa *et al* (2007) affirment également que la chute des feuilles des cacaoyers et des espèces associées, assure une partie de la fertilité du sol des agrosystèmes et limite ainsi l'utilisation des fertilisants sur ces parcelles.

VII.4. Rendement et productivité des plantations cacaoyères dans les systèmes agroforestiers

▪ Rendement et productivité des plantations cacaoyères

Cette étude a révélé que les paramètres de rendement ainsi que la productivité des plantations cacaoyères ont été meilleurs en système agroforestier simple ou de plein soleil, bon en système agroforestier mixte et moins bon en système agroforestier complexe. Le faible rendement obtenu sur les AGC et AGM, est dû à la triple action contraignante de la variété de cacao utilisé pour la mise en place des parcelles d'une part, ensuite l'âge moyen des parcelles constituant ces agrosystèmes et enfin, la densité des espèces végétale associées. En effet, les résultats montrent que 100 p.c. des plantations AGC, ont été mise en place avec l'ancienne variété « français », alors celles des AGM, sont majoritairement mise en place avec la même variété « français et ghana », tandis que les plantations du PSOL sont les résultats d'un mélange du « français, ghana et mercedes » avec une bonne proportion du dernier cité. Il est toutefois communément admis que la variété Forastero Haut-Amazonienne et les hybrides récents sont plus productifs que l'Amelonado. Les plantations du groupe AGC sont les plus anciennes (âge > 60ans), celles des AGM ont leur âge compris entre 30 et 60 ans. Les parcelles de ces deux groupes ont largement dépassé l'âge pour le déclin de la production (25-30 ans) selon Koko (2014). Laryea (1971) soutient que le rendement des cacaoyers âgés baisse du fait du déclin biologique. Les faiblesses de rendement du cacao des plantations dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers mixtes et complexes comparativement à celle d'un plein soleil sont également liées aux conditions environnementales (densité d'arbres associés et ombrage, humidité, pluviométrie) qui influencent fortement la productivité d'un cacaoyer dans ces systèmes agroforestiers. En effet, l'ombrage résultant de la densité des arbres associés, modifie la quantité de lumière, les températures et les mouvements d'air dans la cacaoyère et affecte directement l'activité photosynthétique, il s'en suit une réduction de la production des cabosses (Zuidema *et al.*, 2005 ; Almeida & Valle, 2007). Cela a été observé par Deheuvels (2011) qui signale que, lorsque certains facteurs écologiques ne sont pas à leur optimum, surtout la pluviométrie, la régulation de certains facteurs tels que l'ombrage serait nécessaire. L'ombrage dense et excessif, favorise le développement de la pourriture brune observée dans les AGC, surtout au bas-versant. Ce résultat pourrait expliquer la différence de rendement telle qu'observée entre les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers simple ou de plein soleil, mixte et complexe étudiés. Boulay (1998) et Mossu (1990) affirment en effet qu'un ombrage excessif crée un microclimat plus humide qui favorise la prolifération de

maladies (la pourriture brune) et réduit la production des systèmes agroforestiers mixtes et complexes. Par ailleurs, l'une des raisons qui militent en faveur de l'ombrage est que la longévité des cacaoyers est moindre dans les systèmes plein soleil que sous ombrage mixte et complexe (Ahenkorah *et al.*, 1974).

▪ **Relation productivité des plantations cacaoyères et systèmes agroforestiers**

Au regard des résultats obtenus dans la zone d'étude, le système agroforestier mixte paraît plus intéressant dans l'amélioration de la structure du sol et de son enrichissement en éléments minéraux disponibles pour un bon rendement cacaoyer. Ceci rejoint les conclusions de Geilfus (1994) qui prouvent une densité de 100 à 150 arbres associés par hectare dans une cacaoyère pour observer un effet bénéfique de cette combinaison par le cacaoyer. Il pourrait donc constituer en termes de rendement et de production du cacaoyer, un bon compromis entre les systèmes agroforestiers simples ou de plein soleil et complexe. En effet, la présence modérée d'arbres associés dans ces systèmes réduit les risques d'ombrage excessif et les effets de concurrence pour les ressources nutritives du sol. Au-delà de cet aspect, certaines espèces associées par les planteurs dans les plantations de cacao pour leur effet fertilisant ou leur action humidifiante sur le microclimat en saison sèche telles que le fromager (*Ceiba pentandra*), le fraké (*Terminalia superba*) et *Newbouldia laevis* sont déconseillés par les structures d'encadrement des planteurs nationales que sont l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER) et le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) sur l'intérêt de ces arbres par raisonnement logique, faute de preuves scientifiques irréfutables (Sanial, 2014 ; Smith-Dumont *et al.*, 2014).

Conclusion partielle

Les agrosystèmes étudiés sont conservatrices d'un certain niveau de biodiversité, qui sont écologiquement et économiquement utiles pour les producteurs. Elles conservent et maintiennent les paramètres physico-chimiques des sols sous cacaoyers, surtout les agrosystèmes mixte (AGM) et complexe (AGC) bien que les rendements et la production ne sont pas les meilleurs. Les rendements (293,61 kg.ha⁻¹) sur les parcelles AGM, proches de la moyenne nationale qui est comprise entre 260 et 600 kg.ha⁻¹ sont une bonne moyenne en prenant en compte les contraintes liées à l'âge, à la variété de la semence et à la pluviométrie.

CONCLUSION GÉNÉRALE, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude, chaque agrosystème forestier a des caractéristiques bien distinctes qui se resument principalement à la densité des arbres associés. Ainsi, une faible densité des arbres associés a été observée dans l'agrosystème de plein soleil comparativement aux agrosystèmes mixte et complexe. Aussi, cette étude a-t-elle permis de révéler que ces trois types d'agrosystèmes sont pratiqués à Kokumbo dans le département de Toumodi depuis des décennies pour les plus complexes par les producteurs, alors que le plein soleil est de pratique plus récente. Cependant, l'intérêt dans la mise en place des plantations cacaoyères répond à trois critères : premièrement à l'objectif du producteur, deuxièmement à son expérience agricole en cacaoculture et enfin troisièmement à l'ignorance du paysan. Toutefois, l'objectif de notre travail étant d'apprécier l'impact de ces agrosystèmes forestiers à base de cacaoyers sur la fertilité des sols et leur productivité, les paramètres physico-chimiques ainsi que les rendements ont été respectivement évalués.

Il ressort donc de cette étude que les sols sous cacaoyers sont tous des cambisols avec une profondeur de moins de 100 centimètres. Morphologiquement, aucune distinction notable n'est observable quel que soit le niveau de la toposéquence d'un type de système d'agrosystèmes à base de cacaoyers à un autre. Cependant, certaines contraintes ont été observées, notamment, l'induration et les éléments grossiers qui pourraient avoir une incidence sur la cacaoculture à cause de la faible profondeur du sol.

Au niveau de la fertilité des sols des agrosystèmes, les valeurs des paramètres de fertilité obtenues indiquent globalement un niveau de fertilité des sols bien satisfaisants et cela quel que soit l'agrosystème forestier simple ou de plein soleil, mixte ou complexe. Cependant, l'agrosystème forestier à base de cacaoyers mixte paraît plus intéressant dans l'amélioration de la structure du sol et de l'enrichissement en éléments minéraux disponibles pour un bon rendement et une durabilité de la production du cacaoyer. Il pourrait donc constituer en termes de rendement et de production du cacaoyer, un bon compromis entre les systèmes agroforestiers de plein soleil et complexe. Cependant, les rendements et la productivité des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers ne suivent pas cette fertilité. Ils ont été respectivement meilleurs pour le plein soleil, le mixte et enfin le complexe. Au regard des objectifs assignés et des hypothèses émises, on peut retenir que les résultats obtenus de cette étude ont répondu à nos attentes.

RECOMMANDATIONS

L'objectif général de notre travail est d'apprécier l'impact des agrosystèmes forestiers à base de cacaoyers sur la structure et la fertilité des sols en vue d'améliorer le rendement et la productivité du cacaoyer à Kokombo, notre zone d'étude. Pour ce faire, nous recommandons :

- ❖ Aux producteurs de cacao dans la Sous-préfecture de Kokumbo en région centre de la Côte d'Ivoire de :
 - pratiquer la cacaoculture en système agroforestier mixte (100 à 150 arbres par hectare) ;
 - utiliser des variétés hybrides à même de performer en système d'agroforestier mixte sur une longue période,
 - rendre homogène la densité des espèces végétales associées (100 à 150 arbres par hectare) à la cacaoculture pour une durabilité de la production,
 - faire la régénération des plantations de plus de 40 ans.
- ❖ Aux autorités, de faire la promotion de la loi sur le foncier rural et permettre aux producteurs de disposer facilement du certificat du foncier rural. Ainsi, le problème de la propriété de l'arbre trouverait une solution
- ❖ A la communauté scientifique de trouver une combinaison des espèces végétales qui garantissent la fertilité du sol et la productivité des cacaoyers.

PERSPECTIVES

A l'analyse de l'ensemble des résultats obtenus, il ressort que l'évaluation des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers pose problème. En effet, ils doivent être étudiés sur le long terme pour appréhender les différents aspects de leur durabilité (écologique, agronomique et socio-économique) d'une part, ensuite les interactions qui s'exercent au sein de ces systèmes pour le partage des ressources entre les espèces végétales associées entre elles et avec les cacaoyers.

Afin de mieux faire la promotion du système agroforestier à base de cacao dans la zone de transition forêt-savane en particulier et dans toute la zone de production en général, nous suggérons pour les travaux futurs :

- une caractérisation physico-chimique et biologique plus approfondie des sols d'un plus grand nombre d'agrosystèmes forestiers à base de cacaoyers dans le département de Toumodi en zone de transition forêt-savane et, dans d'autres zones, notamment, en zone forestière où la cacaoculture est bien implantée;
- une étude interdisciplinaire sur le processus dynamique et les interactions entre les composantes des systèmes agroforestiers ;
- une étude socio-économique sur les aspects fonciers et des droits d'usage de la domestication des espèces végétales dans les agrosystèmes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abawi G.S. & Widmer T.L. (2000).** Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology*. (15) : 37–47.
- Adechina O. (2017).** Définition de la qualité des sols par bioindicateurs dans deux zones agro-écologiques de la Côte d’Ivoire : Cas des sols sous cultures arachidières à Ahoué et à Gogbala. Thèse de doctorat, UFR STRM, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d’Ivoire), 206 p.
- Adou Y.Y.C., Kpangui K., Vroh B.T.A. & Djakaridja O. (2016).** Pratiques culturales, valeurs d’usage et perception des paysans des espèces compagnes du cacaoyer dans des agrosystèmes traditionnelles au centre de la Côte d’Ivoire, *Revue d’ethnoécologie* (9) 20p [en ligne] URL : <http://ethnoecologie.revues.org/2474>
- Adou Yao C.Y. & N’Guessan E.K. (2006).** Diversité floristique spontanée des plantations de café et de cacao dans la forêt classée de Monogaga, Côte d’Ivoire. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 157 (2) : 31-36.
- AFAF. (2014).** L’agroforestrie en 10 questions. Association Française d’Agroforestrie, 2p <http://www.agroforestrie.fr/agroforestrie-contributions.php>.
- Affou Y. & Tano K. (1988).** La boucle du cacao en Côte d’Ivoire : une situation migratoire inversée, communication à la 3ème journée démographique de l’ORSTOM, Paris, 20-22 septembre 1988, 12p. <http://couche.documentation.ird.fr/exldoc/pleins>.
- Affou Y.S. & Gourène G. (2005).** Guide pratique de la recherche scientifique. Collection pédologie. Editions universitaire de Côte d’Ivoire, Université de cocody-Abidjan, 67 p.
- Ahenkorah, Y., Akrofi, G.S., & Adri A.K. (1974).** The end of the first cacao shade and manorial experiment at the Cacao Research Institute of Ghana. *J. Hort. Sci.* 49: 43–51.
- Aikpokpodion P.E. (2010).** Nutrient dynamics in cocoa soils, leaf and beans in Ondo State, Nigeria. *J Agri. Sci.*, 1(1): 1-9.
- Akanbi O.S.O., Ojeniyi S.O., Famaye A.O., Ipinmoroti R. R., Oloyede A.A., Oyewumi I. K., Ayegbonyin K., Adejobi K. B., Idrisu M. (2014).** Soil nutrients and cocoaseedling performance as influenced by plant residue ash and NPK fertilizer addition on a depleted soil in Ibadan, South Western, Nigéria. *Int. Res. J. Agric. Sci. Soil sci.* 4(1) : 1-4.

- Aké-Assi L. (1984).** Flore de la Côte d'Ivoire : Étude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Thèse de Doctorat d'État, Faculté de Sciences et Techniques, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1206 p.
- Almeida A.A.F. & Valle R.R. (2007).** Ecophysiology of the cacao tree. *Braz. J. Plant. Physiol.*, 19(4): 425–448.
- Aloko-N'guessan J., Djako A. & N'Guessan K. G. (2014).** Crise de l'économie de plantation et modification du paysage agricole dans l'ancienne boucle du cacao : l'exemple de Daoukro. *European Scientific Journal*, February 2014, Vol. 10 n°5: 308-324.
- Altieri M. & Pengue W. (2006).** GM soybean: *Latin America's new coloniser*. Seedling. January: 13 - 17.
- Alvim P. de T. & Seeschaaf K.W. (1968).** Die back and death of cacao trees caused by a new species of parasitic tree. *Nature*, 219 (5161), 1386, London : 364-368.
- Anader (2016).** Rapport d'activité annuel, 70 p.
- Anonyme (2003).** Monographie du département de Toumodi. éd. ANADER, MINAGRI, Toumodi (Côte d'Ivoire), 70 p.
- Asare R. (2005).** Cocoa agroforests in West Africa. A look at activities on preferred trees in the farming systems. Ed. Forest and Landscape, Denmark, 89 p.
- Assiri A. A. (2007).** Identification des pratiques paysannes dans la conduite des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 61 p.
- Assiri A. A. (2006).** Identification des pratiques paysannes dans la conduite des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, UFR STRM, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 56 p.
- Assiri A. A., Kacou E. A., Assi F. A., Ekra K. S., Dji K. F., Couloud J. Y & Yapo A. R. (2012).** Rentabilité économique des techniques de réhabilitation et de replantation des vieux vergers de cacaoyers (*Theobroma cacao L.*) en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 14: 1939-1951 <http://www.m.elewa.org/JAPS>; ISSN 2071 – 7024.
- 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.

- Avenard J-M., Bonvallet J., Latham M., Renard-Dugerdil M. & Richard J. (1973).** Le contact forêt-savane en moyenne Côte-d'Ivoire. *Annales de Géographie*, 82 (453) : 513 - 544.
- 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.
- Bado B. V. (2002).** Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, Québec, Canada, 149 p.
- Bakayoko S. (2007).** Amélioration de la productivité du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) en Côte d'Ivoire : cas des variétés améliorées et influence de la fertilité organique. Thèse de Doctorat d'Agro-pédologie, UFR des Sciences de la Terre et Ressources Minières, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 187p.
- Bardgett R.D., (2002).** Causes and consequences of biological diversity in soil. *Zoology (Jena)*. 105: 367–374.
- Bastida F., Zsolnay, A., Hernández, T. & García, C., (2008).** Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147 : 159 –171.
- Baize D. & Jabiol B. (2011).** Guide pour la description des sols - Nouvelle édition. 448 p.
- Beaud J.P. (1997).** L'échantillonnage. Chap.8, p 185-215, In *Gautier B. (réd) Recherche sociale: de la problématique à la collecte de données*. 3^{ème} édition, presses de l'Université du Québec, sainte-foy, 529 p.
- Bellier L. & Lefèvre C. (1968).** Les rongeurs nuisibles au cacaoyer. Rapport préliminaire. Paris (France) : ORSTOM-IFCC, 15 p.
- Berthelin J. Girard M. & Robert M. (2011).** Sol et environnement 2^{ème} édition chapitre 36 : La ressource en sols : Menaces, nouveaux enjeux et mesure de protection, Dunod. Paris. 896 p.
- Beylich A., Oberholzer H.-R., Schrader S., Höper H. & Wilke B.-M. (2010).** Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil Tillage Res.* 109: 133–143.
- Bidzanga N, Fotsing B., Agoume V., Birang M. A., Onguene A. N. & Zapfack L., (2009).** Mycotrophie et connaissances paysannes des essences fertilitaires dans les agroforets a base de cacaoyers du sud Cameroun. *Cameroon Journal of Experimental Biology*, 05 (02): 79 – 86.

- Bispo A., Blanchart E., Delmas A.B. & Laval K., (2011).** Indicateurs de la qualité des sols. In : Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. & Morel J.L. (Eds) *Sols et Environnement* : 2e édition, Dunod, Paris, Chapitre 21, pp 509-527.
- Bispo A., Cluzeau D., Creamer R., Dombos M., Graefe U., Krogh P., Sousa J., Peres G., Rutgers M. Winding A. & Römbke J. (2009).** Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 5, 717 p.
- Blanc-Pamard C. (1978).** Espace vécu et milieu de contact forêt-savane chez les paysans Baoulé et leurs enfants dans le Sud du « V Baoulé » Côte d'Ivoire. *Cahier ORSTOM, Série Sciences Humaines*, 15 (2) : 145 - 172.
- Boeuf-Tremblay V., Plantureux S. & Guckert A. (1995).** Influence of mechanical impedance on root exudation of maize seedlings at two development stages. *Plant Soil* 172: 279-287.
- Bongers T. (1990).** The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83 : 14–19.
- Boni D. (1978).** Aspects géographiques du binôme Cacao-Café dans l'économie ivoirienne. Les Nouvelles Éditions Africaines, Abidjan, Côte d'Ivoire, 111 p.
- Bonneau M. & Souchier B. (1994).** Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. Deuxième Editions. Masson, Paris, France, 665 p.
- Bouchez T., Bliex A.L., Dequiedt S., Domaizon I., Dufresne A., Ferreira S., Godon J.J., Hellal J., Joulian C., Quaiser A., MartinLaurent F., Mauffret A., Monier J.M., Peyret P., Schmitt-Koplin P., Sibourg O., D'oiron E., Bispo A., Deportes I., Grand C., Cuny P., Maron P.A. & Ranjard L. (2016).** Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environ. Chem. Lett.* 14 : 423–441.
- Boulay M. (1998).** Étude de la phénologie de différents hybrides de cacaoyer associés à six espèces d'arbres d'ombrage, Mémoire de maître ès sciences. Université Laval, Canada, 74 p
- Braudeau J. (1969).** Le cacaoyer. Ed. G.P. Maisonneuve et Larose, 304 p.
- Briske D., Fuhlendorf S. & Smeins F (2003).** Vegetation dynamics on rangelands : a critique of the current paradigms. *J Appl Ecol* (40) : 601–614.
- Brou Y.T. (2005).** Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 332p.
- Burle L. (1961).** Le cacaoyer. (Tome premier). Paris (France) : Maisonneuve et Larose, 316 p.

- Caldwell B.A. (2005).** Enzyme activities as a component of soil biodiversity: *a review*. *Pedobiologia* (Jena). 49 : 637–644.
- Carrière S. (1999).** « Les orphelins de la forêt » : influence de l’agriculture itinérante sur brûlis des Ntumu et des pratiques agricoles associées sur la dynamique forestière du sud Cameroun. Thèse de Doctorat, Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier II, Montpellier, 376 p.
- CCC. (2017).** Evolution de la filière du café-cacao de 2012 à 2017. 60 p
- CEAEQ (Centre d’expertise en analyse environnementale du québec). (2012).** Détermination de la granulométrie, MA. 100 – Gran. 2.0, Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs du Québec, 2010, 11 p. Disponibles auprès de www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/Ma100Gran20.pdf.
- CGDD (2015).** Le point sur l’occupation des sols en France, L’occupation des sols en France : progression plus modérée de l’artificialisation entre 2006 et 2012. Observation et statistiques (219). 8 p. www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr.
- Chauveau J-P. (1979).** Les cadres socio-historiques de la production dans la région de Kokumbo (pays baoulé, Côte d’Ivoire). *Cahier ORSTOM sciences humaine*, Volume n°7, Bondy (France), 228 p.
- Chevalier A. (1906).** Les exigences naturelles du cacaoyer. *Journal d’Agriculture Tropicale*. 319 p.
- Chweya J. A. & Ezaguirre P. B. (1999).** The biodiversity of traditional leafy vegetables. IPGRI, Rome (Italie), 185 p.
- Cissé A. (2013).** Caractérisation phytoécologique et estimation de la biomasse des espèces arborescentes des agrosystèmes à base de cacao du département de Lakota (Centre-Ouest, Côte d’Ivoire). Mémoire de Diplôme d’études approfondies de botanique. Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, 64 p.
- Clough Y., Barkmann J., Juhbandt J., Kessler M., Wanger T. C., Anshary A., Buchori D., Cicuzza D., Darras K., Putra D., Erasmi S., Pitopang R., Schmidt C., Schulze C.H., Seidel. D., Steffan-Dewenter I., Stenchly K., Vidal S., Weist M., Wielgoss A.C. & Tschardt T. (2011).** Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (20) : 8311-8316.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L.,**

- Arrouays D., Bispo A. & Pérès, G., (2012).** Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur. J. Soil Biol.* 49: 63–72.
- Cole L., Bradford M.A., Shaw P.J.A. & Bardgett R.D. (2006).** The abundance, richness and functional role of soil meso- and macrofauna in temperate grassland-A case study. *Appl. Soil Ecol.* 33 : 186–198.
- CPCS. (1967).** Commission de Pédologie et de Cartographie des sols, classification des sols : Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes des sols. Service de classification des sols. INRA, France. 96 p.
- Culman S.W., Young-Mathews A., Hollander A.D., Ferris H., Sánchez-Moreno S., O’Geen A.T. & Jackson L.E. (2010).** Biodiversity is associated with indicators of soil ecosystem functions over a landscape gradient of agricultural intensification. *Landscape. Ecol.* 25: 1333–1348.
- De Groot R.S., Wilson M.A. & Boumans R.M.J. (2002).** A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecol. Econ.* 41 : 393–408.
- 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. SUPAGRO, Montpellier, France, 185 p.
- Deheuvels O., Avelino J., Somarriba E. & Malezieux E. (2012).** Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 149: 181-188.
- Dogniméton S., Koutoua A., Ferdinand G. B. Z., Abraham G., Jacques N. K. N., Sidiky B., Andres T., Pascal T. K.A. & Justin Y.K.. (2016).** Toward sustainability in soil fertility management in cocoa production in Côte d’Ivoire, *International Journal of Current Research*, 8, (02), 25992-26000.
- Dominati E., Patterson M. & Mackay A. (2010).** A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69: 1858–1868.
- Doran J.W. & Zeiss M.R. (2000).** Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3–11.
- Doran J.W. (2002).** Soil health and global sustainability: Translating science into practice. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88 : 119–127.

- Doucet R. (2006).** Le climat et les sols agricoles. ed. Berger, Eastman, Québec, xv, 443 p.
- Dupraz C. & Liagré F. (2008).** Agroforesterie : des arbres et des cultures. Editions France Agricole, Paris, 415P.
- Eijsackers H. (1983).** Soil fauna and soil microflora as possible indicators of soil pollution. *Environ. Monit. Assess.* 3 : 307–16.
- Eldin M. (1971).** Le climat. In: *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. éd. ORSTOM, Paris (France), pp 77-108.
- Essola ELC. (2014).** Évaluation des rendements potentiels en cacao (*Theobroma cacao* L.) dans les systèmes agroforestiers complexes en zone forestière à pluviométrie bimodale du centre Cameroun. Mémoire de diplôme d'ingénieur agronome. Université de Dschang, Ebolowa, Cameroun, 64 p.
- Faber J. & Van Wensem J. (2012).** Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Sci Total Environ*, 415 : 3-8.
- FAO (2002).** La Séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres rapport basé sur le travail de Michel Robert. 59 p.
- FAO (1983).** Land Evaluation for rainfed agriculture. FAO. Soils Bulletin N°52 162 p.
- Franca J. & Borrás S. (2013).** Land concentration, land grabbing and people's struggles in Europe. Published by the Transnational Institute (TNI) for European Coordination Via Campesina and Hands of the Land network. 236 p.
- Freud E. H., Petithuguenin P. & Richard J. (2000).** Les champs de cacao : un défi de compétitivité Afrique Asie. Editions *Karthala et CIRAD*, Paris, 207 p.
- Garcia-Ruiz-Ruiz R., Ochoa V., Viñegla B., Hinojosa M.B., Peña-Santiago R., Liébanas G., Linares J.C. & Carreira J.A. (2009).** Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Applied Soil Ecology*, 41: 305–314.
- Geilfus F. (1994).** El árbol al servicio del agricultor, Manuel de agro foresteria para el desmollo rural, Principios y tecnicas, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1: 144 p.
- Gerlach J., Samways M. & Pryke J. (2013).** Terrestrial invertebrates as bioindicators: an overview of available taxonomic groups. *J. insect Conserv.* 17: 831–850.
- Girard M.C., Schwartz C. & Jabiol B. (2011).** Étude des sols, description, cartographie, utilisation. Coll. Sciences sup., Dunod, Paris. 432 p.

- Giroux M. & Audesse P. (2004).** Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15 : 107-110.
- Gobat J., Aragno M. & Matthey W., (2010).** Le sol vivant: Bases de pédologie, Biologie des sols. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 3ème éd., 817 p.
- Gockowski J. & Sonwa D. (2010).** Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO2 emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rain forest of West Africa. *Environmental management*, 48 : 307-321.
- Godot G. (1987).** Synthèse générale des rapports nationaux sur la mosaïque africaine du manioc et son contrôle. *In* : Colloques et Séminaires sur la mosaïque africaine du manioc et son contrôle du 4 au 8 mai 1987. éd. ORSTOM, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), pp 9-11.
- Gros R. (2002).** Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origine anthropique : réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique. Doctoral dissertation. Université de Savoie. 253 p.
- Guillaumet J. L. & Adjanooun E. (1971).** La végétation de la Côte d'Ivoire. *In* : *Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM*, 50, Paris (France), pp 161- 263.
- Havlicek E. (2012).** Soil biodiversity and bioindication: From complex thinking to simple acting. *Eur. J. Soil Biol.* 49 : 80–84.
- Herzog F. (1994).** Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Côte d'Ivoire. *Agroforestry systems*, 27: 259–267.
- Herzog F. M. (1992).** Etude biochimique et nutritionnelle des plantes alimentaires sauvages dans le sud du V-Baoulé, Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale Zurich (Suisse). 122 p.
- Hiernaux P. (1975).** Étude phytoécologique du pays baoulé méridional (Côte d'Ivoire centrale). Thèse Doctorat Ingénieur, CNRS Montpellier, France, 206 p.
- Howeler R.H. (2001).** Nutrient Inputs and Losses in Cassava-based Cropping Systems. Examples from Vietnam and Thailand. *Southeast Asia* : 20-22.
- Howeler R.H. (1996).** Diagnosis of nutritional disorders and soil fertility maintenance of cassava tropical tuber Crops: Problems, Prospects and Future Strategies. *Oxford and IBH Publishing Co.*, New Delhi, India : 181-193.
- ICCO. (2017).** QBCS, Vol. XLIV No. 1, Cocoa year 2016/17 147 p.
- ICCO. (2012).** Rapport Annuel 2010/2011. ICCO. Londres WC1A. Royaume Uni, : 13-26.
- ICCO. (2008).** Rapport annuel 2008/2009. London WC1A 1NU, United Kingdom, 42 p.

- ISO. (2015).** Norme NF ISO 11074 Qualité du sol, 120 p. - Vocabulaire [WWW Document]
- Isaac M.E., Timmer V.R. & Quashie-Sam S.J. (2007).** Shade tree effects in an 8-year old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 78 : 155-165.
- Jagoret P. (2011).** Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme : application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au Centre Cameroun. Thèse de doctorat. SUPAGRO, Montpellier, France, 236 p.
- Jagoret P, Bouambi E., Menimo T., Domkam I. & Batomen F. (2008).** Analyse de la diversité des systèmes de pratiques en cacaoculture : cas du Centre Cameroun. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 12(4) : 367–377.
- Jagoret P. & Jadin P. (1993).** Recherche d'un itinéraire technique pour la replantation des cacaoyères au Togo. IV. Contribution à une meilleure approche pédologique de la replantation cacaoyère. *Café Cacao Thé*, 37(4): 313-320.
- Jolivet C., Boulonne L. & Ratié C. (2006).** Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) 187 p.
- Jordan D., Kremer R. & Bergfield W. (1995).** Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields. *Biol Fertil Soils* 19: 302-297.
- Karlen D.L., Ditzler C.A. & Andrews S.S., (2003).** Soil quality: Why and how? *Geoderma* 114: 145–156.
- Kassin E., Snoeck D., N'guessan J.C., Yao-Kouamé A. & Camara M. (2016).** Projet de cartographie des sols rapport final CNRA, CIRAD. 17 p.
- Kassin KE. (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, 167 p.
- Kassin K.E., Koko L., Kouadio E. N., Yao-Kouamé A. & Yoro G. R. (2012).** Sols favorables à la cacaoculture au centre-ouest de la Côte d'Ivoire dans un contexte d'assèchement climatique. *Int. J. Chem. Sci.* 6(3) : 1148-1157.
- Kassin K. E., Koné D., Kouamé B., Yoro G. R. & A. Assa. (2008).** Variabilité pluviométrique et perspectives pour la replantation cacaoyère dans le Centre ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied biosciences* 12 : 633 - 641.
- Kebe I.B., N'Guessan F.K., Tahi G.M., Assiri A.A., Koko L.K., Kohi N.J., Irié B.Z. & Koffi N. (2009).** Bien cultiver le cacaoyer en Côte d'Ivoire. *CNRA/CTA*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 4p.

- Keli Z.J., Assiri A.A., Koffi N., N'goran J. & Kébé B.I. (2005).** Evolution de l'amélioration variétale du cacaoyer et des systèmes de production de la cacaoculture en Côte d'Ivoire. *Revue Sciences et Nature*, 2 (2) : 209–218.
- Koffi N J. (2006).** Kokumbo, un village Fahafouè dans le Département de Toumodi: des origines à nos jours. Mémoire de Licence, UFR des Sciences de l'Homme et de la Société, Université de Cocody-Abidjan, Abidjan, Côte d'Ivoire, 33 p.
- Koko K.L., Yoro R.G., N'GORAN 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. (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. (2008).** Influence des caractères morpho-pédologiques et chimiques des sols sur la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat Unique de l'Université de Cocody- Abidjan, Côte d'Ivoire, 2008, 148 p.
- Koko L.K., Kassin K.E., Yoro G., N'Goran K. & Yao-Kouame A. (2009).** Corrélation entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morphopédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences* 24 : 1508-1519.
- Konan D. (2009).** Évaluation de l'impact de la cacaoculture sur la flore et la végétation en zone de forêt dense humide semi-décidue : cas du département d'Oumé. Mémoire de Diplôme d'Études Approfondies de Botanique, UFR Biosciences, Laboratoire de Botanique, Abidjan, Côte d'Ivoire, 45 p.
- Koné B. (2007).** La couleur comme indicateur de la fertilité des sols : utilisation des données pour l'étude de la fertilité potentielle des sols ferrallitiques au-dessus de la latitude 7° N de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan. 146 p.
- Kouakou CV. (2015).** Diversité de la faune mammalienne dans les plantations agroforestières à cacao du Centre de la Côte d'Ivoire : cas de la sous-préfecture de Kokumbo. Mémoire de Master. Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 56 p.
- Kpangui K. B. (2015).** Dynamique, diversité végétale et valeurs écologiques des agrosystèmes à base de cacaoyers de la Sous préfecture de Kokumbo (Centre de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de Botanique, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Côte d'Ivoire, 227 p.

- Kpangui K.B., Kouamé D., Gone B.Z.B., Vroh B.T.A., Koffi B.J.C. & Adou Yao C.Y. (2015).** Typology of cocoa-based agroforestry systems in a forest-savannah transition zone: case study of Kokoumbo (Centre, Côte d'Ivoire). *International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)* 6 (3) : 36-47.
- Larsen T., Schjønning P. & Axelsen J. (2004).** The impact of soil compaction on euedaphic Collembola. *Appl. Soil Ecol.* 26 : 273–281.
- Lavoie S., Nolin M. C., & Sasseville J. L. (1994).** Classification des terres agricoles selon leurs qualités physiques à recevoir des engrais de ferme à l'aide d'un système expert. Dans *Méthodologie d'évaluation et choix stratégiques dans la gestion des surplus de fumiers et lisiers*. J.-L. Sasseville et J. Nolet (eds.). Rapport de recherche no. 374, volume 4. Publié par INRS - Eau, Université du Québec et Consultants BPR. 129 p.
- Leakey R. B. (2001).** Win-win land use strategies for Africa: 2, Capturing economic and environment benefits with multistrata agroforests. *International Forestry Review*, 3: 331 - 340.
- Lena P. (1979).** Transformation de l'espace rural dans le front pionnier du Sud Ouest ivoirien, thèse de troisième cycle, Université de Paris X-Nanterre, 2 tomes, multigr., 526 p.
- Laryea A.A. (1971).** Cocoa rehhabilitation in Ghana. Proc. 3rd international cocoa rst. Conf., Accra, Ghana, 1969: 37-38.
- Lotode R. & Jadin P. (1981).** Calcul des besoins en engrais des cacaoyers. *Café cacao thé*, vol XXV, n°1 : 3-24.
- Mausbach M.J. & Tugel, A. (1997).** Soil quality-A multitude of approaches. *Nat. Resour. Conserv. Serv.* nd., 12 p.
- MEA. (2005).** Ecosystems and human well-being: Synthesis, Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC. 156 p.
- MINEF (2017).** La forêt, une priorité du gouvernement, magazine du ministère des *Eaux & Forêts*, N°1, 40 p.
- Mollet M., Téré H. & Herzog F. (2000).** Ligneux à usages multiples dans les systèmes agraires tropicaux: une étude de cas de Côte d'Ivoire. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 151 (10): 355-364.
- Morris D. (1882).** Cocoa: how to grow and how to cure it. Jamaica, 45 p.
- Mossu G. (1992).** Cocoa. The MacMillan Press Ltd, 103 p.
- Mossu G. (1990).** Le cacaoyer. Série : Le technicien d'Agriculture tropicale. Ed. G.P. Maisonneuve et Larose, 160 p.

- Motamayor J.C. (2001).** Etude de la diversité génétique et de la domestication des cacaoyers du groupe Criollo (*Theobroma cacao* L.) à l'aide de marqueurs moléculaires. Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay, France. 176 p.
- Nahmani J. & Rossi J.P. (2003).** Soil macroinvertebrates as indicators of pollution by heavy metals. *C. R. Biol.* 326: 295–303.
- Nair PK. (2012).** Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Systems* 86 : 243–253.
- Nair P. K. R. (2007).** Perspective the coming of age of agroforestry. *Journal of science of food and agriculture*, 87: 1613 – 1619.
- Nair P. K. R. (1993).** An Introduction to Agroforestry. Kluwer Academic publishers, Dordrecht (the Netherlands), 499 p.
- Nanga C. (2012).** Faire de la cacaoculture une activité rentable, conférence mondiale du cacao, 19-23 novembre 2012, Abidjan-Côte d'Ivoire, 27 p.
- N'Goran K. (1998).** Reflexions sur un système de production durable du cacaoyer: cas de la Côte d'Ivoire, Afrique. In conférence Internationale sur la production durable du cacao, 30 mars au 21 avril 1998, Panama. Smithsonian institution, Washington, DC. USA, 8p.
- N'zué B., Zohouri P. G. & Sangaré A. (2004).** Performances agronomiques de quelques variétés de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) dans trois zones agroclimatiques de la Côte d'Ivoire. *Agronomie africaine*. XVI (2) : 1-7.
- Ofori-Frimpong K., Asase A. & Yelibo MA. 2007.** Cocoa farming and biodiversity in Ghana. Annual report. Earth Watch Institute, 34 p.
- Oro Z. F. (2011).** Analyse des dynamiques spatiales et épidémiologie moléculaire de la maladie du swollen shoot du cacaoyer au Togo. Thèse de doctorat. Université de Montpellier SupAgro, France. 262 p.
- Oszwald J. (2005).** Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000) : Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat de Géographie, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 304 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 la région de Divo en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied biosciences* 118 : 11754-11767.

- Perraud A. (1971).** Les sols. In : Le Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires ORSTOM*, n° 50, Paris (France) : 263 - 327.
- Piba SC. (2008).** Apport de la flore naturelle dans la vie de la population d'une région cacaoyère en Côte d'Ivoire : cas du département d'Oumé. Mémoire de Diplôme d'études approfondies de botanique, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, 64 p.
- PND. (2012).** Résumé analytique tome 1. 65 p.
- Pokou N.D., N'Goran J. A. K., Lachenaud P., Eskes A.B., Montamayor J. C., Schnell R., Kolesnikova-Allen M., Clement D. & Sangare A. (2009).** Recurrent selection of cocoa populations in Côte d'Ivoire: comparative genetic diversity between the first and second cycles. *Plant Breeding* 128 : 514-520.
- Ponge J. (2012).** Perturbations, organismes et écosystèmes, 13p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00679149/file/Perturbations.pdf>.
- RGPH. (2014).** Resultats globaux.
- Rioux G. (1966).** Les sols du Pays Baoulé. Thèse de doctorat 3è cycle, 4 tomes. Université de Strasbourg (France), 310 p.
- Robinson S.L. & Lundholm J.T. (2012).** Ecosystem services provided by urban spontaneous vegetation. *Urban Ecosyst.* 15: 545–557.
- Ruf F. O. (2011).** The myth of complex cocoa agroforests: the case of Ghana. *Hum Ecol.*, 39 : 373 – 388.
- Ruf F. O. & Schroth G. (2004).** Chocolate Forests and monocultures: A Historical Review of cocoa growing and its conflicting role in tropical Deforestation and forest conservation. In agroforestry and Biodiversity conservation in tropical landscapes. *Island press*, 1718 Connecticut Avenue, N.W., suite 300, Washington, DC (USA): 107 -134.
- Ruf F. (1995).** Booms et crise du cacao, les vertiges de l'or brun, Paris, Karthala, coll. Economie et développement, 459 p.
- Ruf F. (1991).** Les crises cacaoyères. La malédiction des âges d'or? *Cahier d'études africaines.* 31(121-122) : 84 - 134.
- Ruf F. (1988).** Stratification sociale en économie de plantation ivoirienne, thèse de doctorat de troisième cycle à l'Université de Paris-X, 6 Tomes, multigr, 976 p.
- Sanial E. (2014).** À la recherche de l'ombre : analyse du retour des arbres associés dans les plantations de cacao ivoiriennes. Mémoire de master. Université Jean Moulin Lyon 3, 203 p.

- Santorufu L., Van Gestel C.A.M., Rocco A. & Maisto G. (2012).** Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environ. Pollut.* 161: 57–63.
- Schroth G, Faria D., Araujo M., Bede L., Van Bael S. A., Cassano C. R., Oliveira L. C. & Delabie J. H. C. (2011).** Conservation in tropical landscape mosaics: the case of the cacao landscape of southern Bahia, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 20 (8) : 1635-1654.
- Schroth G. & Harvey C.A. (2007).** Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: na overview. *Biodivers. Conserv.* 16(8): 2237–2244.
- Schroth, G., Fonseca da, G.A.B., Harvey, C.A., Gascon, C., Vasconcelos, H.L. & Izac, A.M. N. (2004).** Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. Ed. *Island Press*, Washington. 525 p.
- Schroth G., Krauss U., Gasparoto L., Duarte J.A. & Vohland K. (2000).** Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agrofor. Syst.*, 50: 199–241.
- Smith-Dumont E., Gnahoua GM., Ohouo L., Sinclair FL. & Vaast P. (2014).** Farmers in Côte d’Ivoire value integrating tree diversity in cocoa for the provision of ecosystem services. *Agroforestry System* 88(6): 1047–1066.
- Somarriba E, Cerda R, Orozco L, Cifuentes M, Espin T, Mavisoy H. (2013).** Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems, *Ecosystems and Environment* 173 (2013): 46–57.
- Somarriba E. & Beer J. (2011).** Productivity of Theobroma cacao agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry Systems* 81: 109-121.
- Sonwa D.J., Nkongmeneck B.A., Weise S.F., Tchatat M., Adesina A.A. & Janssens M.J.J. (2007).** Diversity of plants in cocoa agroforests in the humid forest zone of Southern Cameroon. *Biodiversity and Conservation* 16 : 2385-2400.
- Sonwa D. J., Weise S. F., & Janssens M. J. J. (2002).** Conservation et gestion durable des écosystèmes des forêts tropicales humides de l’Afrique centrale, étude de cas d’aménagement forestier exemplaire en Afrique centrale: Les systèmes agroforestiers cacaoyers Cameroun. 49 p.
- Sonwa D.J., S.F. Weise M.Tchatat, B.A.Nkongmeneck, A.A. Adesina, O. Ndoye, & J. Gockowski. (2001).** Rôle des agrosystèmes à cacao dans la foresterie paysanne et communautaire au sud-Cameroun. Document RDFN, n° 25 g (i), 12 p.
- Stauffer M. (2014).** Impact des Taillis à Très Courte Rotation (TTCR) de Saules sur les propriétés fonctionnelles des sols et définition d'indicateurs de qualité. Thèse de Doctorat, Spécialité Géosciences de l’Université de Lorraine. Bondy, 326 p.

- Stone D., Ritz K., Griffiths B.G., Orgiazzi A. Creamer R.E. (2016).** Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied Soil Ecology*. 97 : 12–22.
- Tano M.A. (2012).** Crise cacaoyère et stratégies des producteurs de la sous-préfecture de Méadji au Sud-ouest ivoirien. Thèse de Doctorat, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, France, 263 p.
- Tessier D., Bruand A., Bissonnais Y. & Le. (1996).** Qualité chimique et physique des sols : Variabilité spatiale et évolution. Numéro Spécial *Étude Gest. des Sols* 3 : 229–244.
- Tisdall J.M. & Oades J.M. (1982).** Organic matter and water stable aggregates in soil. *Soil Sci.* 33 : 141–163.
- Torquebiau E. (2007).** L'Agroforestrie des arbres et des champs. Paris : L'Harmattan, 151 p.
- Torquebiau E., Sibelet N. & Mary F. (2002).** Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *Bois et Forêts des Tropiques*, 271 (1) : 23 – 35.
- Touzard J.M. (1993).** L'économie coloniale du cacao en Amérique centrale. Montpellier, France, Cirad, collection Repères, 95 p.
- UNCCD. (2012).** Zero Net Land Degradation A Sustainable Development Goal for Rio+20. 6 p.
- Vaast P. & Somarriba E. (2014).** Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems* 88: 947-956.
- Velasquez E., Lavelle P. & Andrade M. (2007).** (GISQ), a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 39: 3066–3080.
- Vroh B.T.A.; Ouattara D. & Kpangui K.B. (2014).** Disponibilité des espèces végétales spontanées à usage traditionnel dans la localité d'Agbaou, Centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences* 76 : 6386-6396.
- Walkley A. & Black A. (1934).** Etude de la méthode DEGT JAREFF pour le dosage de la matière organique, modification apportée au dosage de l'acide chromique. *Soil Science*, 1934, 37, pp 29-38
- Wallace K.J. (2007).** Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biol. Conserv.* 139 : 235–246.
- Walter C., Bispo A., Chenu C., Langlais-Hesse A. & Schwartz C., (2014).** Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cah. Dem.*: 51–68.
- Wessel M. & Quist-Wessel F.P.M. (2015).** Cocoa production in West Africa, a review and analysis of recent developments. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 74&75: 1-7.

- Wood G.A.R. & Lass R.A. (1985).** Cocoa. Ed. Longman Group Ltd, Essex. Tropical Agriculture Series. 620 p.
- 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-Kouamé A. (2007).** Caractérisque physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Côte d'Ivoire. Rev. CAMES- Série A, Vol. 05: 39-52.
- Zapfack L., S. Engwald, B.Sonké, G. Achoundong, & Madong, B.A. (2002).** The impact of land use conversion on plant biodiversity in the forest zone of Cameroon. Biodiversity and Conservation 11(11): 2047-2061.
- Zuidema P.A., Leffelaar A.F., Gerritsma W., Mommer K. & Anten, N.P.R. (2005).** A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agric. Syst.*, 84 : 195–225.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche utilisées pour la collecte des données de production

FICHE 1 : POSE DES CARRÉS DE DENSITÉ ET DE RENDEMENT

Localité : *Xhissou Key Kouakou*

Campagne : *2017/2018*

1=parcelles AGC

2=parcelles AGM

3=parcelles PSOL

Code producteur	Nom du producteur	Sexe 1=Hom 2=Fem	Type de parcelle*	Année de création de la parcelle	Sup. de la parc. en Ha (déclarée)	Sup. de la parc. en Ha (GPS)	Date de pose du CDR	Nb de pieds du carré	Nb de pieds productifs **	Principale culture associée
NK-1	<i>N'zoran Kouakou Do</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1946</i>	<i>3,5</i>	<i>2,75</i>	<i>14/01/17</i>	<i>12,00</i>	<i>12,00</i>	
NK-2	<i>Allié Kouakou</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>1998</i>	<i>2</i>	<i>1,5</i>	<i>10/01/17</i>	<i>15,00</i>	<i>15,00</i>	
NK-3	<i>Kouakou Kouamé Ouatier</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1950</i>	<i>3</i>	<i>2,5</i>	<i>14/01/17</i>	<i>11,00</i>	<i>11,00</i>	
NK-4	<i>N'guissan Kouadio P.</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>2005</i>	<i>2,5</i>	<i>2,1</i>	<i>11/01/17</i>	<i>14,00</i>	<i>13,00</i>	
NK-5	<i>Kouakou Kouamé N.</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1965</i>	<i>2,5</i>	<i>2,2</i>	<i>11/01/17</i>	<i>13,00</i>	<i>11,00</i>	
NK-6	<i>Banboung Kouadio</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1975</i>	<i>3</i>	<i>2,75</i>	<i>12/01/17</i>	<i>13,00</i>	<i>12,00</i>	
NK-7	<i>Brou Alphonse</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1963</i>	<i>2,5</i>	<i>2,2</i>	<i>12/01/17</i>	<i>13,00</i>	<i>11,00</i>	

** (capables de porter des fleurs et/ou fruit)

FICHE 2 : SUIVI PERIODIQUE DES CARRES DE RENDEMENT

Localité..... NIAM Key - Konankro
 Nom du producteur..... M. Jean Konan Dominique
 Campagne..... 2017/2018

- Type de parcelle : 1
- 1=parcelles AGC
- 2=parcelles AGM
- 3=parcelles PSOL

Date de passage	Nb de cabosses saines mures récoltées (depuis le dernier passage)	Poids des fèves fraîches (Kg)	Poids des fèves sèches correspondant
<u>10/02/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>10/03/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>10/04/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>10/05/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>16/06/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>20/07/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>15/08/2017</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
<u>17/09/2017</u>	<u>8</u>	<u>0,88</u>	<u>0,30</u>
<u>18/10/2017</u>	<u>19</u>	<u>1,94</u>	<u>0,66</u>
<u>17/11/2017</u>	<u>24</u>	<u>2,53</u>	<u>0,86</u>
<u>17/12/2017</u>	<u>13</u>	<u>1,35</u>	<u>0,46</u>
TOTAL			

Fiche 3 : Suivi de la production des CDR

Localité..... Kizimkay - Kouma Kas
 Nom du producteur..... H. Gouan Kouma Dounngue
 Campagne..... 2017/2018

- Type de parcelle : 1
- 1=parcelles AGC
- 2=parcelles AGM
- 3=parcelles PSOL

	R1 Date...	R2 Date...	R3 Date...	R4 Date...	R5 Date...	R6 Date...	R7 Date...	R8 Date...	R9 Date...	R10 Date...	R11 Date.....	R12 Date...	TOTAL
Cabosse (Nbre) sur le CDR	/	/	/	/	/	/	/	/	8	19	24	13	64
Poids des Fèves fraîches sur le CDR (Kg)	/	/	/	/	/	/	/	/	0,88	1,94	2,53	1,35	6,71
Poids des Fèves sèches sur le CDR (Kg)	/	/	/	/	/	/	/	/	0,30	0,66	0,86	0,46	2,28

Fiche 4 : suivi de la production de la parcelle

Localité..... Xiam Key Kouakou
 Nom du producteur..... N. Gouan Kouan Dominafue
 Campagne..... 2017/2018

- Type de parcelle : 1
- 1=parcelles AGC
- 2=parcelles AGM
- 3=parcelles PSOL

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	TOTAL
Nombre de récolte	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4
Quantité récoltée (Kg)	0	0	0	0	0	0	0		80	86	86	46	228
Quantité vendue (Kg)	0	0	0	0	0	0	0		30	66	86	46	228

3. INFORMATIONS GENERALES SUR L'EXPLOITATION

3.1 Données agronomiques

- a. Superficie totale de cacao : 02 Ha, Superficie de cacao en production : 02 Ha
 b. Année de création de la plantation de cacao 1955
 c. Nombre d'années de mise en place de la parcelle 04 ans
 d. Origine des plants 1= tout venant 2= CNRA
 e. Comment l'avez obtenu ? 1= achat 2= don 3= autres
 f. Comment s'est fait la mise en place de votre champ ? 1= semi direct 2= plant de pépinière
 g. Quel type de parcelle a servi à la mise en place de votre plantation (précédent cultural) ?
 1= forêt 2= savane 3= jachère 4= vieille cacaoyère 5= café 6= palmier à huile 7= Cultures vivrières 8= cacaoyère infectée
 9= autres (précisez)
 h. Avez-vous bénéficié d'un encadrement lors de la mise en place de votre parcelle? 1=Oui 2=Non
 i. Si oui, le nom de la structure : 1= ANADER 2= CCC 3= FIRCA 4= CNRA 5= Agro industries (Nestlé, Saco, Cargill, Cemoi) 6= ONG international 7= ONG national 8= organisation international 9= autres (préciser).....
 j. Avez-vous une ancienne plantation hors d'ici ? 1=Oui 2=Non si oui, dans quelle région ?.....
 k. Avez-vous une nouvelle plantation hors d'ici ? 1=Oui 2=Non si oui, dans quelle région ?.....

3.2 Utilisation Des Produits Agrochimiques

- a. Utilisez-vous des fertilisants ? 1= OUI 2= NON
 b. Si OUI, le(s) quel(s) 1= NPK 2= mélange spécial cacao 3= engrais liquide 4= autres
 c. Quelle(s) quantité(s) par an
 i. NPK sacs
 ii. Engrais liquide L
 iii. Mélange spécial cacao -Autre sacs
 d. Utilisez-vous des pesticides ? 1= OUI 2=NON
 e. Si OUI, depuis quand ? 1995
 f. Combien de passage/an : 01 Quantité utilisée/an :
 g. Où achetez-vous vos produits ? 1= Magasin de revendeur agréé 2= table du revendeur
 3= Coopérative 4= organisme gouvernemental 5= vendeur ambulant 6= acheteur de produit
 h. Qui fait les applications ? 1= producteur ; 2= employé ; 3= membre de la famille ;
 4= applicateur agréé ; 5= autres
 i. Utilisez-vous des herbicides ? 1= OUI 2=NON
 j. Si OUI, depuis quand ? Combien de passage /an ? Quantité utilisée/ an :

3.3 Bilan Des Productions

- a. Nombre de récoltes par année ? 06
 b. Bilan des récoltes des cinq (05) dernières années

Année	Production en Kg	Production en sacs de kg
2017	<u>840</u>	<u> </u>
2016	<u>825</u>	<u> </u>
2015	<u>875</u>	<u> </u>
2014	<u>900</u>	<u> </u>
2013	<u>880</u>	<u> </u>

Annexe 3 : Séance de prélèvement des échantillons de sol

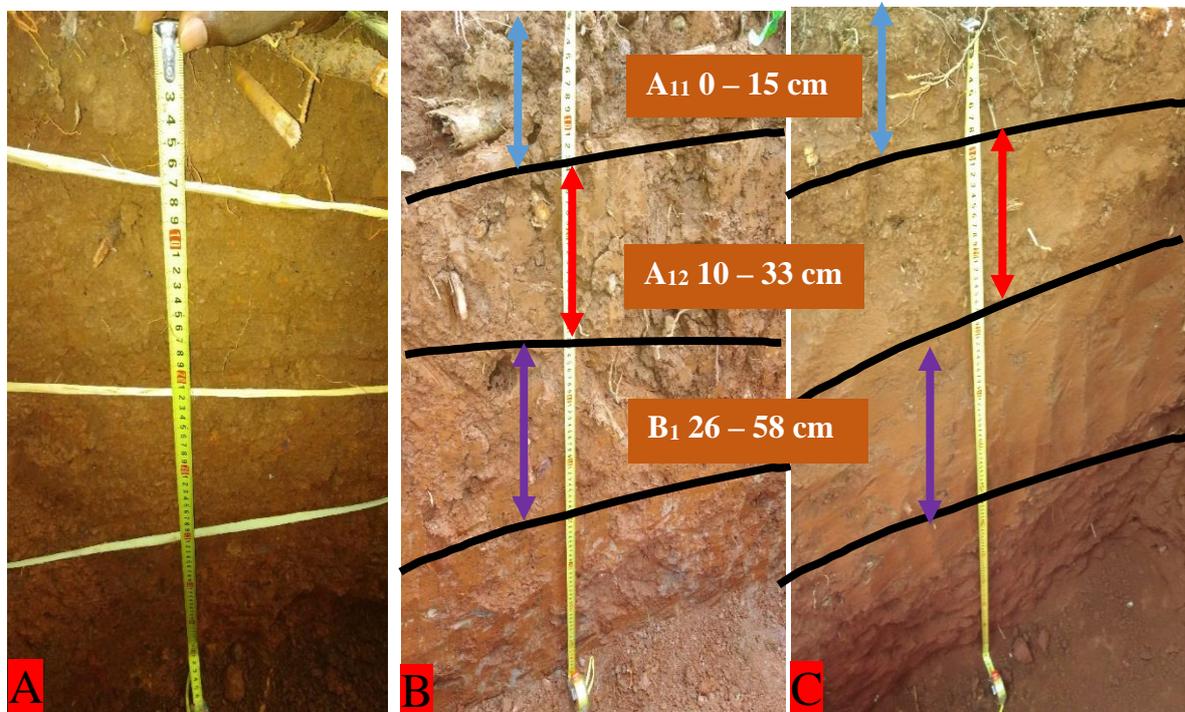


A : Prélèvement à la Tarière



B : Récolte d'un échantillon élémentaire

Annexe 4 : Fosses pédologiques sous les différents agrosystèmes



A : Fosse pédologique sous agrosystème complexe

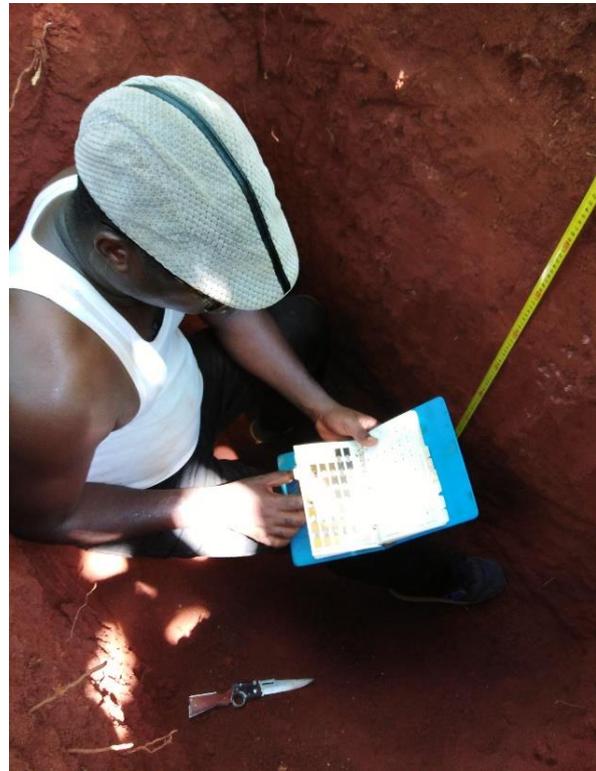
B : Fosse pédologique sous agrosystème mixte

C : Fosse pédologique sous agrosystème simple ou plein soleil

Annexe 5 : Séance de description des profils de sol



C : Enlèvement d'une motte de terre avec un couteau de pedologie



D : Identification de la couleur à l'aide du code munsell

PUBLICATION TIREE DE LA THESE

Evaluation of Physical and Chemical Soil Fertility in Cocoa-Based Agro Systems in the Kokumbo Sub-Prefecture (Central Côte d'Ivoire)

Kouame Amany Guillaumé, Bakayoko Sidiky, N'ganzoua Kouamé René, Konaté Zoumana*, ZRO Bi Gohi Ferdinand

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa / Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie. Département: Agropédologie, Télédétection et SIG, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire)

DOI: [10.36347/SJAVS.2019.v06i09.002](https://doi.org/10.36347/SJAVS.2019.v06i09.002)

Received: 05.10.2019 | Accepted: 12.10.2019 | Published: 23.10.2019

*Corresponding author: Konaté Zoumana

Abstract

Original Research Article

This study was carried out in the Kokumbo sub-prefecture in central Côte d'Ivoire to assess the impact of cocoa-based agrosystems on the physical and chemical characteristics of cocoa soils. This region was chosen for the study because it still houses traditional agroforestry plantations based on cocoa trees and still in production. Soil pits were opened following the toposequence in each type of agroforest for the determination of the physical characteristics of the study site. For the determination of soil chemical parameters, the basic sampling was carried out at the auger at two levels of horizon: 0-20 cm and 20 - 40 cm in zigzag, following the longest diagonal for laboratory analysis. The results obtained showed that regardless of the full sun, mixed or complex forest agrosystem, the values of the fertility parameters obtained indicate overall a very satisfactory soil fertility level. Moreover, the mixed cocoa-based agro-forestry system appears to be more interesting in improving the soil structure and enrichment of available mineral elements and could be recommended to cocoa producers in the area of study.

Keywords: Agrosystems based on cocoa trees, physical and chemical soil fertility, Kokumbo, Côte d'Ivoire.

Copyright © 2019: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution license which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial use (NonCommercial, or CC-BY-NC) provided the original author and source are credited.

INTRODUCTION

Low crop yields in sub-Saharan African countries are generally due to the natural nutrient poverty of soils and the low use of inputs, coupled with the excessive presence of varieties traditional low performance, sensitive to disease and adverse weather conditions [1-3]. Also, the fertility of the soils under the old cocoa trees is experiencing a progressive deterioration of nutrients, notably, organic carbon, nitrogen, phosphorus and potassium because the exports of these mineral elements through the fruits of cocoa (cocoa bud and beans) are not compensated [4-7]. These constraints explain the excessive acreage in Africa to improve productivity and offset low yields [2]. Cocoa (*Theobroma cacao* L.) whose cultural requirements correspond to the edaphic and climatic conditions of the intertropical zone is not exempt from this reality although this culture can adapt to a greater variability of biophysical environments, soil types and climates [8-10]. It is grown in the field under different cropping systems, including full sun, shading and intermediate systems. Research has provided farmers with the opportunity to conduct cocoa in pure or light shade with chemical input applications [11]. However, the forest is and still is the ideal cultural precedent to

guarantee a good vegetative development and a good productivity of a cocoa plantation. Indeed, according to [12], the cocoa tree considered a shade plant has a high productivity when it is totally exposed to light. This perpetual search for maximizing cocoa production has led producers to new fronts of forest clearing, thus constituting one of the main causes of forest cover degradation in the tropical world [13]. Forest cover degradation and biodiversity is due to anthropogenic activities in general and in particular to the establishment of more than 38% of the forest area destroyed [14]. This expansion of cacaoculture has led to a change in cropping practices that has led to the shift from pluristratified (complex) agroforestry systems to crops under moderate shade or full sun. Despite its negative impact on forest cover, several authors [15-17] showed the benefits and benefits of adopting agroforestry practices in cocoa farming. Paradoxically, the forest-savannah contact zone in central Côte d'Ivoire, once considered unfavourable to the cultivation of cocoa because of the instability of the transient soils between the tropical ferruginous soils of the north (lixisols) and ferralsols from the south [18] and the scarcity of forest areas ([19] has long been an area of average cocoa production, notably the

department of Toumodi. The work carried out by [20, 21] showed that different agroforestry systems based on cocoa trees persist in the department of Toumodi and more particularly in the sub-prefecture of Kokumbo. However, very little published work in this area of Côte d'Ivoire deals with the impact of cocoa-based agroforestry systems on the fertility and quality of cocoa soil and on the yield of commercial cocoa. The evaluation of the impact of these agrosystems on the physical and chemical characteristics of the soils will allow the necessary amendments to be made with a view to sustaining these systems and sustaining the cultivation of cocoa in this area.

MATERIAL AND METHODS

Characteristics of the study area

The study was carried out in the Kokumbo sub-prefecture in the region of Aries in Côte d'Ivoire. This region was chosen for the study because it still houses traditional agroforestry plantations based on cocoa trees and still in production, like other producing regions where agroforestry systems have almost disappeared. It is located in central Côte d'Ivoire between north latitudes 6°19'37.81" and 6°34'51.18" and west longitudes 5°19'58.35" and 5°20'02.54" (Figure 1).

From a geology point of view, the region is located in a broad band of metamorphic Birrimien,

direction NNE-SSW, framed by newer granitoids, belonging to Ebony orogenesis (Yao-Kouamé, 2007) and marked by a combination of granitic and sedimentary zones. It mainly contains biotite granites, micaschists and chloritoschites, metavolcanites and conglomerates. There are also rock outcrops in balls or slabs and lateral battleships that supplant the shale formations.

The floors are ferralitic, strongly or moderately desaturated. Their fertility potential depends mainly on the percentage of coarse elements and the texture of the higher horizons [22]. The region belongs to the mesophilic sector of the Guinean domain [23] and is part of the forest-savanna transition zone. It is under the influence of a tropical, bimodal climate, characterized by two rain seasons of unequal importance, separated by two small dry seasons. Monthly rainfall is around 1,090 mm annually, while temperatures are characterized by uniformity and low amplitude of 27.14°C.

The vegetation consists of a mosaic of Guinean savannahs and dense semi-deciduous humid forests [24] on lowlands and a low system of wrinkles and hills. There are also some plains and many hills of granite structure [25]. The river system department is dominated mainly by the Bandama in the West and the N'Zi in the South-East, as well as several rivers.

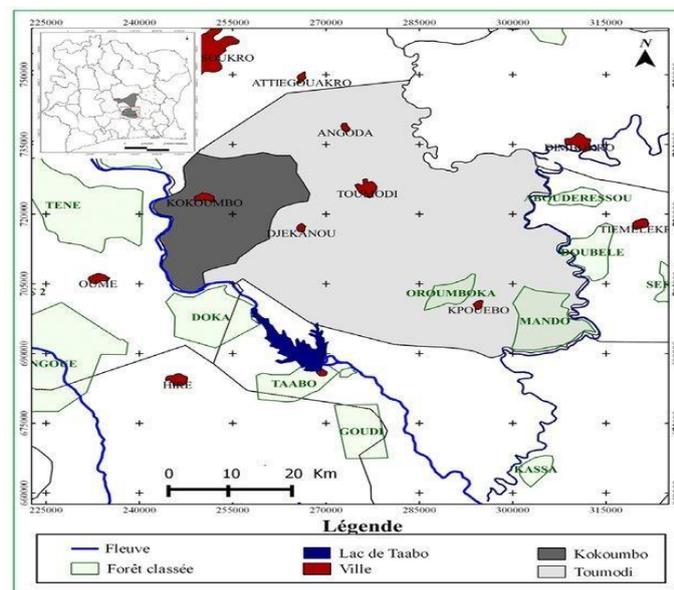


Fig-1: Location of the sub-prefecture of Kokumbo in the department of Toumodi in the centre of Côte d'Ivoire

MATERIAL

Plant material

The plant material consists on the one hand of cocoa «*Theobroma cacao*» not selected commonly called "all-coming" and the improved variety selected by the research and on the other hand, by the plant species constituting the agroforests.

Field equipment and soil analysis

Global Positioning System Field equipment consists of

- (GPS), for topographical surveys and surveys of geographical coordinates;
- machetes, shovels, picks, for cleaning the plot and opening the soil profiles;

- Edelman type soil auger, 7 cm in diameter, for the sampling of soil cores;
- plastic bags, for the packaging of samples of soil collected;
- electric agitators, precision electronic balance, sieve, electric grinder, burette, centrifuge, for the measurements and preparation of the composite soil sample for particle size and chemical analysis;
- pH-meter, for pH determination;
- Ventilated oven with hot air (105°C), oven, Kjeldhal distiller, graduated test piece, flask, graduated and graduated pipettes and sieve for chemical analysis of soil samples.

STATISTICAL ANALYSIS

Field data and analysis results were captured and codified using the Microsoft Excel 2010 spreadsheet. They were subjected to statistical analyses using SAS V9.1 software. Which allowed the mean particle size and physico-chemical soil data from each study site to be compared by variance analysis (ANOVA) at the $\alpha = 0.05$ threshold. When a significant difference was noted between the factors considered for a given trait, the Newman-Keuls test was performed.

METHODS

Methods

The methodology adopted in the field consisted of a survey of the sites in order to select the most representative plantations of the various agroforestry systems of the area. The choice of these cocoa plantations was guided by the agroforestry typology as defined by the work of [20]. For the determination of the physical characteristics of the study site, soil pits were opened following the toposequence in each type of agroforest. Thus, three soil pits were opened by agroforest. The depth of the pits was defined according to the penetration of the roots of the cocoa tree. The description of the crop profile revealed the main characteristics of the various layers of land per basic plot.

For the determination of soil chemical parameters, the basic sampling was carried out at the auger at two levels of horizon: 0-20 cm and 20 - 40 cm in zigzag, following the longest diagonal. For the same plot, 2 composite samples of 20 elemental samples were constructed according to the depth of collection for laboratory analysis. A total of 18 soil samples were collected, bagged and carefully labelled for chemical analysis at the soil and plant laboratory of the Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) in Yamoussoukro.

Laboratory analysis

The laboratory analyses concerned the determination of the physical and chemical properties of the soil after drying the composite samples.

The determination of the physical properties of the soil covered

- analysis of the particle size of the fraction of the composite sample taken from the site; using the sieve method [26] ;
- determination of coarse elements;
- Floor texture by tactile method.

The determination of soil chemical parameters concerned

- the pH of the soil water which was determined by the electrometric method at pH-meter, with a glass electrode, on a water suspension - sieved soil, in a soil/solution ratio of 1/2,5;
- The total organic carbon (C) of the soil was determined by the Walkley and Black method (1934). The organic matter content (MO) was determined by the relationship: $MO (\%) = \text{total carbon} \times 1.72$;
- total nitrogen was determined by the Kjeldahl method;
- the assimilable phosphorus (P_{2o5ass}), was determined by the Olsen-Dabin method described by [27] ;
- Cationic exchange capacity (CEC) and exchangeable bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^{+}) were extracted by rinsing an ammonium acetate solution ($NH_4C_2H_3O_2$, 1N) at pH 7.

RESULTS

Evolution of soil size according to agrosystems under cocoa trees

A significant difference between the soil characteristics of full sun, mixed and complex agrosystems, in particular, at the level of fine silt, total silt and coarse sand was observed (Table 1). More specifically, a statistically higher mean fine silt value (41.82%) was recorded in full sunlight compared to complex agrosystems (34.68%) and mixed agrosystems (30.95%) in descending order. A similar and similar average value was found for total silt. On the other hand, for coarse sand, the highest value was recorded in mixed agrosystems (15.87%) and the lowest in full sun (8.95%) with a statistically intermediate value in complex agrosystems (11.59%).

Considering the average values of the different parameters by horizons of the different agrosystems, no statistically significant difference between the mean values of the grain size parameters determined by the agrosystems, whatever their depth; except for coarse silt in full sun agrosystem which displays significant values for horizon 0-20 cm (10.22%) which is double that of horizon 20-40 cm (5.42%).

With regard to the texture of the different horizons, and hence the overall soil texture of the cocoa agro-systems, the chemical analyses showed that the soils at the study site are of silty-sandy-clay if we refer

to the percentages of the total clay, silt and sand whatever the agrosystem (full sun, complex or mixed)

and the horizons (0-20 cm or 20 cm-40 cm) considered.

Table-1: Particle size of Cocoa Growing Soils in the Study Area

Parameters	Particle size of soils (%)								
	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system		
	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm
Clay	17,37A	14,25a	20,50a	29,63A	29,02a	30,25a	24,22A	21,77a	26,67a
Fine silt	41,82B	40,65a	43,00a	30,95B	32,00a	29,90a	34,68AB	33,87a	35,50a
Coarse silt	7,82A	10,22a	5,42b	7,22A	6,12a	8,32a	8,73A	8,90a	8,57a
Total silt	49,42A	46,95a	51,28a	38,17B	38,25a	38,08a	43,42AB	42,77a	44,07a
Clay + Silt	67,02A	69,54a	67,62a	67,81A	67,26a	69,10a	67,63A	64,54a	70,73a
fine sand	24,02A	24,77a	23,27a	16,31A	18,00a	14,62a	20,77A	24,36a	17,18a
Coarse sand	8,95B	10,10a	7,80a	15,87A	14,85a	16,90a	11,59AB	11,10a	12,08a
Total sand	32,97A	30,55a	35,40a	32,19A	32,74a	31,64a	32,36A	36,45a	28,28a

The values followed on the same line by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ for the capitals between the agrosystems and for the lower case between horizons of an agrosystem respectively.

Evolution of soil chemical parameters in relation to agrosystems under cocoa trees

Soil acidity

The statistical analysis showed that there was no statistically significant difference between the pH(water) and pH(kcl) of the soils of the different agrosystems (Table 2). In addition, the pH values of the soils regardless of the agrosystem and the level of the depth considered varied between 6.70 and 7.00 for the actual acidity of the soil, determined by the pH(water) and between 5.65 and 6.37 for potential acidity,

determined by pH(kcl). These pH values, which were lower overall than the actual acidity ($\text{pH}(\text{water}) = 7$), indicated a soil under low acid cocoa. The difference in mean ΔpH between pH(water) and pH(kcl) of the soil was statistically significant by agrosystem and horizon level. In fact, the deviation ΔpH varying between 0.50 and 1.13 indicated a slight variation in acidity ($\Delta\text{pH} = 0.50$) at the level of the horizon 0-20 cm and a high potential acidity ($\Delta\text{pH} = 1$) at the level of the horizon 20- 40 cm for all soils under cocoa trees of agrosystems.

Table-2: Acidity of Soil under Cocoa in the Study Area

Parameters	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system			Norms*
	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	
pH (eau)	6,70A	6,70a	6,70a	6,80A	6,85a	6,75a	6,90A	7,00a	6,80a	6-7
pH (kcl)	5,92A	6,20a	5,65a	5,90A	6,20a	5,70a	6,02A	6,37a	5,67a	5-6
ΔpH	0,77A	0,50b	1,05a	0,85A	0,65b	1,05a	0,88A	0,63b	1,13a	0,5-1

The values followed on the same line by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ for the capitals between the agrosystems and for the lower case between horizons of an agrosystem respectively.

Organic matter content and assimilable phosphorus of the studied soil

No significant differences were observed between the agrosystems for the organic matter and phosphorus levels considered (Table 3). However, there is significant variability in mean values of organic matter levels and mixed agrosystem phosphorus content in the 0-20 cm and 20-40 cm horizons, respectively. In fact, the respective levels of organic matter (19.90%); carbon (11.52%); total nitrogen (0.87%) and assimilable

phosphorus (107.25 ppm) were elevated at the surface layer 0-20 cm as at the layer 20-40 cm in mixed agrosystem. On the other hand, the ratio C/N is 13.86 was higher at the 20-40 cm layer than at the 0-20 cm layer. For the full sun and complex agrosystems, no significant difference was observed at any level of the considered layer. However, the highest mean values were noted with the mixed agri-system for these parameters.

Table-3: Organic matter and assimilable phosphorus content of soil under cocoa Trees

Parameters	Soil organic matter									Norms*
	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system			
	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	
M.org. (%)	12,77A	15,86a	9,69a	18,89A	19,90a	17,88b	15,54A	19,23a	11,86a	3,6-6,5
Carb (%)	7,43A	9,22a	5,63a	10,98A	11,52a	10,37b	9,04A	11,18a	6,89a	6,2-11,2
Ntotal (%)	0,57A	0,71a	0,43a	0,81A	0,87a	0,75b	0,67A	0,83a	0,51a	0,1-0,15
C/N	12,45A	12,91a	11,99a	13,54A	13,23b	13,86a	13,35A	13,46a	13,24a	11-15
Pass (ppm)	116,70A	103,45a	129,95a	105,20A	107,25a	99,15b	126,18A	101,43a	150,93a	50-100

The values followed by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ on a line for capital letters between agrosystems and for lower case letters between horizons of an agrosystem respectively

Exchangeable cations and cation exchange capacity of the soils studied

At the level of chemical analysis no significant difference in the mean values of the exchangeable cation contents was observed between the different agrosystems on the one hand, and on the other hand, over horizons 0-20 cm and 20-40 cm whatever the agrosystem, except for magnesium which has shown significant average values particularly in mixed agrosystems and full sun over the horizons considered (Table 4). In addition, the sum of exchangeable cations

indicated significant mean values (P 0.05) in mixed agrosystem in horizons 0-20 cm and 20-40 cm with a higher mean value in horizon 0-20 cm. Similarly, the CEC only displayed a significant mean value for the full sun agrosystem. Indeed, the CEC had a higher average value in the 0-20 cm horizon than in the 20-40 cm horizon. It was also noted that overall, the highest mean values were for the mixed agrosystem although no statistical differences were observed between these parameters.

Table-4: Exchangeable cation contents and exchange capacity

Parameters (cmol ⁺ .kg ⁻¹)	Exchangeable cations and cation exchange capacity									Norms
	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system			
	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	
Ca	5,22A	4,93a	5,51a	6,01A	6,31a	5,14a	5,60A	6,41a	4,79a	5-8
Mg	2,51A	2,96a	2,07b	3,40A	3,87a	2,92b	2,83A	3,37a	2,28a	1,5-3
K	0,08A	0,09a	0,07a	0,09A	0,11a	0,07a	0,09A	0,11a	0,08a	0,15-0,25
Na	0,15A	0,18a	0,11a	0,11A	0,13a	0,10a	0,12A	0,13a	0,11a	0,3-0,7
S	7,96A	8,17a	7,75a	9,62A	10,43a	8,81b	8,64A	10,02a	7,27a	7,5-15
CEC	25,45A	28,00a	22,90b	28,55A	30,60a	26,50a	25,93A	23,53a	25,33a	10-20
V (%)	31,66A	29,37a	33,94a	33,70A	34,17a	33,23a	33,24A	38,30a	28,17a	60-90

The values followed by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ on a line for capital letters between agrosystems and for lower case letters between horizons of an agrosystem respectively

Saturation rate in exchangeable bases

In the analysis, no significant difference in the average values of the saturation rates in exchangeable bases was observed between the different agrosystems as well as in horizons 0-20 cm and 20-40 cm, except for magnesium which displayed significant mean values, in mixed and full sun agrosystems in the 0-20 cm

(12.68%) and 20-40 cm (10.98%) mixed agrosystem and in the 0-20 cm horizons (10.57%) and 20-40 cm (9.03%) in full sun culture (Table 5). In addition, the comparison of the mean values of the magnesium saturation rates indicated a higher rate in the horizon 0-20 cm than in the horizon 20-40 cm in mixed agroforestry systems as well as in the full sun system.

Table-5: Exchangeable base saturation rates of the soil absorbing complex

Exchangeable base saturation rates of the soil absorbing complex										
	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system			
Nutrients (%)	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Global soil	Horizon 0 -20 cm	Horizon 20 -40 cm	Norms *
Ca ²⁺	20,92A	17,74a	24,09a	21,12A	20,64a	21,59a	21,65A	24,46a	18,74a	60-70
Mg ²⁺	9,80A	10,57a	9,03b	11,84A	12,68a	10,98b	10,72A	12,81a	8,63a	10-12
K ⁺	0,32A	0,33a	0,30a	0,32A	0,38a	0,27a	0,38A	0,42a	0,34a	2,5-3,5
Na ⁺	0,57A	0,66a	0,48a	0,41A	0,44a	0,38a	0,48A	0,50a	0,46a	< 1

The values followed by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ on a line for capital letters between agrosystems and for lower case letters between horizons of an agrosystem respectively

Ratio between the cations of the soils studied

Mean values of cation ratios did not show a significant difference between the agrosystems on the one hand, and on the other hand, in the 0-20 cm and 20-40 cm horizons regardless of the agrosystem, except for the ratio Ca²⁺/Mg²⁺ which displayed particularly

significant mean values, in mixed agrosystems and full sun respectively, in horizons 0-20 cm (1.63) and 20-40 cm (1.76) in mixed agroforestry systems and in horizons 0-20 cm (1.67) and 20-40 cm (2.66) in full sun system (Table 6).

Table-6: Ratio of Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺ cations of soils

Cation ratio (cmol.kg-1)										
	Full sun culture system			Mixed agroforestry system			Complex agroforestry system			
Nutrients	Global soil	Horizon 0-20 cm	Horizon 20-40 cm	Global soil	Horizon 0-20 cm	Horizon 20-40 cm	Global soil	Horizon 0-20 cm	Horizon 20-40 cm	Norms *
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	2,07A	1,67b	2,66a	1,76A	1,63b	1,76a	1,98A	1,90a	2,10a	2-9
K ⁺ /Mg ²⁺	0,03A	0,03a	0,03a	0,03A	0,03a	0,02a	0,07A	0,03a	0,04a	0,05-0,1
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ /K ⁺	96,62A	37,82a	35,08a	43,78A	41,49a	46,85a	37,04A	37,05a	33,29a	12-15

The values followed by the same letter are not statistically different at the threshold of $\alpha = 0.05$ on a line for capital letters between agrosystems and for lower case letters between horizons of an agrosystem respectively

DISCUSSION

Effect of cocoa-based agroforestry systems on the physical fertility of cocoa soils

The study showed that the different cocoa-based agrosystems had no significant effect on the physical parameters of the soils. These soils have sometimes presented morphopedological constraints along the landscapes which are summarized in a superficial induration, the abundance of coarse elements with a silty-sandy texture. The predominance of battleship soils in the landscape was also highlighted by [28] in the north of Côte d'Ivoire, an area with very contrasting seasons. The results obtained are also consistent with those of [29] in the South-West, in the regions of Méagui and San-Pédro. The main morphological stress of cocoa-based agroforest soils in the study area was the abundance of coarse elements with a rate that could be estimated at more than 50%. The abundance of these coarse elements (gravel, pebbles, etc.) was associated with the presence of battleship. The work of [30] also revealed that the presence of battleships and coarse elements on some topographical positions of the soils. The silt-sandy texture and hydromorphic properties also characterize these soils. Soil morphological stresses to cacao culture were demonstrated by [29] in the Central West and South West of Côte d'Ivoire. These morpho-soil constraints have an

impact on cacao culture insofar as the depth of the soil is fundamental to the establishment of this crop. According to the work of [29], a soil depth of less than 100 cm is not conducive to cacao culture because its durability is not guaranteed because of the development of the pivotal root. Coarse elements have shares similar to those of depth according to [31]. The immediate consequence of the action of induration at less than 100 cm of depth and of the high rate of coarse elements is the water deficit which would cause the mortality of cocoa feet according to the work of [32] made in Togo on indurated soils and high gravillonnaire.

Effect of cocoa-based agroforestry systems on the chemical fertility of cocoa soils

The study showed that the soils of the different cocoa-based agrosystems have well satisfactory overall soil fertility values when taking into account the normative values referred by [33-36, 30]. In fact, according to these authors, soils under cocoa trees require chemical properties in terms of actual acidity pHeau (6-7), organic matter content (3.6-6.5 p.c.), carbon content (6.2-11.2 p.c.) and nitrogen content respectively. (0,1-0,15 b.w.), C/N (11-15), assimilable phosphorus (50-100 ppm), potassium (0,15-0,25 cmol.kg-1), calcium (5-8 cmol.kg-1), magnesium (1,5-3 cmol.kg-1), sodium (0,3-0,7 cmol.kg-1), sum of exchangeable bases (7,5-15 cmol.kg-1) and cation exchange capacity from 10 to 20 cmol.kg-1. Similarly, important balances between the

different minerals were also respected, including the optimal balances of Ca/Mg (2-9), K/Mg (0.05-0.1) and Ca+Mg/K (12-15). Diagnostic studies of soils under cocoa trees carried out elsewhere in Côte d'Ivoire showing soil fertility in relation to cocoa farming requirements have been proven and corroborate the work of [37]. Correlations between the significantly positive or negative physical, chemical and physical-chemical parameters obtained justify the satisfactory fertility of the soils of cocoa-based agroforests. This good mineral availability of the soils of agroforests to cacao culture would be related to the presence and density of the associated arboristic species in the plantations of cocoa trees by shading effect, which would avoid possible soil degradation in favour of mineral enrichment. So there is some linkage between the mineral needs of a cocoa tree and how it is set up by agroforestry systems. The influence of the soil's mineral wealth on cocoa production depends on the degree of permanent shade of the agroforest [8, 38].

CONCLUSION

The study concerning the evaluation of soil characteristics under cocoa-growing agrosystems has shown that agroforests are conservative of a certain level of ecological biodiversity conducive to maintaining good soil fertility. They conserve and maintain the physico-chemical parameters of soils under cocoa trees, especially mixed and complex agroforests. In terms of the fertility of the soils of agroforests, the values of the fertility parameters obtained indicate globally a level of fertility of the soils well satisfactory and this regardless of the agrosystem forest full sun, mixed or complex. Moreover, the mixed cocoa-based agro-forestry system appears to be more interesting in improving the soil structure and enrichment of available mineral elements and could be recommended to cocoa producers in the area of study.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the research professors at the Jean Lorougnon Guédé University in Daloa for their contribution to the writing and formatting of the manuscript.

REFERENCES

- Godo G. Synthèse générale des rapports nationaux sur la mosaïque africaine du manioc et son contrôle. In: Colloques et Séminaires sur la mosaïque africaine du manioc et son contrôle du 4 au 8 mai 1987. éd. ORSTOM, Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). 1987: 9-11.
- Bado BV. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Laval, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Québec, Canada. 2002: 149.
- N'zué B, Zouhouri PG, Sangaré A. Performances Agronomiques De Quelques Variétés De Manioc (Manihot esculenta Crantz) Dans Trois Zones Agroclimatiques De La Côte D'Ivoire. *Agronomie africaine*. 2004;16(2):1-7.
- Mossu G. Le cacaoyer. Série: Le technicien d'Agriculture tropicale. Ed. G.P. Maisonneuve et Larose. 1990 : 160.
- Coulibaly N. Faire de la Cacaoculture une activité Rentable. In Conférence Mondiale du Cacao en Côte d'Ivoire 2012 Nov 19 (pp. 19-23).
- Wessel M, Quist-Wessel PF. Cocoa production in West Africa, a review and analysis of recent developments. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*. 2015 Dec 1;74:1-7.
- Kassin E, Snoeck D, N'guessan JC, Yao-Kouamé A et Camara M. Projet de cartographie des sols rapport final CNRA, CIRAD. 2016 : 17.
- Freud EH, Petithuguenin P, Richard J. Les champs du cacao: un défi de compétitivité Afrique-Asie. Karthala Editions; 2000.
- Deheuvels O. *Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica* (Doctoral dissertation, Montpellier SupAgro).
- Jagoret P. *Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme: Application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au Centre Cameroun* (Doctoral dissertation, Montpellier SupAgro).
- Wood GAR, et Lass RA. Cocoa. Ed. Longman Group Ltd, Essex. Tropical Agriculture Series. 1985: 620.
- Braudeau J. Le cacaoyer. Ed. G.P. Maisonneuve et Larose. 1969 : 304.
- Clough Y, Barkmann J, Juhbandt J, Kessler M, Wanger TC., Anshary A, Buchori D, Cicuzza D, Darras K, Putra D, Erasmi S, Pitopang R, Schmidt C, Schulze CH, Seidel. D, Steffan-Dewenter I, Stenchly K, Vidal S, Weist M, Wielgoss AC et Tschardt T. Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011; 108 (20): 8311-8316.
- Eaux et Forêts. 2017 ; N°1 : 40 p.
- Sonwa DJ, Weise SF, Tchatat M, Nkongmeneck BA, Adesina AA, Ndoye O, Gockowski J. Rôle des agroforêts à cacao dans la foresterie paysanne et communautaire au sud-Cameroun. Document RDFN. 2001(25g).
- Somarriba E, Beer J. Productivity of Theobroma cacao agroforestry systems with timber or legume service shade trees. *Agroforestry systems*. 2011 Feb 1;81(2):109-21.
- Deheuvels O, Avelino J, Somarriba E, Malezieux E. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012 Mar 1;149:181-8.
- Yao-Kouamé A. Caractéristiques physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en

- moyenne Côte d'Ivoire. Rev. CAMES-Série A. 2007;5:76-86.
19. Blanc-Pamard C. Espace vécu et milieu de contact forêt-savane chez les paysans Baoulé et leurs enfants dans le Sud du «V Baoulé», Côte d'Ivoire. Cahiers ORSTOM, Série Sciences Humaines. 1978;15(2):145-72.
 20. Kpangui KB, Kouamé D, Gone BZ, Vroh BT, Koffi BJ, Adou Yao CY. Typology of cocoa-based agroforestry systems in a forest-savannah transition zone: case study of Kokumbo (Centre, Côte d'Ivoire). International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR). 2015;6(3):36-47.
 21. Adou Yao CY, Kpangui KB, Vroh BT, Ouattara D. Pratiques culturelles, valeurs d'usage et perception des paysans des espèces compagnes du cacaoyer dans des agroforêts traditionnelles au centre de la Côte d'Ivoire. Revue d'ethnoécologie. 2016;9:1-9.
 22. Avenard JM, Bonvallet J, Latham M, Renard-Dugerdil M, Richard J. Le contact forêt-savane en moyenne Côte-d'Ivoire. In Annales de géographie 1973 Sep 1 (pp. 513-544). Armand Colin.
 23. Eldin M. Le climat. In: *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. éd. ORSTOM, Paris (France). 1971: 77-108.
 24. Guillaumet JL, Adjanohoun E. La végétation de la Côte d'Ivoire. In *Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM*, 50, Paris (France). 1971: 161-263.
 25. Anonyme. Monographie du département de Toumodi. éd. ANADER, MINAGRI, Toumodi (Côte d'Ivoire). 2003: 70.
 26. Walkley A, Black CA. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec. Détermination de la matière organique par dosage du carbone organique dans les sols agricoles: méthode Walkley-Black modifiée, MA. 2003.
 27. Bonneau M, Souchier B. Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson; 1994.
 28. Koné B. *La couleur comme indicateur de la fertilité des sols: Utilisation des données pour l'étude de la fertilité potentielle des sols ferrallitiques au-dessus de la latitude 7 degré Nord de la Côte d'Ivoire* (Doctoral dissertation, Thèse, Université Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire).
 29. Koko LK. *Influence des caractères morphopédologiques et chimiques des sols sur la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire: Cas de Méagui et de San-Pedro* (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat unique, UFR STRM, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire).
 30. Koko LK, Kassin KE, Yoro G, Ngoran K, Yao-Kouame A. Corrélation entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morphopédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*. 2009 ; 24 : 1508-1519.
 31. Jagoret P, Jadin P. Recherche d'un itinéraire technique pour la replantation des cacaoyères au togo iv. Contribution à une meilleure approche pédologique de la replantation des cacaoyères. *Café Cacao Thé*. 1993;37(4):313-20.
 32. Howeler RH. Diagnosis of nutritional disorders and soil fertility maintenance of cassava tropical tuber Crops: Problems, Prospects and Future Strategies. *Oxford and IBH Publishing Co.*, New Delhi, India. 1996: 181-193.
 33. Howeler RH. Nutrient Inputs and Losses in Cassava-based Cropping Systems. Examples from Vietnam and Thailand. *Southeast Asia*. 2001: 20- 22.
 34. Giroux M, Audesse P. Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*. 2004; (15): 107-110.
 35. Doucet R. Le climat et les sols agricoles. ed. Berger, Eastman, Québec, xv. 2006;443.
 36. Aikpokpodion PE. Nutrients dynamics in cocoa soils, leaf and beans in Ondo State, Nigeria. *Journal of Agricultural Sciences*. 2010 Jul 1;1(1):1-9.
 37. Assiri AA. Identification des pratiques paysannes dans la conduite des vergers de cacaoyers en Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA. UFR des sciences de la terre et des ressources minières. Université de Cocody Abidjan. 2007.