



# THÈSE DE DOCTORAT

## FORMATION DOCTORALE

## AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT TROPICAL

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Agropédologie

THÈME :

**Etude des facteurs édaphiques sous cacaoyers  
(*Theobroma cacao* L.) infectés par le swollen  
shoot dans la région de la Marahoué au Centre-  
Ouest de la Côte d'Ivoire.**

### JURY

Président : M. SORO Dogniméton, Professeur Titulaire,  
Agropédologie, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ, Daloa ;

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

Rapporteur : M. KONE Brahim, Maître de Conférences, Pédologie,  
Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Abidjan ;

Examineur 1 : M. GUEI Arnauth Martinez, Maître de Conférences,  
Agroécologie, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ, Daloa ;

Examineur 2 : M. N'GUESSAN Kouamé Antoine, Maître de Conférences,  
Agropédologie, Université Péléforo GON COULIBALY, Korhogo.

ANNÉE UNIVERSITAIRE

...2024-2025...

N° D'ORDRE :

.....149....

Prénoms : Elvis Paterne

NOM : TCHIMOU

Soutenue le 26/07/2025.



# THÈSE DE DOCTORAT

## FORMATION DOCTORALE

## AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT TROPICAL

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Agropédologie

THÈME :

**Etude des facteurs édaphiques sous cacaoyers  
(*Theobroma cacao* L.) infectés par le swollen  
shoot dans la région de la Marahoué au Centre-  
Ouest de la Côte d'Ivoire.**

### JURY

Président : M. SORO Dogniméton, Professeur Titulaire,  
Agropédologie, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ, Daloa ;

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

Rapporteur : M. KONE Brahim, Maître de Conférences, Pédologie,  
Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Abidjan ;

Examineur 1 : M. GUEI Arnauth Martinez, Maître de Conférences,  
Agroécologie, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ, Daloa ;

Examineur 2 : M. N'GUESSAN Kouamé Antoine, Maître de Conférences,  
Agropédologie, Université Péléforo GON COULIBALY, Korhogo.

ANNÉE UNIVERSITAIRE

...2024-2025...

N° D'ORDRE :

.....149....

Prénoms : Elvis Paterne

NOM : TCHIMOU

Soutenue le 26/07/2025.

## TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES .....	i
DEDICACE .....	vi
REMERCIEMENTS .....	vii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES .....	xiii
INTRODUCTION .....	1
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS .....	6
I.1. NOTIONS DE SOL ET DE FACTEURS ÉDAPHIQUES .....	7
I.1.1. Définitions du sol.....	7
I.1.2. Rôles du sol .....	8
I.1.3. Principaux facteurs édaphiques .....	8
I.1.3.1. Structure et porosité du sol .....	8
I.1.3.2. Texture du sol .....	10
I.1.3.3. Profondeur du sol.....	11
I.1.3.4. Humidité du sol .....	12
I.1.3.5. pH et acidité du sol .....	13
I.1.3.6. Teneurs en éléments nutritifs du sol.....	14
I.1.4. Facteurs édaphiques en cacaoculture.....	15
I.1.4.1. Roche-mère.....	15
I.1.4.2. Morphologie du sol.....	15
I.1.4.3. Propriétés chimiques du sol.....	15
I.2. CACAOYER .....	17
I.2.1. Origine et répartition géographique.....	17

I.2.2. Position systématique .....	19
I.2.3. Classification phylogénétique.....	20
I.2.4. Morphologie et biologie du cacaoyer .....	20
I.2.4.1. Système racinaire.....	20
I.2.4.2. Partie aérienne .....	21
I.2.5. Modes de reproduction .....	24
I.2.5.1 Reproduction sexuée.....	24
I.2.5.2. Reproduction asexuée ou multiplication végétative .....	25
I.2.6. Facteurs climatiques .....	26
I.2.6.1. Température.....	26
I.2.6.2. Pluviométrie.....	26
I.2.6.3. Ombrage et insolation.....	26
I.3. MALADIE DU SWOLLEN SHOOT DU CACAOYER ET CERTAINES MALADIES TELLURIQUES DES PLANTES .....	27
I.3.1. Maladie du swollen shoot du cacaoyer.....	27
I.3.1.1. Historique .....	27
I.3.1.2. Agent pathogène .....	27
I.3.1.3. Vecteur du swollen shoot et propagation de la maladie .....	28
I.3.1.3.1. Vecteur du swollen shoot .....	28
I.3.1.3.2. Mode de propagation de la maladie du swollen shoot.....	29
I.3.1.4. Symptômes et formes de la maladie .....	32
I.3.1.5. Moyens de lutte .....	33
I.3.2. Maladies telluriques des plantes .....	34
I.3.2.1. Carences nutritionnelles .....	34
I.3.2.2. Maladies telluriques infectieuses .....	35

I.3.3. Relation entre le CSSV et le sol .....	36
I.4. CADRE DE L'ETUDE .....	37
I.4.1. Localisation géographique.....	37
I.4.2. Relief .....	38
I.4.3. Climat .....	38
I.4.4. Végétation.....	38
I.4.5. Hydrographie.....	39
I.4.6. Géologie.....	39
I.4.7. Pédologie .....	39
I.4.8. Etat sanitaire .....	40
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	41
II.1. MATÉRIEL.....	42
II.1.1. Matériel édaphique et végétal .....	42
II.1.2. Matériel technique et consommables .....	42
II.2. MÉTHODES .....	44
II.2.1. Choix, préparation et description des sites de l'étude.....	44
II.2.2. Inventaire des plantes réservoirs du virus et calcul des densités.....	44
II.2.3. Etude pédologique.....	45
II.2.3.1. Etude morphopédologique .....	45
II.2.3.1.1. Positionnement des fosses .....	45
II.2.3.1.2. Ouverture des fosses pédologiques et description de la morphologie du sol.....	47
II.2.3.2. Analyses du sol en laboratoire .....	49
II.2.3.2.1. Mesure des propriétés physico-chimiques .....	49
II.2.3.2.2. Nomenclature des sols étudiés .....	50
II.2.3.3. Détermination des équilibres chimiques dans les sols .....	51

II.2.3.4. Analyse des données .....	52
II.2.3.4.1. Analyse de variance .....	52
II.2.3.4.2. Analyse en Composante Principales .....	52
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	53
III.1. RÉSULTATS .....	54
III.1.1. Caractéristiques générales des sites de l'étude .....	54
III.1.2. Espèces végétales associées à la maladie du swollen shoot .....	55
III.1.2.1. Diversité et abondance des espèces végétales .....	55
III.1.2.2. Densité des plantes réservoirs du virus .....	56
III.1.3. Propriétés morphophysiques des sols .....	57
III.1.4. Propriétés chimiques des sols .....	65
III.1.4.1. <i>pHeau</i> .....	65
III.1.4.2. Carbone organique et azote total.....	67
III.1.4.3. Phosphore assimilable.....	70
III.1.4.4. Bases échangeables et CEC .....	72
III.1.4.5. Oligoéléments .....	75
III.1.4.6. Equilibres cationiques et saturation du complexe adsorbant des sols.....	78
III.1.5. Analyses en Composantes Principales et relations entre les propriétés des sols et la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères.....	81
III.1.5.1. Corrélations entre les variables des sols et entre les variables et les sols .....	81
III.1.5.2. Facteurs édaphiques liés à la présence du swollen shoot dans les parcelles.....	86
III.2. DISCUSSION .....	90
III.2.1. Implication des plantes d'ombrage et plantes adventices hôtes dans la prolifération du virus du swollen shoot du cacaoyer .....	90
III.2.2. Propriétés morphologiques des sols et présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères.....	91

III.2.3. Propriétés chimiques des sols et présence de la maladie du swollen shoot du cacaoyer .....	93
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	97
REFERENCES .....	100
PUBLICATION .....	118
RÉSUMÉ.....	133

## DEDICACE

À

mon père et ma mère, respectivement, Feu N'Gbesso Tchimou Frédéric et Feue Bitty Cho Jeanne, qui ont toujours œuvré, de leur vivant, à la bonne éducation, au bien-être et à la réussite de leurs enfants. En tant qu'enfants, nous sommes infiniment reconnaissants pour l'amour et l'affection manifestées à notre endroit et le modèle de vie dont s'inspire la notre aujourd'hui. Que les âmes de tous les défunts de la famille reposent en paix.

## REMERCIEMENTS

La présentation des premiers résultats de cette thèse de doctorat ne saurait occulter cette habitude qui est de remercier tous ceux qui, directement ou indirectement, ont contribué à améliorer ce travail.

Mes premiers mots sont adressés à Mme ADOHI KROU Viviane, Professeur Titulaire en Physique, Présidente de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE (UJLoG), pour les efforts consentis au quotidien en vue de la bonne marche de l'institution, et qui autorise la soutenance de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent ensuite à M. SORO Dogniméton, Professeur Titulaire en Agropédologie, Vice-Président chargé de la Pédagogie et de la Vie Universitaire, de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, Président du Jury de ce mémoire et à M. KONE Issiaka, Professeur Titulaire en Socio-anthropologie, Vice-Président chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures de l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, pour leurs conseils avérés et leur disponibilité à répondre aux préoccupations impliquant la formation des étudiants de UJLoG.

A Mme TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences en Physiologie Végétale, Ex-Directrice de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Agroforesterie, je témoigne toute ma gratitude pour avoir facilité mon accès aux plantations villageoises dans le cadre de cette recherche. J'associe à ces remerciements le Directeur actuel de l'UFR, M. KOUASSI Kouassi Clément, Maître de Conférences en Microbiologie du sol, pour sa contribution à cette facilitation d'accès aux plantations.

Je ne pourrai trouver les mots justes pour exprimer ma reconnaissance et mon profond respect à M. ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences en Pédologie, pour m'avoir fait confiance en me confiant un si grand travail. Il a allié son dynamisme, son efficacité et sa rigueur dans le travail bien fait tout au long de la conduite de ce mémoire, malgré ses multiples occupations. A sa suite, il me plaît de remercier très sincèrement les autres membres du jury de soutenance de ce mémoire, pour leur contribution à l'amélioration de son contenu. Il s'agit précisément des sieurs :

- KONE Brahima, Maître de Conférences en Pédologie à l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, pour sa qualité de rapporteur ;

- GUEI Arnauth Martinez, Maître de Conférences en Agroécologie à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE et N'GUESSAN Kouamé Antoine, Maître de Conférences en Agropédologie à l'Université Péléforo GON COULIBALY, qui sont les examinateurs du mémoire.

Aussi, Docteur SORO Sibirina, Maître de Conférences en Phytopathologie à l'Université Jean LOROUGNON GUEDE, qui a instruit ce mémoire, a contribué significativement à son amélioration en y portant des critiques très constructives. Je lui suis reconnaissant pour ce travail.

J'ai le même sentiment à l'endroit de tous les membres du Département Agropédologie de UJLoG, qui, chacun à sa manière, m'a apporté assistance. En effet, j'ai bénéficié de conseils très utiles venant de Professeur BAKAYOKO Sidiky, Secrétaire Général Adjoint de l'UJLoG, quand Docteur (MC) KONATÉ Zoumana, Docteur N'GANZOUA Kouamé René, Docteur YEO Lacina et Docteur KOUADIO Koffi Hypolith, m'ont aidé à réaliser les tâches de terrain, sur instruction de Docteur (MC) ABOBI Akré Hebert, Chef du Département. Je leur suis infiniment reconnaissant.

J'adresse mes sincères remerciements à Mesdames COULIBALY Ténédja Ramata et KOUADIO Nathalie, respectivement Directrice Régionale de l'Agriculture de la Marahoué et Directrice Départementale de l'Agriculture de Sinfra, pour m'avoir ouvert les portes de leurs services et avoir assuré l'accompagnement nécessaire pour réussir la phase de terrain de cette recherche. Dans la même veine, Messieurs OULAI Kohon Victor et DIARRASSOUBA Abdoulaye, Chefs de zone ANADER de Bouaflé et de Sinfra ont mis à ma disposition les agents de terrain que sont M. DJANÉ Houlessité et M. ANIN Fernand. A toutes ces personnes, je dis grand merci. Je ne saurais extraire de ces remerciements, les vaillants planteurs que sont Messieurs KOFFI Kouamé Edouard, SAMA Jean Baptiste, SIMPORÉ Paul, SIMPORÉ Marcel, TRAZIÉ Botti Julien, GOORE Bi Ignace, YAMEOGO Emmanuel, GNANKAN Sylvain, ZOH Bi Joachim et YAO Bi Tragoné, qui ont accepté volontiers que les travaux de cette étude soient réalisés dans leurs plantations.

Mes derniers mots de remerciements sont adressés à la grande famille TCHIMOU et OCHOU, ainsi qu'à mes amis et collègues de service pour leurs soutiens multiformes. En effet, mon épouse OKOUA Julie Diane et mes enfants TCHIMOU Euphrasie, TCHIMOU

Christ-Samuel, TCHIMOU Ocho Emmanuel ont consenti beaucoup de sacrifices suscités par mes nombreuses absences. En ce qui concerne mes frères et sœurs (TCHIMOU Etienne, TCHIMOU Elie, TCHIMOU Jérémie, TCHIMOU Barthelemy, TCHIMOU Pauline, TCHIMOU Angèle, TCHIMOU Honoré, OCHOU Jeanne, OCHOU Hélène, OCHOU Gisèle, OCHOU Angèle, etc.), leurs encouragements ne m'ont jamais fait défaut. Il en est de même pour mes amis et collègues, précisément, M. EHUI Jean Baptiste, M. KOUASSI Kouamé Narcisse, M. YEO Joseph, M. KONAN Danmo et M. GOORE Bi Sylvain.

## **SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

ANADER	: Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
APG	: Angiosperm Phylogeny Group
CIRAD	: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CSSV	: Cocoa Swollen Shoot Virus
D	: Densité des plantes
Di	: Densité élémentaire des plantes
Diene-M	: Sol de parcelle malade à Diénembroufla
Diene-S	: Sol de parcelle saine à Diénembroufla
E.G	: Éléments grossiers
FAOSTAT	: Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (Organisation des Nations Unies pour les Bases de Données Statistiques sur l'Alimentation et l'Agriculture)
Guess-M	: Sol de parcelle malade à Guessanfla
Guess-S	: Sol de parcelle saine à Guessanfla
ICCO	: International Cocoa Organization (Organisation Internationale du Cacao)
IUSS	: International Union of Soil Sciences
Kaye-M	: Sol de parcelle malade à Kayéta
Kaye-S	: Sol de parcelle saine à Kayéta
Koumo-M	: Sol de parcelle malade à Koumoudji
Koumo-S	: Sol de parcelle saine à Koumoudji
Kraya-M	: Sol de parcelle malade à Krayaokro
Kraya-S	: Sol de parcelle saine à Krayaokro
LAVESO	: Laboratoire d'Analyse des Végétaux et des Sols
MO	: Matière organique
MR	: Masse en gramme du refus de sol séché après tamisage

MT	: Masse en gramme de l'échantillon séché
ORFs	: Open Reading Frames (cadre de lecture du génome du CSSV)
PATH	: Profondeur d'Apparition du Toit de l'Humidité
PCR	: Polymerase Chain Reaction (Réaction de polymérisation en chaine)
RSG	: Reference Soils Group (Groupe de Sols de Référence)
Simp0-M	: Sol de parcelle malade de Simporefla
Simp0-S	: Sol de parcelle saine de Simporefla
UJLoG	: Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I : Classification de l'acidité du sol.....	14
Tableau II : Quelques plantes réservoirs du virus du swollen-shoot .....	31
Tableau III : Matériel technique de terrain, de laboratoire et produits chimiques.....	43
Tableau IV : Espèces végétales hôtes du virus du swollen shoot .....	55
Tableau V : Taux de concrétions dans les sols de Bouaflé.....	59
Tableau VI : Taux de concrétions dans les sols de Kononfla .....	59
Tableau VII : Textures des sols de Bouaflé .....	61
Tableau VIII : Textures des sols de Kononfla .....	62
Tableau IX : Moyennes des taux d'apparition de l'hydromorphie dans les parcelles saines et malades à Bouaflé et à Kononfla .....	63
Tableau X : Profondeurs d'apparition de l'hydromorphie dans les 120 premiers cm des sols	64
Tableau XI : pH des sols de Bouaflé .....	66
Tableau XII : pH des sols de Kononfla.....	66
Tableau XIII : Taux de C et de N, et ratio C/N des sols de Bouaflé.....	68
Tableau XIV : Taux de C et de N, et ratio C/N des sols de Kononfla.....	69
Tableau XV : Taux de phosphore assimilable des sols de Bouaflé .....	71
Tableau XVI : Taux de phosphore assimilable des sols de Kononfla .....	71
Tableau XVII : Bases échangeables et de la CEC des sols de Bouaflé .....	73
Tableau XVIII : Bases échangeables et de la CEC des sols de Kononfla .....	74
Tableau XIX : Taux d'oligoéléments des sols de Bouaflé .....	76
Tableau XX : Taux d'oligoéléments des sols de Kononfla .....	77
Tableau XXI : Équilibres chimiques dans les sols de Bouaflé .....	79
Tableau XXII : Équilibres chimiques dans les sols de Kononfla .....	80

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Schéma de structure du sol.....	9
Figure 2 : Diagramme textural.....	11
Figure 3: Variétés morpho-géographiques de cacaoyers cultivés dans le monde .....	18
Figure 4 : Régions de production cacaoyère dans le monde en 2020.....	18
Figure 5: Répartition par pays de la production mondiale de cacao en 2018.....	19
Figure 6 : Système racinaire du cacaoyer .....	21
Figure 7 : Partie aérienne du cacaoyer .....	22
Figure 8: Photo et croquis de fleurs de cacaoyer .....	23
Figure 9: Photo du fruit du cacaoyer.....	24
Figure 10 : Génome du CSSV avec ses cinq cadres de lecture .....	28
Figure 11 : Cochenilles farineuses associées à des fourmis. ....	29
Figure 12 : Carte de distribution du swollen-shoot en Côte d'Ivoire .....	32
Figure 13 : Symptômes des déficiences minérales chez le cacaoyer.....	34
Figure 14 : Localisation de la zone d'étude .....	37
Figure 15 : Matériel édaphique et végétal utilisé.....	42
Figure 16 : Dispositif d'inventaire de la flore.....	44
Figure 17 : Dispositif d'emplacement des fosses pédologiques .....	46
Figure 18 : Schéma récapitulatif de la classification des sols selon la WRB .....	51
Figure 19 : Vues du microrelief des parcelles .....	54
Figure 20 : Densités des plantes d'ombrage réservoirs du swollen shoot .....	56
Figure 21 : Densités des plantes adventices réservoirs du swollen shoot.....	57
Figure 22 : Quelques profils des sols.....	58
Figure 23 : Nuages des variables et des sols explorés à Bouaflé.....	83
Figure 24 : Nuages des variables et des sols explorés à Kononfla .....	85

Figure 25 : Projections des variables et des individus de Bouaflé sur le plan factoriel (1x2).87

Figure 26 : Projections des variables et des individus de Kononfla sur le plan factoriel (1x2)

.....88

# *INTRODUCTION*

Le cacaoyer ou *Theobroma cacao* L., anciennement classée dans la famille des Sterculiaceae, est une plante pérenne tropicale de la famille des Malvaceae (Motamayor *et al.*, 2002). Il est originaire d'Amérique du sud et son centre d'origine se situe dans le bassin amazonien (Motamayor *et al.*, 2002). La culture a été importée pour la première fois de Sao Tome (Guinée Equatoriale) dans les années 1820, puis au Ghana en 1880 (Oro, 2011). Le cultivar Amelonado constitue encore la variété majoritairement présente en Afrique, où cette culture constitue la base de l'économie des pays producteurs (Oro, 2011). En effet, le cacao contribue à 0,4 pc de produit intérieur brut (PIB) du Togo, à 13 pc du PIB du Ghana et à 15 pc au PIB de la Côte d'Ivoire (BCEAO, 2014).

La cacaoculture joue particulièrement un rôle majeur dans l'économie de bon nombre de pays africains tels que la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Nigéria, le Bénin, le Togo, permettant ainsi à l'Afrique de détenir depuis longtemps le monopole de la production du cacao, avec environ 3,9 millions de tonnes de fèves de cacao et 14 millions d'emplois en Afrique de l'Ouest, notamment en Côte d'Ivoire, au Ghana, au Nigéria et au Togo. Ces pays produisent à eux seuls 70 pc de la production mondiale (Jagoret, 2011 ; Wessel & Quist-Wessel, 2015).

Avec une production de fèves qui s'élève à 1,7 millions de tonnes, soit 42 pc de l'offre mondiale, la Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de cacao (ICCO, 2015). La filière cacao contribue pour environ un tiers aux recettes d'exportation de ce pays et environ 20 pc à la création de la richesse nationale (BCEAO, 2014). La cacaoculture y est pratiquée sur une superficie de plus de deux millions d'hectares par plus d'un million de planteurs (Redd, 2017). Au plan social, environ six cent mille chefs d'exploitation font vivre près de six millions de personnes (Tano, 2012), constituant ainsi la principale source de revenu de milliers de petits planteurs en milieu rural.

Les zones de plus fortes productions cacaoyères initialement localisées à l'Est et au Centre-Est du pays, formaient ce que l'on a appelé en Côte d'Ivoire la "boucle du cacao". Avec les changements climatiques et l'appauvrissement des sols, cette boucle du cacao s'est déplacée à l'Ouest du pays, sous la poussée de flux migratoires venant aussi bien de l'intérieur du pays (Centre, Centre-Est, Nord), que de l'extérieur (pays de la sous-région). Avec plus de 36 pc de la production nationale, la principale zone de production de cacao en Côte d'Ivoire est actuellement le Centre-ouest, dont fait partie la région de la Marahoué. Dans cette région, la cacaoculture est malheureusement fortement menacée par la maladie du swollen shoot qui constitue une des nombreuses contraintes de la production cacaoyère (Kebé *et al.*, 2005).

D'une manière générale, les principales contraintes de la production de cacao en Côte d'Ivoire peuvent être classées en deux catégories selon leur origine (Freud *et al.*, 2000): Il s'agit d'une part, des contraintes abiotiques et les contraintes biotiques. Les premières sont caractérisées par les fluctuations des prix du marché et la rareté des forêts, quand les secondes sont marquées par le vieillissement des vergers. Ce vieillissement est dû au non renouvellement et au non entretien des vergers, mais aussi, à l'effet des maladies et des insectes ravageurs. Parmi les maladies et les ravageurs du cacaoyer, la pourriture brune des cabosses, les mirides et le swollen shoot sont responsables des plus grands dégâts (Kebé *et al.*, 2005 ; Tahi *et al.*, 2006 ; Assiri, 2006).

Le swollen shoot du cacaoyer est une maladie virale transmise par des cochenilles farineuses (*Formicococcus njalensis* (Laing) de la famille des Pseudococcidae. L'isolat le plus virulent de ce virus (Cocoa swollen shoot virus ou CSSV) est Agou1 qui, selon Thresh (1986), provoque des colorations rouges intenses et des décolorations, respectivement sur les jeunes feuilles et les feuilles adultes. Cet auteur signale aussi des gonflements de tiges et rameaux et des rabougrissements des cabosses dus au virus.

Le CSSV appartient au genre Badnavirus (famille des Caulimoviridae). Il mesure environ 121 à 130 nm de long et 28 nm de large, avec une capsid bacilliforme non enveloppée (Lockhart, 1990). Différentes méthodes, notamment la méthode de l'arrachage des pieds malades, les luttes chimique et biologique contre les vecteurs, la prémunition, l'utilisation de cordon sanitaire et de cultures de barrières et la sélection de variétés résistantes ont été mises en place pour lutter contre ce virus (Adu-Ampomah *et al.*, 1994 ; Ollennu *et al.*, 1996 ; Ollennu & Owusu, 2002 ; Adu-Ampomah *et al.*, 2003 ; Dogbé *et al.*, 2006). Ces méthodes ont permis d'atténuer son action sans toutefois réussir à l'éradiquer.

Depuis 2003, la maladie est réapparue de manière fulgurante dans le verger ivoirien, constituant ainsi une menace pour l'économie cacaoyère ivoirienne (Kébé & N'guessan, 2003). La recherche de solution à cette menace n'ayant encore occulté le sol, support naturel du verger cacaoyer, amène à la question de recherche suivante : "des facteurs édaphiques ne conditionnent-ils pas la vulnérabilité du cacaoyer vis-à-vis du virus du swollen shoot ?".

La présente recherche a été initiée pour répondre à cette question. À ce jour, l'état des lieux de la recherche ayant montré que tous les moyens de lutte contre la maladie du swollen shoot se sont avérés inefficaces, il est nécessaire de vérifier si l'état de fertilité du sol pourrait contribuer à expliquer la persistance de la maladie au niveau du cacaoyer. L'étude vise

globalement à renforcer les connaissances sur les facteurs édaphiques impliqués dans la persistance de la maladie du swollen shoot. Ainsi, ces facteurs pourraient être pris en compte dans la recherche de solution contre la maladie ou dans l'implantation de nouveaux vergers.

De façon spécifique, il s'agit de :

- 1) inventorier les espèces végétales associées à la maladie du swollen shoot dans la zone d'étude pour en déduire un diagnostic ;
- 2) comparer les propriétés morphophysiques des sols sous cacaoyers atteints de swollen shoot à celles des sols sous cacaoyers sains afin d'établir un diagnostic sol de la maladie ;
- 3) comparer les propriétés chimiques des sols sous cacaoyers atteints de swollen shoot à celles des sols sous cacaoyers sains afin de compléter le diagnostic sol de la maladie préétabli.

L'étude est soutenue par trois hypothèses énoncées comme suit :

- 1) des contraintes morphophysiques du sol impacteraient négativement la nutrition minérale et hydrique du cacaoyer au point de le rendre vulnérable au virus du swollen shoot ;
- 2) des déséquilibres entre les minéraux du sol expliqueraient la présence de la maladie du swollen shoot chez le cacaoyer ;
- 3) aucune corrélation n'existe entre la qualité du sol et la maladie du swollen shoot.

Le présent mémoire qui rend compte du travail réalisé, comporte trois grandes parties. La première partie porte sur les généralités de l'étude. Elle est subdivisée en quatre grands paragraphes. Le premier fait l'état des connaissances sur les sols en insistant sur les facteurs édaphiques en cacaoculture. Le second décrit l'origine, la biologie et la physiologie du cacaoyer. La maladie du swollen shoot du cacaoyer et la persistance de cette maladie sont abordées dans le troisième paragraphe. Le quatrième paragraphe, enfin, présente le cadre de l'étude.

La deuxième partie de la thèse est scindée en deux paragraphes. L'un décrit le matériel utilisé et l'autre, les méthodes de l'étude.

Dans la troisième et dernière partie, les résultats obtenus sont analysés dans un premier paragraphe et le deuxième paragraphe est consacré à leur discussion.

## **Introduction**

Une conclusion générale assortie de recommandations et de perspectives, ainsi qu'une liste de références bibliographiques complètent le document.

*PREMIÈRE PARTIE :*  
*GÉNÉRALITÉS*

## I.1. NOTIONS DE SOL ET DE FACTEURS ÉDAPHIQUES

### I.1.1. Définitions du sol

Dokuchaev (1883), considéré comme le père de la pédologie moderne, définit le sol comme un corps, structuré en horizons, dynamique, vivant, variant et différent de la roche-mère dont il est issu. Cette roche a subi plus ou moins profondément un changement sous l'influence du climat et de différentes espèces d'organismes. Ce changement affecte aussi la composition, la structure et la couleur des produits d'altération.

La définition du sol a beaucoup varié au cours des temps à la suite de Dokuchaev (1883). Elle a dépendu essentiellement de la manière dont on percevait le sol et son utilisation (Dabin, 1970).

Les premiers chercheurs qui étaient avant tout des agronomes avaient considéré le sol comme “un support pour la végétation et une réserve pour son alimentation” suite au constat selon lequel toute plante puise dans le sol les éléments nutritifs dont elle a besoin pour son développement.

Certaines définitions ont été influencées par cette première conception du sol. Ainsi, Demolon (1949) attire l'attention sur la localisation du sol à la limite de l'atmosphère et de la lithosphère, ce qui fait qu'il apparaît comme la résultante de l'interaction de ces deux composantes. Sous cet angle, le sol se présente comme “la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, qui résulte de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques”.

Le “sol agricole” est, par ailleurs, défini comme la couche supérieure du terrain dite “couche arable” que l'agriculteur travaille et entretient afin d'y faire développer des cultures. Ce procédé s'accompagne d'une modification de la morphologie, des propriétés et de la composition du sol initial. En effet 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).

La définition du sol s'est par la suite perfectionnée car les différents auteurs se sont efforcés de bien montrer l'individualité du sol qui est désormais considéré comme un corps naturel. Le sol est aussi 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). Cette définition insiste sur plusieurs facteurs, notamment, l'individualisation du sol, la composition qui est de nature organo-minérale, la morphologie, les propriétés physiques, chimiques et biologiques qui sont différentes de celles du matériau dont il dérive.

### **I.1.2. Rôles du sol**

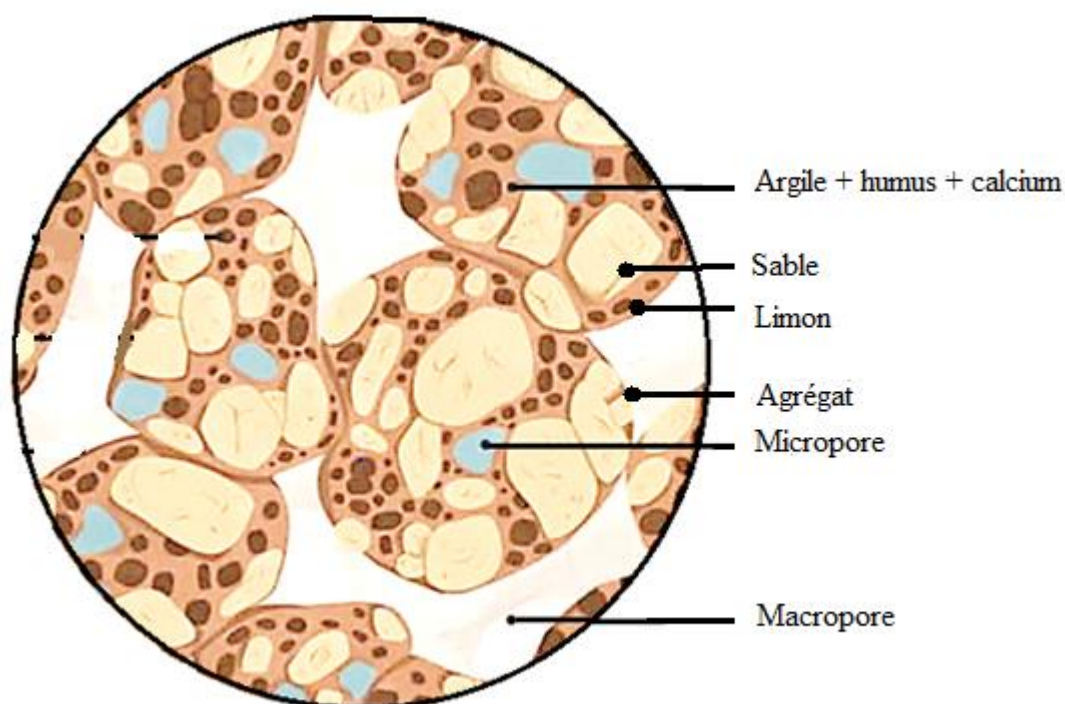
Le sol fournit de nombreux services à l'être humain, qualifiés de services écosystémiques. Sur la base des définitions précédentes du sol, Dabin (1970) distingue différentes fonctions du sol : fonctions d'habitat pour de nombreux organismes, de régulation des cycles biogéochimiques, de production de biomasses, de support par laquelle le sol sert de fondement à des constructions, de source de matière première et d'archivage qui met en évidence la capacité du sol à conserver des informations sur l'histoire naturelle et culturelle.

Les trois premières fonctions représentent des fonctions naturelles du sol alors que les trois dernières se réfèrent plutôt à des activités humaines. Le sol ne peut s'acquitter de la majorité des fonctions citées que si son bilan hydrique et son aération sont conservés de sorte que les plantes y trouvent l'espace idéal pour le développement de leurs racines. Il faudrait aussi que le sol soit caractérisé par un équilibre entre les nutriments et les organismes qu'il contient. Sa teneur en polluants doit en plus rester suffisamment faible pour ne pas impacter négativement la vie dans le sol.

### **I.1.3. Principaux facteurs édaphiques**

#### **I.1.3.1. Structure et porosité du sol**

La structure du sol représentée sur la figure 1 est définie comme une traduction de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des constituants et des propriétés du sol (Dexter, 1988). Elle détermine ainsi la répartition dans l'espace de la matière solide et des vides ou pores. Ces pores sont occupés soit par l'eau, soit par l'air. Cette répartition ou mode d'assemblage des particules conditionne l'ensemble des propriétés physiques fondamentales du sol telles que l'aération et les possibilités de respiration des racines, puis la rétention par les forces capillaires d'une réserve d'eau utilisable par les plantes (Duchaufour, 1994).



**Figure 1 : Schéma de structure du sol**

Source : Desaulniers (2020).

La structure du sol s'observe et se décrit à deux niveaux : (i) à l'échelle macroscopique observable à l'œil nu et (ii) à l'échelle microscopique. C'est le mode d'assemblage spatial des particules du sol aboutissant à la formation des agrégats. Un agrégat est en effet, un agglomérat de particules dont la cohésion interne est assurée par les argiles, le fer, l'eau et la matière organique qui en augmente la stabilité. L'écoulement des eaux dans le sol et les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère peuvent être entravés par une structure inadéquate (Calvet, 2003). Une bonne structure au contraire assure dans le sol une grande facilité de circulation de l'eau, une bonne respiration des racines, une bonne germination des graines et une bonne exploration du sol par les racines pour des ressources nutritives (Soltner, 2000).

L'arrangement des particules de sol entre elles permet de créer, conjointement, une porosité qui désigne la fraction du volume total du sol occupé par des vides (eau + air). Elle se caractérise par la distribution de la taille des pores, par leur forme, leur connectivité. Ce réseau poreux intervient dans de nombreux processus qui se produisent dans le sol tels que, la circulation de l'eau et de l'air, le transport de solutés et la croissance et le développement des racines. Il en dérive que la porosité peut être classée en fonction de la taille des pores mais

également de leur origine. On distingue ainsi la porosité structurale correspondant uniquement à la macroporosité, qui inclut les fissures dues aux cycles de dessèchement / humectation, les pores biologiques dus à l'action des racines et aux galeries de vers de terre et la porosité texturale, correspondant à l'agencement des particules de sable, limon, argile et matière organique (Simunek *et al.*, 2005).

### I.1.3.2. Texture du sol

La texture du sol est la répartition des particules du sol inférieures à 2 mm par catégorie de taille (ou granulométrie des particules < 2 mm). Ces particules déterminent la terre fine du sol (Gobat *et al.*, 2010).

La texture du sol est une propriété intéressante du sol en ce sens que la granulométrie des particules dans un sol a des effets sur la densité, la porosité, la circulation de l'eau et de l'air et la rétention de l'eau. Elle est très peu influencée par le travail du sol, ce qui fait qu'elle évolue peu dans le temps. C'est ainsi que la plupart des systèmes de classification des sols sont basés sur cette propriété du sol qui est alors considérée comme le critère de base de la classification (Bittelli *et al.*, 1999 ; Chesworth, 2008).

La texture influence toutes les autres propriétés et constitue un caractère fondamental du sol (Bronick & Lal, 2005). La texture grossière, la texture moyenne et la texture fine sont les trois classes texturales distinguées (Figure 2). La première classe est constituée de sables, de sables limoneux, de limon sableux, avec moins de 18 pc d'argile et plus de 65 pc de sable. Les textures moyennes sont constituées de limons sableux, limons, limons argilo-sableux, limons fins, limons très fins, limons argileux fins et limons argileux, avec moins de 35 pc d'argile et moins de 65 pc de sables. La fraction sable peut s'élever jusqu'à 82 pc si celle d'argile est au moins de 18 pc. La texture fine, enfin, est constituée d'argiles, argiles limoneuses, argiles sableuses, limons argileux et limons argileux fins, avec plus de 35 pc d'argile.

La production agricole peut être influencée par la texture du sol en ce sens que cette dernière conditionne l'humidité du sol, qui est un paramètre majeur en agriculture. L'humidité du sol constitue en effet un facteur essentiel pour le maintien de l'équilibre hydrique des végétaux, la croissance des plantes, le rendement des cultures et la gestion de l'irrigation (FAO, 2002). Les plantes sont généralement plus affectées en période de croissance végétative et de

floraison qu'au stade de fructification. Une submersion supérieure à 48 h chez la plupart des cultures, induit presque systématiquement la perte de rendement (FAO, 2017).

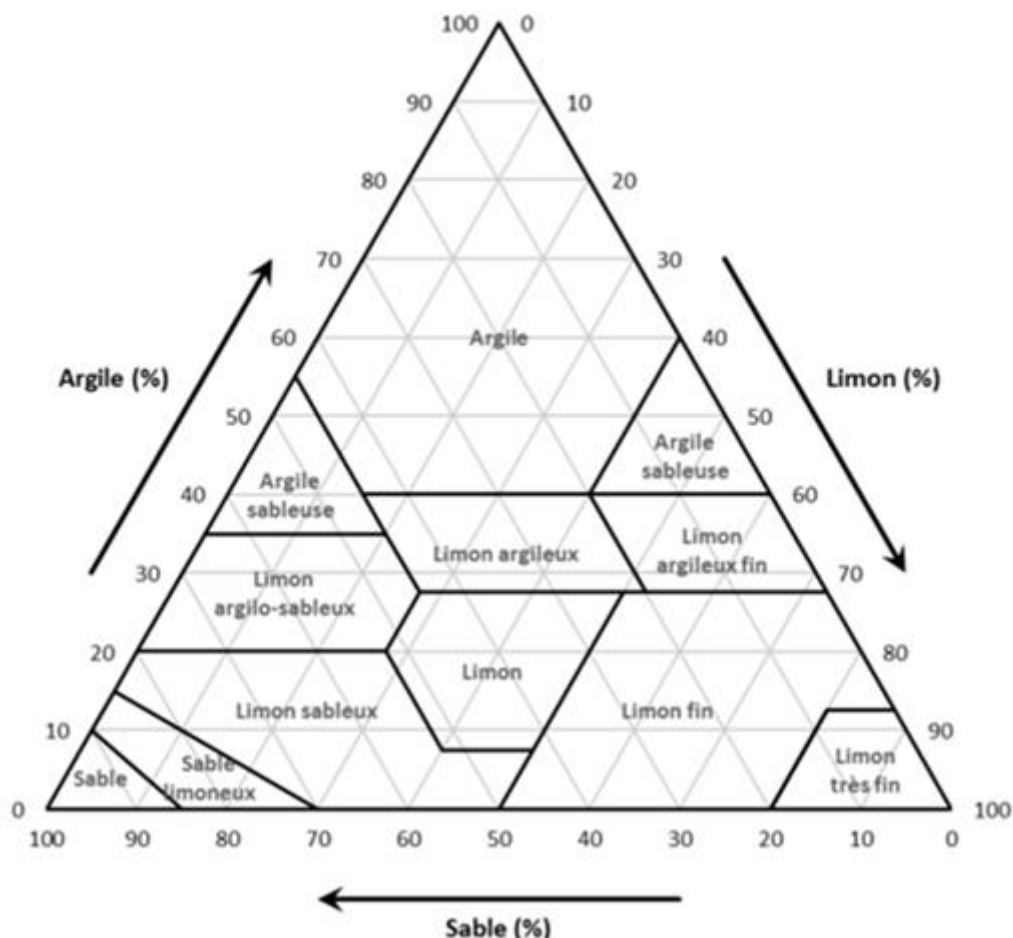


Figure 2 : Diagramme textural

Source : USDA (1987).

### I.1.3.3. Profondeur du sol

La profondeur utile du sol est la profondeur facilement exploitable par les racines. Cette profondeur peut être limitée par un certain nombre de caractéristiques, notamment la compacité trop forte des horizons de subsurface, l'hydromorphie à faible profondeur, le pourcentage et l'épaisseur inacceptables de gravillons, la présence de cuirasse ou carapace représentant un "goulot d'étranglement physique".

La profondeur du sol est un indicateur clé de la qualité du sol car elle conditionne fortement le développement des cultures. Un sol plus profond facilite le développement racinaire et sa réserve utile est également plus importante. En effet, les racines des plantes cultivées, si elles ne sont pas limitées par la profondeur du sol, descendent profondément (environ 90 cm pour les céréales par exemple). Les sols profonds jouent ainsi divers rôles, à savoir, les possibilités d'enracinement des plantes annuelles et pérennes, cultivées ou spontanées, l'ancrage mécanique des arbres, l'aération suffisante pour permettre une activité biologique et le développement racinaire. Le sol profond facilite le stockage et la circulation de l'eau, le cycle biogéochimique naturel (remontées du calcium et autres minéraux via les racines), le filtrage et l'épuration des eaux de pluie et des effluents liquides, puis le stockage du carbone (Baize, 2022).

### **I.1.3.4. Humidité du sol**

Selon Khasirikani (2009), l'eau se présente sous quatre états différents en fonction des particules et de la taille des pores dans le sol. Ces états incluent l'eau hygroscopique collée aux particules fines du sol et formant une mince pellicule autour de ces particules. Le fait qu'elle soit retenue très énergétiquement par ces particules rend cette eau inutilisable par les plantes. L'eau capillaire non absorbable par les plantes, autre état de l'eau, occupe les pores dont la taille est  $< 0,2 \mu\text{m}$ . Elle est aussi retenue énergétiquement par le sol. L'eau capillaire absorbable est, quant à elle, l'eau collée dans le sol qui occupe les pores dont la taille est comprise entre  $0,2 \mu\text{m}$  et  $8 \mu\text{m}$ . Elle est absorbée par les racines des plantes ou s'évapore par migration ascendante. Le quatrième état de l'eau est l'eau de gravité. Cette eau occupe des pores de grande taille ( $> 8 \mu\text{m}$ ), faisant qu'elle s'écoule à travers le sol sous l'action de la pesanteur, sauf lorsque le drainage est impossible. Les seuils d'eau dans le sol impactant la vie de la plante sont le point critique et le point de flétrissement.

Pour Khasirikani (2009), le point de flétrissement est la teneur minimale en eau du sol en deçà de laquelle la plante ne peut vaincre la tension capillaire de l'eau. Cela indique le degré de dessèchement du sol ne pouvant plus permettre à une plante de prélever l'eau dont elle a besoin. En effet, à cet état, la quantité d'eau dans le sol est si faible que la plante ne peut plus absorber ce qui est nécessaire à sa survie. Elle subit dès lors des dégâts irréversibles et meurt. Le taux d'humidité au point de flétrissement est constant pour un sol donné ; il est directement fonction de la teneur du sol en éléments fins (argile et limon). Cette limite inférieure d'humidité dépend donc du sol et non de la plante. À partir de ce stade, la plante

subit des dégâts irréversibles et meurt. Toutefois, avant le point de flétrissement, il y a le point critique correspondant à la quantité d'eau à partir de laquelle la plante commence à souffrir d'un manque d'eau, ce qui affecte sa croissance (Khasirikani, 2009).

Le manque d'eau dans le sol n'est pas le seul problème hydrique pour les plantes. En effet, pour beaucoup d'auteurs (Forestier, 1964 ; Concaret, 1981 ; Petithuguenin, 1998 ; Yoro, 2004 ; Koko *et al.*, 2006), la présence d'un horizon hydromorphe à faible profondeur est aussi un problème crucial. Cet état survient en général si les horizons profonds sont argileux et compacts. Les eaux de pluies ne s'évacuent alors que très lentement ou stagnent dans les couches du sol y créant un excès. Cela crée des conditions d'hypoxie dans le sol qui est un obstacle physique à l'enracinement des cultures.

### **I.1.3.5. pH et acidité du sol**

Le pH est défini comme le logarithme décimal de la concentration d'une solution en ion  $H^+$ . IL permet d'approfondir les modalités d'interaction entre les ions et les surfaces absorbantes du sol (Mirsal, 2004). Sa mesure permet de caractériser les sols en fonction de leur acidité ou de leur alcalinité. Mesuré dans une suspension aqueuse, le pH a un résultat correspondant à la teneur en ions hydrogène et est attribué à l'une des six classes prévues : très acide, acide, peu acide, neutre, peu alcalin et alcalin (Tableau I).

Le pH du sol est l'une des conditions environnementales qui affectent la qualité de la croissance des plantes (Flisch *et al.*, 2017). Selon Thomas (2010), le pH idéal du sol est proche de la neutralité, et les sols neutres ont des pH allant de 6,5 (pH légèrement acide) à 7,5 (pH légèrement alcalin). Il a été déterminé que la plupart des nutriments végétaux sont disponibles de façon optimale pour les plantes dans cette plage de pH qui s'avère donc en général très compatible avec la croissance des racines des plantes. Flisch *et al.* (2017) donnent des détails sur les plages de pH du sol favorables au développement de plantes spécifiques.

Pour ces auteurs, dans les sols acides (pH de 5,0 à 5,5), les azalées, les rhododendrons, les bleuets et les conifères se développent mieux. Les sols peu acides (pH de 5,6 à 6,5) sont, quant à eux, favorables au développement des légumes, des herbes et de la plupart des plantes ornementales. Les valeurs de pH du sol supérieures ou inférieures à ces deux plages décrites peuvent entraîner une croissance moins vigoureuse et des carences nutritionnelles chez les plantes. En effet, les pH extrêmes ont un impact majeur sur la croissance des plantes, lié à la

disponibilité des éléments nutritifs ou à la concentration dans le sol des minéraux toxiques pour les plantes. Cet état de fait est aussi observé dans les sols très acides où l'aluminium et le manganèse peuvent devenir plus disponibles et plus toxiques pour la plante (Flisch *et al.*, 2017).

**Tableau I : Classification de l'acidité du sol**

pHeau	Appréciation
< 5,0	Très acide
5,0 à 5,5	Acide
5,6 à 6,5	Peu acide
6,5 à 7,5	Neutre
7,5 à 7,6	Peu alcalin
> 7,6	Alcalin

Source : Sparks (2003), modifié.

### I.1.3.6. Teneurs en éléments nutritifs du sol

Les nutriments du sol se classent en trois groupes essentiels : les éléments majeurs (N, P, K) pour la croissance et la structure, les éléments secondaires (Ca, Mg, S) impliqués dans la résistance et la synthèse des protéines, et les oligo-éléments (Fe, Zn, Mn, B, Cu, Mo) requis en faibles quantités pour les processus enzymatiques et métaboliques, tous cruciaux pour la physiologie et le développement des plantes (CIRAD, 2020).

Toutefois, la seule connaissance des teneurs en ces éléments nutritifs ne permet pas de se prononcer sur la fertilité du sol ou l'aptitude du sol aux cultures (Berner, 2013). En effet, cette fertilité du sol dite fertilité minérale est secondaire et, de ce fait, elle doit être couplée à une teneur importante en matière organique de l'horizon de surface (au moins 3,5 pc), ce qui a pour effet de favoriser l'alimentation de la plante en améliorant la texture du sol et son pouvoir de rétention en eau.

## I.1.4. Facteurs édaphiques en cacaoculture

### I.1.4.1. Roche-mère

Les sols utilisés en général pour la cacaoculture sont ceux formés sur granitogneiss calco-alcalin, ou sur schistes plus ou moins métamorphiques. Les roche-mères donnant les meilleurs sols pour cette culture restent les dolérites, les schistes amphibolitiques et toutes les roches analogues (Verlière, 1981). Les sols sur roches granitiques, au contraire très leucocrates, sont souvent peu recommandables tout comme les sols sur sables quartzeux ou sur alluvions et colluvions sablo-graveleuses (Kassin *et al.*, 2012).

### I.1.4.2. Morphologie du sol

Plusieurs travaux (Koko *et al.*, 2009 ; Kassin *et al.*, 2012 ; Koko, 2014 ; CNRA, 2015, etc.) montrent qu'une meilleure croissance du cacaoyer requiert certaines conditions du sol, notamment la profondeur, la structure, la texture et l'hydromorphie.

Le cacaoyer requiert effectivement des sols profonds de 1 à 1,5 m, avec une structure sans cailloux ou pierres en quantité excessive (taux pondéral d'éléments grossiers n'excédant pas 30 pc), ce qui permet une bonne pénétration des racines latérales et du pivot. Cette condition optimale de culture du cacaoyer doit permettre une bonne rétention en eau du sol, ainsi qu'une bonne aération et un bon drainage (sol non hydromorphe). Ainsi, les sols sablo-argileux ou argilo-sableux et limono-argileux sont les plus productifs tandis que les sols hydromorphes et sols à hydromorphie accentuée et superficielle sont à éviter. Il en est de même pour les sols à cuirasse peu profonde.

### I.1.4.3. Propriétés chimiques du sol

#### ❖ Eléments chimiques et équilibres chimiques

La culture du cacao exige aussi de bonnes propriétés chimiques au niveau des couches superficielles du sol, ce qui implique que ces couches soient riches en matière organique. Smith (1980) estime à 3 pc le taux minimal de matière organique requis.

La teneur moyenne en potassium pour une bonne nutrition minérale se situe à  $0,7 \text{ cmol.kg}^{-1}$  (Snoeck *et al.*, 2016). Des travaux sur la fertilité des sols en cacaoculture menés dans plusieurs pays producteurs ont confirmé l'existence de conditions optimales de nutrition minérale.

Au Togo, Jardin & Vaast (1990), puis Jagoret *et al.* (1992) ont montré que la valeur optimale du phosphore assimilable en cacaoculture est de 100 mg.kg<sup>-1</sup>. Ces mêmes auteurs ont également montré qu'une correction de la teneur du sol en bases (K, Ca, et Mg) est impossible lorsque le taux de saturation du sol est égal à 100 pc.

Par ailleurs, plusieurs essais conduits au Cameroun ont confirmé que 8 pc de K, 68 pc de Ca et 24 pc de Mg par rapport à la somme K+Ca+Mg (cmol(+).Kg<sup>-1</sup>) et avec 1,5 comme rapport N/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> permettent d'obtenir de bons rendements (Smith, 1980 ; Boyer, 1982 ; Mossu, 1990). Mossu (1990) insiste sur le fait que ces équilibres ne sont valables que si la teneur en phosphore assimilable déterminée par la méthode Olsen-Dabin est au moins égale à 180 mg.kg<sup>-1</sup> de P et que le taux de saturation minimum en bases échangeables dépasse 60 pc.

### ❖ Acidité

Le pH des sols sous cacaoyers doit être proche de la neutralité (environ pH = 7) même si un pH acide (pH = 4,5-6) des sols ne constitue pas une contrainte pour le cacaoyer. Cette plante peut également se développer sur des sols à pH légèrement basique (pH = 6,7-7,5) (Smith, 1980 ; Appiah *et al.*, 2006 ; Tossah *et al.*, 2006 ; Koko, 2008). La production est par contre fortement limitée en dessous de pH = 4,5 ou au-dessus de pH = 8 (Aubert & Moulinier, 1954).

## I.2. CACAOYER

### I.2.1. Origine et répartition géographique

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) est un arbuste tropical à feuilles persistantes appartenant au genre *Theobroma* et à la famille des Malvaceae (Alverson *et al*, 1999 ; Pinheiro *et al*, 2011). Il est l'une des espèces cultivées à des fins commerciales (Deheuvels, 2011). Il est originaire du bassin de l'Amazonie en Amérique du sud où il se développe spontanément (Aké-Assi, 2002). Selon Dublin (1972), les cacaoyers cultivés se répartissent en trois grandes variétés, la variété étant un groupe morpho-géographique distinct au sein de l'espèce (Motamayor *et al*, 2002). Ces variétés sont : les Forastero, les Criollo et les Trinitario (Figure 3).

La variété Forastero ou cacao "étranger" est considérée comme la première variété de cacao apparue bien avant l'avènement de l'humanité. Cette variété aurait subi des mutations lors de l'utilisation de ses graines au fil des âges, qui l'auraient transformé en Criollo. La variété Criollo est connue et cultivée par les Olmèques, les Toltèques et les Mayas. Elle est présente du Mexique jusqu'en Amérique centrale. La troisième variété de cacao appelée Trinitario, tire son nom de l'île de Trinidad, où elle a été identifiée pour la première fois. C'est un hybride issu du Forastero et du Criollo, ce qui fait que ses caractéristiques sont proches de celles de l'un ou l'autre de ses deux parents.

Les études montrent qu'à partir de son berceau situé au Mexique, la culture du cacao a été propagée vers l'Amérique latine et l'Asie par les colons espagnols (Micheli, 2009). L'histoire de la cacaoculture est donc liée à l'histoire de l'expansion coloniale. En effet, au XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup>, on a assisté, sous l'influence des hollandais, à une redistribution du cacao dans toutes les îles du Sud-Est Asiatique, quand les anglais l'introduisaient sur l'île de Madagascar en partant de Ceylan. C'est à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle que les portugais introduisent le cacao en Afrique, via les îles de Sao Tomé et Príncipe. Le cacao arrive enfin en Côte d'Ivoire vers 1890 sur les bords de la Comoé dans la région d'Aboisso, à partir du Ghana. Le désintérêt des autochtones pour cette nouvelle culture avait conduit le colon à la rendre obligatoire (Mossu, 1990). Aujourd'hui, la culture des Forastero s'étend du Ghana à la Côte d'Ivoire et celle des Trinitario, du Cameroun au Nigéria (Verlière, 1981).



**Figure 3: Variétés morpho-géographiques de cacaoyers cultivés dans le monde**

A: Criollo ; B: Forastero ; C: Trinitario

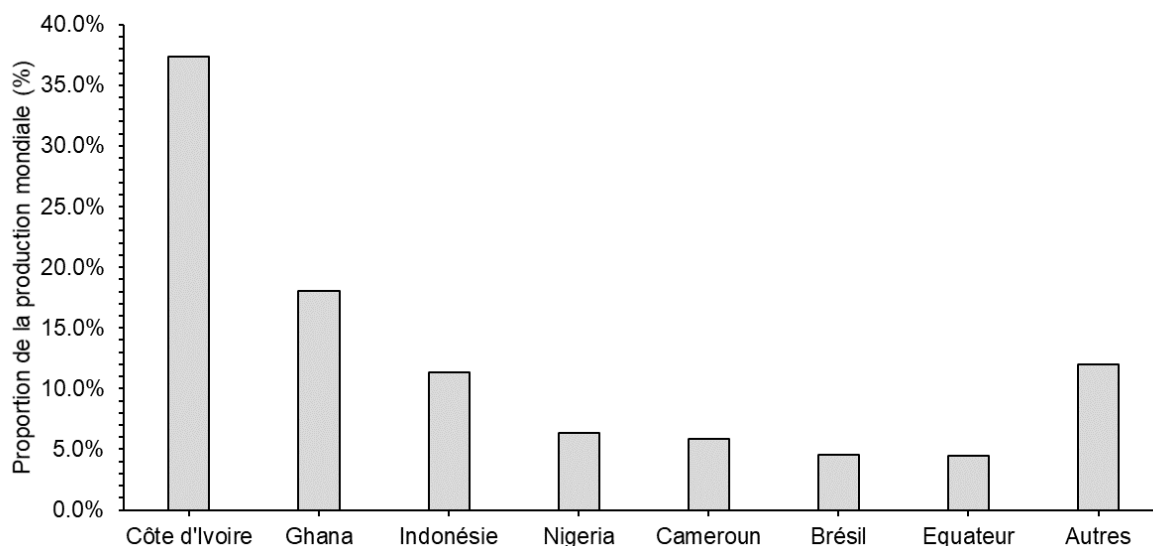
Source : Kouadio (2022).

Le cacaoyer est cultivé dans diverses régions du monde, dont les principaux producteurs de 2011 à 2018, pour l'Afrique, sont la Côte d'Ivoire, premier producteur avec 37,5 pc de la production mondiale, le Ghana avec 18 pc, le Nigéria avec 6,5 pc et le Cameroun avec 6 pc. En Asie du Sud-Est, le principal producteur de cacao est l'Indonésie avec 11 pc de la production mondiale. En revanche, l'Amérique latine comprend de petits producteurs qui sont le Brésil (5 pc de tonnage mondial) et l'Équateur (5 pc du tonnage mondial) (Figures 4 et 5). L'ensemble des autres pays producteurs dispose de 13 pc (FAOSTAT, 2020). La Côte d'Ivoire demeure à ce jour (2024) le premier producteur mondial de cacao, devant le Ghana, avec environ 45 pc de la production mondiale correspondant à 1,8 millions de tonnes de fèves de cacao produites (Statistat, 2025).



**Figure 4 : Régions de production cacaoyère dans le monde en 2020**

Source : FAO (2020).



**Figure 5: Répartition par pays de la production mondiale de cacao en 2018**

Source : FAOSTAT (2020).

### I.2.2. Position systématique

Le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) appartient au genre *Theobroma*. Il est aussi appelé cacaotier et comporte vingt-deux (22) espèces cultivées à ce jour. Parmi ces espèces, seul *Theobroma cacao* L. est cultivé pour la commercialisation de ses fèves (Kouassi, 2010). Longtemps classé dans la famille des Sterculiaceae selon la classification classique, le cacaoyer a été récemment reclassé dans la famille des Malvaceae selon la classification phylogénique ou classification APG (Silva & Figueira, 2004) décrite ci-après.

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

### **I.2.3. Classification phylogénétique**

L'espèce *Theobroma cacao* L. est diploïde ( $2n = 2x = 20$ ) et dotée d'un petit génome estimé à 0,43 pg ou  $0,415 \times 10^9$  pb (Clement *et al.*, 2003 ; Micheli, 2009). La classification distingue trois grands groupes morpho-géographiques au sein de l'espèce *Theobroma cacao* L.

Les Forastero originaires d'Amérique du sud, très variables et comportant des arbres vigoureux caractérisés par une grande précocité et résistance aux maladies. A contrario, les Criollo, domestiqués en Amérique Centrale, sont moins vigoureux et moins résistants aux maladies que les Forastero. Cependant, cette variété donne un chocolat fin de meilleure qualité. Les Trinitario, par contre, constituent une variété hybride entre les deux premières citées.

En somme, les Forastero fournissent la presque totalité des fèves de cacao provenant du Brésil et de l'Ouest Africain, ce qui constitue 80 pc de la production mondiale de cacao (Pitcholo, 1990).

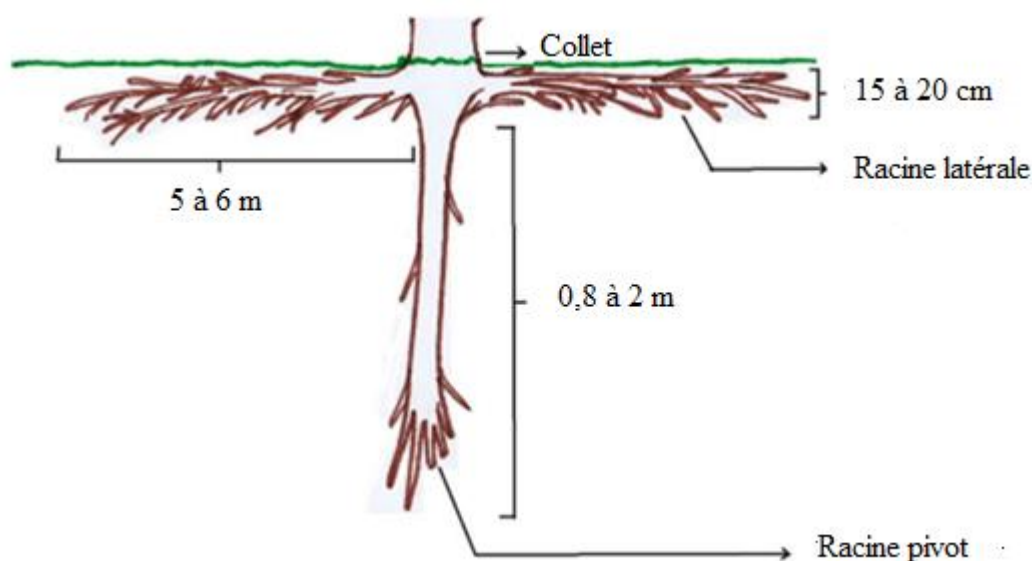
### **I.2.4. Morphologie et biologie du cacaoyer**

#### **I.2.4.1. Système racinaire**

Le système racinaire comporte trois grandes parties : le collet, le pivot et les racines latérales (Figure 6).

Le collet est le point de séparation de la tige et de la racine. Le pivot, en s'enfonçant verticalement dans le sol (développement orthotrope) atteignant 1,5 à 2 m de profondeur, permet non seulement de bien fixer la plante dans le sol, mais aussi, de puiser l'eau et les éléments nutritifs du sol (Braudeau, 1969). Les racines latérales, quant à elles, se développent dans la partie supérieure du pivot dans la couche humifère du sol pour y tirer les nutriments et l'eau. En effet, les racines latérales du cacaoyer adulte ont à leurs extrémités des ramifications qui se développent pour donner un abondant "chevelu racinaire" dans une zone périphérique à environ 2,5 cm du tronc. Le cacaoyer adulte possède ainsi 8 à 10 racines latérales principales réparties autour du pivot dont le rôle est d'assurer la nutrition hydrique et minérale de la plante (Mossu, 1990).

Ainsi, un meilleur développement racinaire du cacaoyer, et donc un bon développement de l'ensemble du cacaoyer, est conditionné par une grande profondeur utile du sol.



**Figure 6 : Système racinaire du cacaoyer**

Source : Marnier (2021).

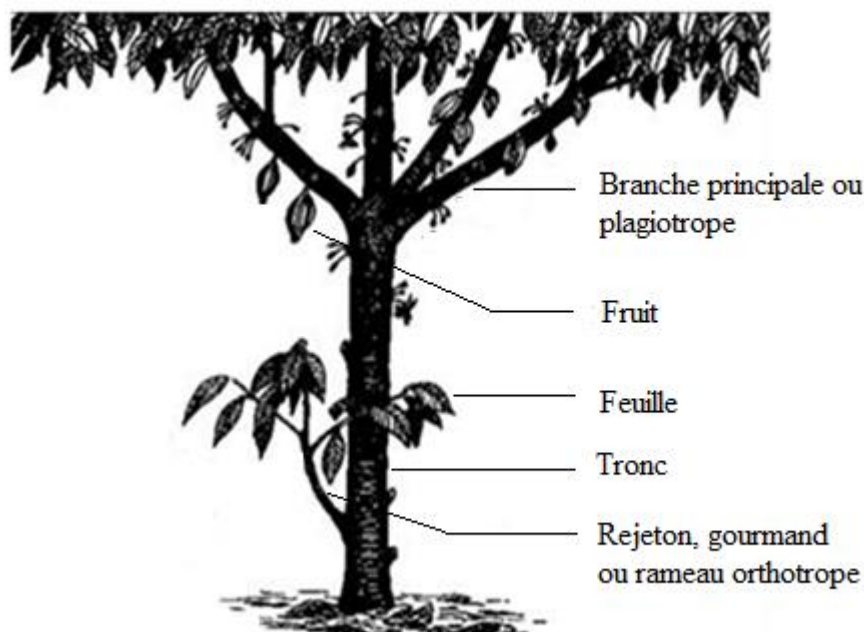
#### I.2.4.2. Partie aérienne

La partie aérienne est formée du tronc, des branches et des feuilles (Figure 7). Le tronc est la partie de l'arbre formant sa structure principale. Il s'étend du sol aux branches. Le jeune plant obtenu après germination de la fève, croît verticalement par pousses successives. Cette croissance dure environ 18 mois. A la fin, l'extrémité du tronc se divise en général en cinq branches pour former la couronne à environ 1,5 m du sol (Verlière, 1981).

Les branches sont des ramifications latérales du tronc d'un arbre. Le nombre de branches charpentières qui forme la couronne est estimé à cinq dans les conditions idéales de culture. La poussée des branches se fait de façon latérale (rameaux plagiotropes). Chaque branche donne naissance à une ou plusieurs branches sur lesquelles des gourmands se développent pour former des rameaux orthotropes (Aké-Assi, 1984).

Les feuilles sont les parties aériennes d'un végétal qui permettent de capter la lumière, élément essentiel à la photosynthèse. Elles sont alternées, simples, oblongues, acuminées. Elles mesurent 25 à 30 cm de longueur et 10 à 15 cm de largeur (Aké-Assi, 1984) et peuvent atteindre une surface de 500 cm<sup>2</sup> (Verlière, 1981). Au stade juvénile, la coloration des feuilles varie du vert-jaune au rose-orangé ou violacé, plus ou moins foncé selon les variétés. À l'état adulte, ces feuilles prennent une coloration vert-foncé. Chaque feuille est rattachée au rameau

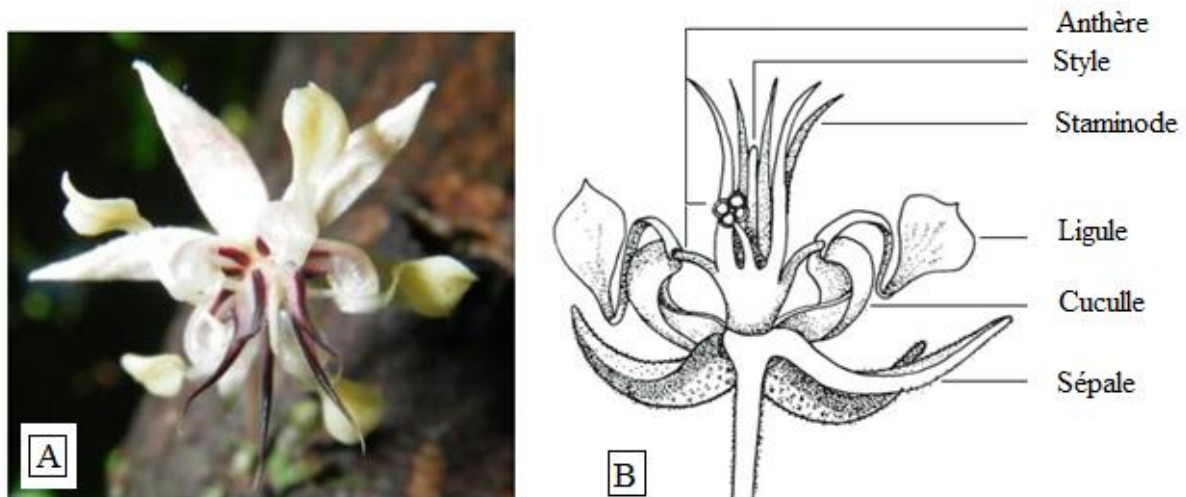
par un pétiole. À l'aisselle du pétiole, se trouve un bourgeon axillaire qui peut donner naissance à un rameau. La durée de vie de la feuille varie de huit à dix mois (Mossu, 1990).



**Figure 7 : Partie aérienne du cacaoyer**

Source : Marnier (2021).

Sur le tronc et les branches, les fleurs du cacaoyer apparaissent à des points fixes appelés coussinets floraux. Elles sont de petites tailles, de couleur blanchâtre ou rose (Figure 8.A). L'inflorescence est de type cyme bipare. Les fleurs, pentamères, ont cinq sépales et cinq pétales libres. L'androcée comprend deux verticilles soudés à la base. L'un extrême, comporte cinq staminodes opposés aux sépales. L'autre, interne, présente cinq étamines fertiles opposées aux pétales. Les filets du pétale sont divisés en deux ou trois ramifications, portant chacune une anthère biloculaire. Les filets sont incurvés, les anthères se trouvant cachées à l'intérieur de la cuculle du pétale (Aké-Assi, 1984). L'ovaire, supère, à placentation axile, comprend cinq carpelles opposés aux pédicelles. Les fleurs sont dotées d'un ovaire contenant environ trente à soixante ovules (Aké-Assi, 1984 ; Deheuvels, 2011). La Figure 8 montre le détail de ces diverses pièces florales du cacaoyer. La floraison est la formation, puis l'épanouissement d'une fleur ou d'une inflorescence, suivie de la période durant laquelle les fleurs restent épanouies. Après la pollinisation, environ 1 pc des fleurs produites se transforme en cabosse, qui est un gros fruit contenant les fèves de cacao.

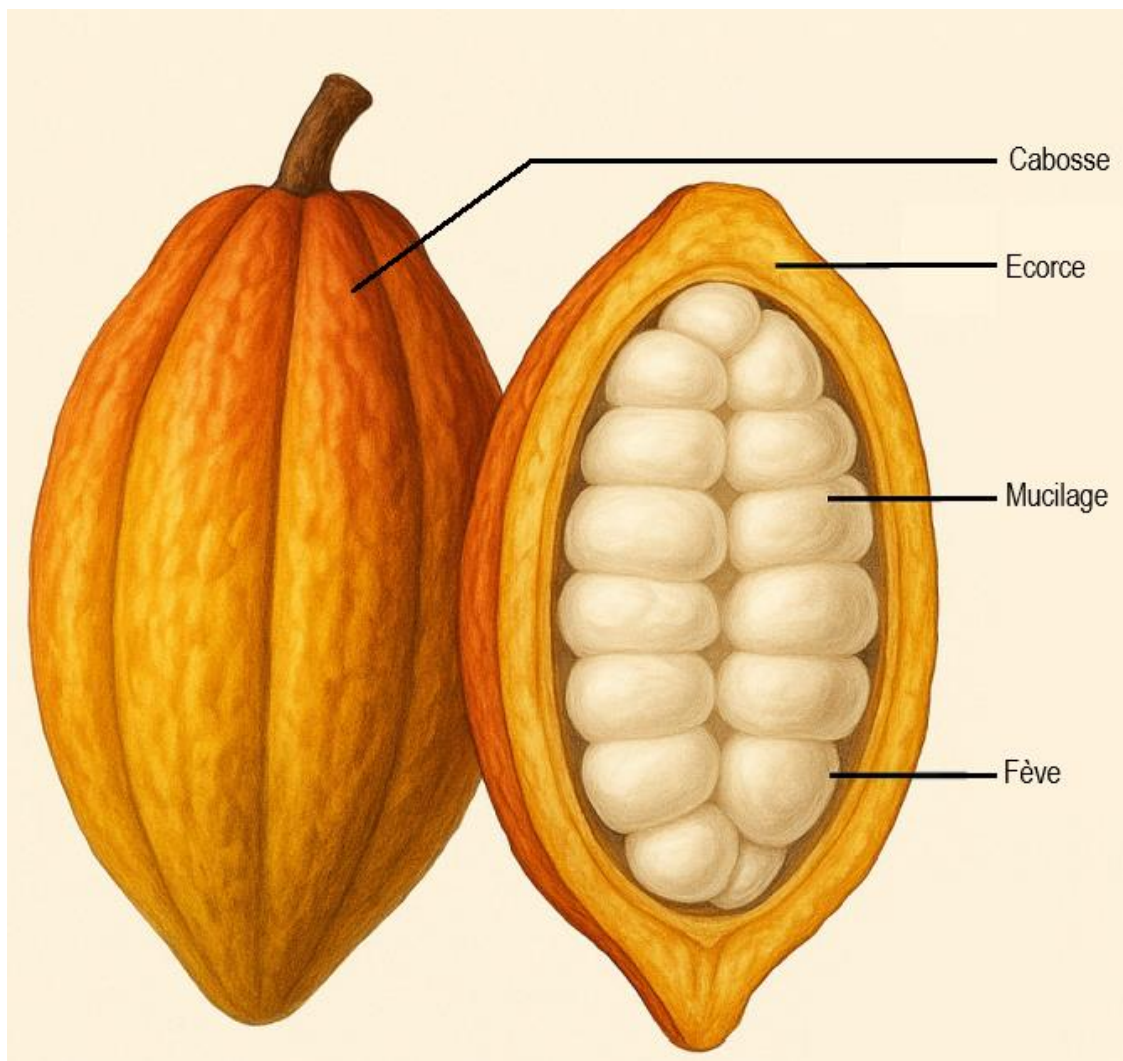


**Figure 8: Photo et croquis de fleurs de cacaoyer**

Source : Facchini (2023).

Le fruit présente deux stades de développement, la chérelle et la cabosse. La chérelle est le jeune fruit nouvellement noué qui mesure environ 5 cm. La cabosse ou état adulte du fruit, pèse en moyenne 400 grammes et contient 30 à 40 fèves. Sa longueur et sa largeur varient respectivement entre 12 et 15 cm et 7 et 9 cm (Figure 9). Depuis la nouaison jusqu'à la maturité du fruit, cinq à six mois peuvent s'écouler en fonction de l'origine génétique de la plante. Toutes les chérelles formées sur un cacaoyer ne parviennent pas à maturité. En effet, un nombre important d'entre elles se dessèchent, ce qui traduit l'existence d'un mécanisme régulateur de la production chez le cacaoyer. Ainsi, seulement 33 pc en moyenne des fruits noués sont récoltés. À maturité, le fruit ou cabosse est une sorte de baie ovoïde, à développement coriace un peu charnue, relevée d'une dizaine de côtes longitudinales verruqueuses (Aké-Assi, 1984). On définit ainsi la fructification comme l'ensemble des phénomènes qui accompagnent la formation du fruit jusqu'à sa maturité. Il existe deux grandes périodes de production allant d'avril à juillet pour la récolte principale et celle allant de novembre à janvier correspondant à la récolte intermédiaire.

La taille des fèves de cacao est fonction de la variété. La variété Criollo a de grosses fèves plus ou moins arrondies avec des cotylédons blancs ou rouges. Celle des Forastero est plus petite, avec des fèves fraîches, toujours englobées d'un mucilage sucré et rattachées les unes aux autres par le rachis fixé à l'extrémité supérieure de la cabosse. La base de la fève porte un germe qui est détruit pendant la fermentation (Loor Solorzano, 2007).



**Figure 9: Photo du fruit du cacaoyer**

## **I.2.5. Modes de reproduction**

### **I.2.5.1 Reproduction sexuée**

La reproduction sexuée du cacaoyer repose sur son système floral. Cette reproduction est influencée par plusieurs phénomènes, notamment la floraison, la pollinisation et la fécondation.

La floraison commence entre deux et cinq ans et est affectée par des facteurs génétiques, l'éclaircissement et les conditions thermiques et hydriques. Le pollen, de petite taille et de courte viabilité (moins de 48 heures), est transporté par des petits moucheron, principalement du genre *Forcipomya*, dans un processus de pollinisation essentiellement entomophile (Boyer, 1970 ; Demol, 2002 ; Looor Solorzano, 2007).

La pollinisation peut être une autofécondation (pollen provenant de la même fleur) ou hétérofécondation (pollen provenant d'une autre fleur). L'efficacité de la pollinisation pourrait augmenter la production, bien que certains estiment que cela ne serait pas un facteur limitant. La pollinisation manuelle est une alternative envisagée pour augmenter la production (Young, 1985 ; Paulin & Eskes, 1995).

Lors de la fécondation, le pollen germe et pénètre dans le tube pollinique, atteignant le sac embryonnaire des ovules en 24 heures. Elle aboutit à la formation de graines, mais toutes les fleurs fécondées ne produisent pas de cabosses, car beaucoup sèchent et meurent. Il existe des incompatibilités entre génotypes, avec des variétés auto-compatibles (comme le Criollo) et d'autres auto-incompatibles (comme certains Forastero et Trinitario). L'auto-compatibilité est un critère important dans les programmes d'amélioration génétique du cacaoyer (Hasenstein & Zavada, 2001).

### **I.2.5.2. Reproduction asexuée ou multiplication végétative**

La multiplication végétative représente un ensemble de techniques utilisées pour reproduire de jeunes cacaoyers sans passer par le semis des fèves (Mossu, 1990). Ce mode de multiplication permet à une plante mère de se reproduire à l'identique. Cette pratique culturale de par sa délicatesse, n'est pas courante. Les multiplications végétatives les mieux connues sont le bouturage et le greffage. Ces deux modes de multiplication sont presque exclusivement utilisés par les stations de recherches ou les organismes de pré vulgarisation chargés de multiplier le matériel sélectionné en vue de sa distribution aux agriculteurs.

Dans le bouturage, la nature et l'âge de la bouture sont d'une importance capitale. La bouture doit être jeune et porter des feuilles d'ombre, biens vertes et adultes. En plus, la bouture doit avoir une surface foliaire minimum indispensable, avoir un éclaircissement minimum (50 pc de la luminosité totale) (Wood & Lass, 1985) pour la photosynthèse puis se trouver à une température de 27 à 29 °C (Soupi, 2013).

Quant au greffage, il ne constitue pas une méthode de multiplication industrielle, mais peut présenter de l'intérêt en station pour multiplier du matériel disponible en petite quantité. Toutefois les arbres en collection pouvant être porteurs du virus du swollen shoot sans le manifester, on recommande d'utiliser des greffes provenant du matériel génétiquement sain (Martin, 1970).

**I.2.6. Facteurs climatiques****I.2.6.1. Température**

La température et les fluctuations saisonnières ou quotidiennes affectent plusieurs processus physiologiques du cacaoyer (Petithuguenin, 1998). La température moyenne optimale favorable à la culture du cacaoyer est voisine de 25 °C, qui correspond aux températures des régions de basses altitudes proches de l'Equateur (Braudeau, 1969). Cette température moyenne optimale assure un bon fonctionnement de la physiologie de la plante, en relation avec la poussée foliaire et la croissance en diamètre du tronc. Toutefois, au-dessus de 32 °C, le développement végétatif devient intense et la production diminue (Mossu, 1992). Aussi, à moins de 10 °C, la plante pourrait être endommagée ou flétrir, faisant que la production cacaoyère est compromise dans les régions où le minimum moyen en mois le plus froid est inférieur à 13 °C (Mossu, 1992).

**I.2.6.2. Pluviométrie**

Les travaux de Mossu (1990) montrent que le régime des pluies affecte fortement le rendement des cacaoyers d'une année à l'autre. Ces pluies doivent être abondantes (hauteur d'eau annuelle minimale de 1200 mm) et bien réparties tout au long de l'année, avec une saison sèche n'excédant pas plus de trois mois. La pluviométrie optimum est de 1600 mm/an tandis que l'hygrométrie doit être constamment élevée (optimum 85 pc). En effet, au-delà de ce seuil (85 pc) et avec les moyennes de précipitations supérieures à 2500 mm, des maladies trouveraient des conditions idéales pour leur développement (Mossu, 1990).

**I.2.6.3. Ombrage et insolation**

Le cacaoyer est une plante ombrophile, surtout pour le jeune plant qui, pendant les premières années de son développement, a besoin, pour sa croissance optimale, d'un ombrage relativement plus dense (Vincent, 1986). Cet ombrage peut être naturel ou créé avec des bananiers, des espèces forestières ou agroforestières introduites. Lorsque l'ombrage est constitué par des espèces forestières ou agroforestières, celui-ci doit être progressivement réduit de sorte à obtenir un peuplement définitif variant de 18 à 30 arbres / ha en fonction des espèces. L'ombrage contribue, de plus, à protéger le sol et à diminuer sensiblement les attaques des insectes. Cependant, l'ombre a un inconvénient en réduisant la floraison et la production (Verlière, 1981).

Le cacaoyer jeune a une vigueur optimale lorsque l'éclairage devient important. Le développement idéal des jeunes cacaoyers nécessite un éclairage de l'ordre de 50 pc de la luminosité totale (Wood & Lass, 1985). Le rendement maximum d'un cacaoyer adulte ne peut être obtenu qu'avec une exposition totale à la lumière, surtout chez les cacaoyers hybrides. La floraison est maximale quand la durée d'insolation est supérieure à quatre heures par jour (Assiri *et al.*, 2009).

### **I.3. MALADIE DU SWOLLEN SHOOT DU CACAOYER ET CERTAINES MALADIES TELLURIQUES DES PLANTES**

#### **I.3.1. Maladie du swollen shoot du cacaoyer**

##### **I.3.1.1. Historique**

Le swollen shoot ou encore gonflement des rameaux, est la principale maladie virale qui attaque le cacaoyer. Cette maladie est transmise par des cochenilles farineuses de la famille des Pseudococcidae dont l'espèce *Pseudococcus njalensis* est la plus importante au Ghana et au Togo. Le Cocoa Swollen Shoot Virus (CSSV), agent pathogène de la maladie a été suspecté pour la première fois sur de jeunes cacaoyers de 15 ans dans la région de Nankessé à l'Est du Ghana en 1922 (Posnette, 1952). Il a été identifié en 1936 et assimilé au Die-Back (Ollenu *et al.*, 1989). L'origine virale de l'agent pathogène a été démontrée par Posnette (1952). Ainsi, la maladie a été caractérisée dans les pays producteurs d'Afrique de l'Ouest, notamment au Ghana, au Nigeria, au Togo, en Côte d'Ivoire (Posnette, 1952), en Sierra Leone et au Libéria (Alibert, 1946).

En Côte d'Ivoire, la maladie a été détectée pour la première fois en 1942, à Sankadiokro et à Kongodia à l'Est, à proximité de la frontière avec le Ghana. Le virus est resté confiné dans cette zone sans influence majeure sur la production. Mais depuis 2005, il se propage rapidement dans les nouvelles boucles cacaoyères (Issia, Bouaflé, Sinfra) qui sont géographiquement situés à plus de 500 kilomètres des anciens foyers d'infection (Kébé *et al.*, 2005). À ce jour, le swollen shoot est la maladie virale la plus dévastatrice des cacaoyères en Afrique de l'Ouest, notamment, au Togo, Nigeria, Ghana et en Côte d'Ivoire (Oro, 2012).

##### **I.3.1.2. Agent pathogène**

Le Cocoa Swollen Shoot Virus (CSSV) est caractérisé par des particules bacilliformes et appartient à la famille des *Caulimoviridae* et au genre *Badnavirus* (Brunt *et al.*, 1964 ;

Lockhart, 1990). La première séquence nucléotidique du CSSV correspondant à l'isolat Agou-1. Elle a été déterminée et analysée en 1993 (Hagen, 1993). Le génome du CSSV est circulaire et constitué d'une seule molécule d'ADN double brin (ADNdb) de 7-7,3 kb. Son génome contient le plus couramment 5 cadres de lecture ou ORFs (Open Reading Frames) localisés sur le brin supérieur de la séquence d'ADN (Figure 11). Une fois transmis à la plante, le virus provoque des perturbations physiologiques importantes dans le cacaoyer infecté, précisément au niveau de la morphogenèse, la sporogenèse, la nutrition hydrique, la nutrition minérale, la photosynthèse, la fécondation et la production (Partiot, 1979).

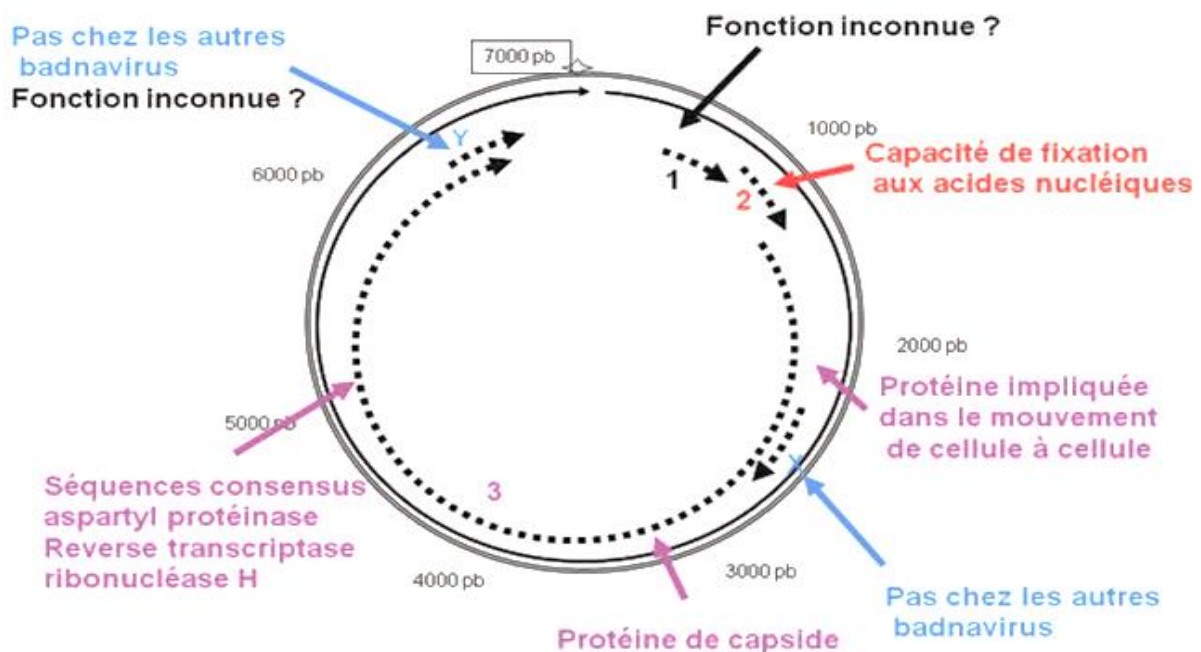


Figure 10 : Génome du CSSV avec ses cinq cadres de lecture

1: ORF1 ; 2 : ORF2 ; 3 : ORF3 ; 4 : ORFX ; 5 : ORFY

Source: Hagen (1993).

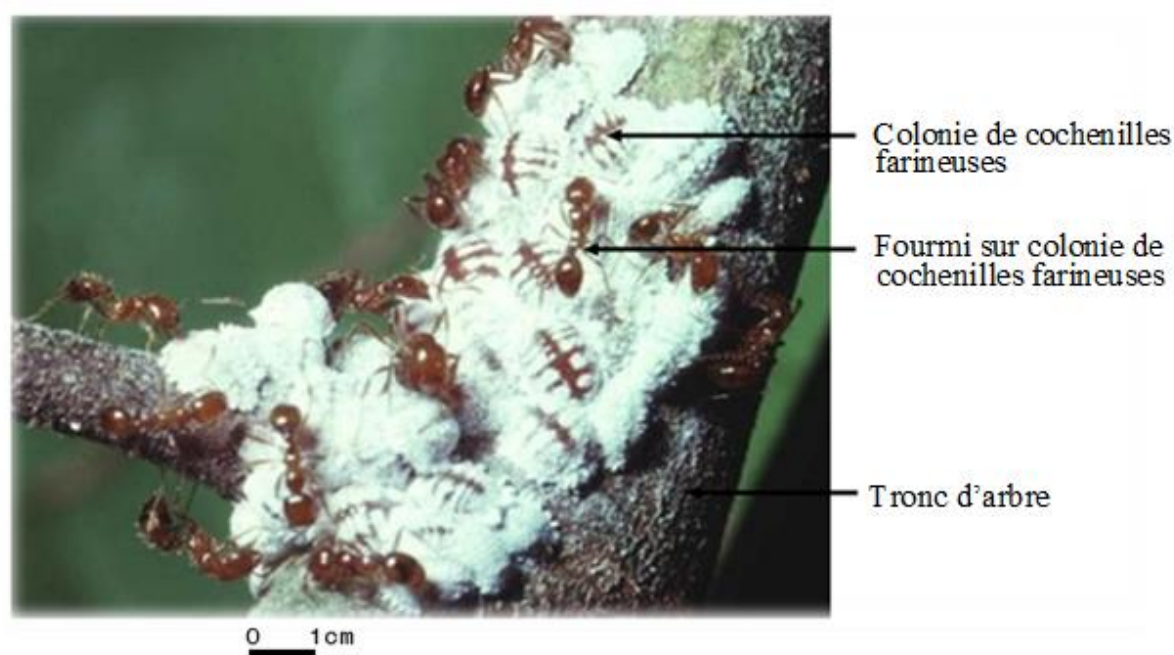
### I.3.1.3. Vecteur du swollen shoot et propagation de la maladie

#### I.3.1.3.1. Vecteur du swollen shoot

Les cochenilles farineuses sont les vecteurs naturels du swollen shoot. Ce sont des insectes appartenant à l'ordre des Hémiptères et à la famille des Pseudococcidae. Ces cochenilles sont des petits insectes suceurs de sève, excédant rarement 4 mm de long. En général, le dos de la femelle adulte est recouvert de cire, dont l'étendue, la distribution et la couleur sont souvent spécifiques de l'espèce et aident à leur identification. Les femelles sont aptères (Figure 11). (Cotterell, 1943). Il a été recensé au moins 14 espèces de Pseudococcidae capables de

transmettre aux plantes une ou plusieurs formes du virus du swollen shoot. La transmission se fait selon un mode semi-persistant (Dufour *et al.*, 1993). Parmi ces espèces, figurent *Formicococcus kenya* (Le Pelley), *F. concavocerrari* (James), *F. citri* (Risso), *F. njalensis* (Laing), *Ferrisia virgata* (Okll), *Phenacoccus magrevsi*, *Delococcus tafoensis*, *Paraputo anomalous*, *Dysmicoccus breviceps*, etc.

Le *Formicococcus njalensis* est le principal vecteur parmi toutes les cochenilles susceptibles de transmettre le virus. Il acquiert généralement le virus à partir des organes tendres du cacaoyer tels que les jeunes rameaux, les jeunes feuilles, les fleurs, les cabosses et le pétiole (Dufour *et al.*, 1993 ; Adu-Ampomah *et al.*, 2003). Les cochenilles sont fortement associées aux fourmis, notamment du genre *Crematogaster*, *Pheidole* et *Sphaerocrema*. Ces fourmis protègent les cochenilles et les déplacent en cas de danger. En retour, la cochenille fournit du miellat sucré aux fourmis.



**Figure 11 : Cochenilles farineuses associées à des fourmis.**

Source : Vos (2003).

### **I.3.1.3.2. Mode de propagation de la maladie du swollen shoot**

Dans une cacaoyère atteinte de la maladie du swollen shoot, les cacaoyers malades constituent les premiers réservoirs du virus. La maladie va se disséminer d'un arbre malade vers un arbre sain par l'intermédiaire des cochenilles qui assurent la transmission. Ces

vecteurs sont déplacés, soit par l'action du vent, soit par l'action de l'Homme lors de la récolte des cabosses (Thresh, 1958). Cependant, la maladie peut se propager par l'utilisation de matériel végétal infecté et à partir d'arbres de forêts considérés comme des espèces réservoirs du virus. En effet, l'infection naturelle par le CSSV a été décrite pour *Adansonia digitata*, *Bombax spp.*, *Ceiba pentandra*, *Cola chlamydantha*, *Cola gigantea*, *Theobroma cacao* et d'autres espèces forestières de malvaceae, *Corchorus spp.*, qui ont été infectées expérimentalement. Certaines plantes d'ombrage, plantes adventices et cultures vivrières hébergent naturellement le virus sans être malades ; ce sont des plantes hôtes réservoirs du virus à partir desquelles les cochenilles peuvent également disséminer la maladie (Tableau II).

En Côte d'Ivoire, parmi les nombreuses formes du swollen shoot observées dans la zone cacaoyère, deux seulement ont retenu l'attention des chercheurs. La forme Kongodia observée dans la sous-préfecture d'Agnibilékrou, très agressive, semblable à la forme New Juaben du Ghana et la forme Sankadiokro, qui sévissait dans la sous-préfecture d'Abengourou et bénigne (Renaud, 1957). À ce jour, le foyer de la maladie n'est plus cantonné à l'est du pays. Il s'est propagé dans toute la zone de production cacaoyère en Côte d'Ivoire, formant des zones faiblement ou moyennement infectées à l'est (Abengourou et Agnibilékro) et à l'ouest (Bangolo, Guiglo, Duékoué) et une zone de grande infection couvrant le centre-ouest (Bouaflé, Sinfra, Daloa et Fresco) (Figure 12).

Tableau II : Quelques plantes réservoirs du virus du swollen-shoot

Type	Nom usuel	Nom scientifique
Plantes d'ombrages	Vrai colatier	<i>Cola nitida</i>
	Grand ouara	<i>Cola gigantea</i>
	Koto	<i>Pterygota macrocarpa</i>
	Poré poré	<i>Sterculia tragacantha</i>
	Ficus	<i>Ficus exasperata</i>
	Iroko	<i>Milicia excelsa</i>
	Mirabellier	<i>Spondias mombin</i>
	Fromager	<i>Ceiba pentandra</i>
	Kapokier	<i>Bombax buonopozense</i>
	Baobab	<i>Adansonia digitata</i>
Papayer	<i>Carica papaya</i>	
Oranger	<i>Citrus sinensis</i>	
Adventices et cultures vivrières	Herbe de lait	<i>Euphorbia heterophylla</i>
	Piment	<i>Capsicum frutescens</i>
	Gnangnan	<i>Solanum distichum</i>
	Loranthus	<i>Tapinanthus bangwensis</i>
	Bouche blanche	<i>Commelina erecta</i>
	Sékou touré	<i>Chromolaena odorata</i>
	Canne à sucre	<i>Saccharum officinarum</i>
	Taro	<i>Xanthosoma maffafa</i>
	Oreille d'éléphant	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>
	Herbe à feu	<i>Synedrella nodiflora</i>
Corète potagère	<i>Corchorus olitorius</i>	
Concombre	<i>Cucumis sativus</i>	

Source : CNRA (2016).

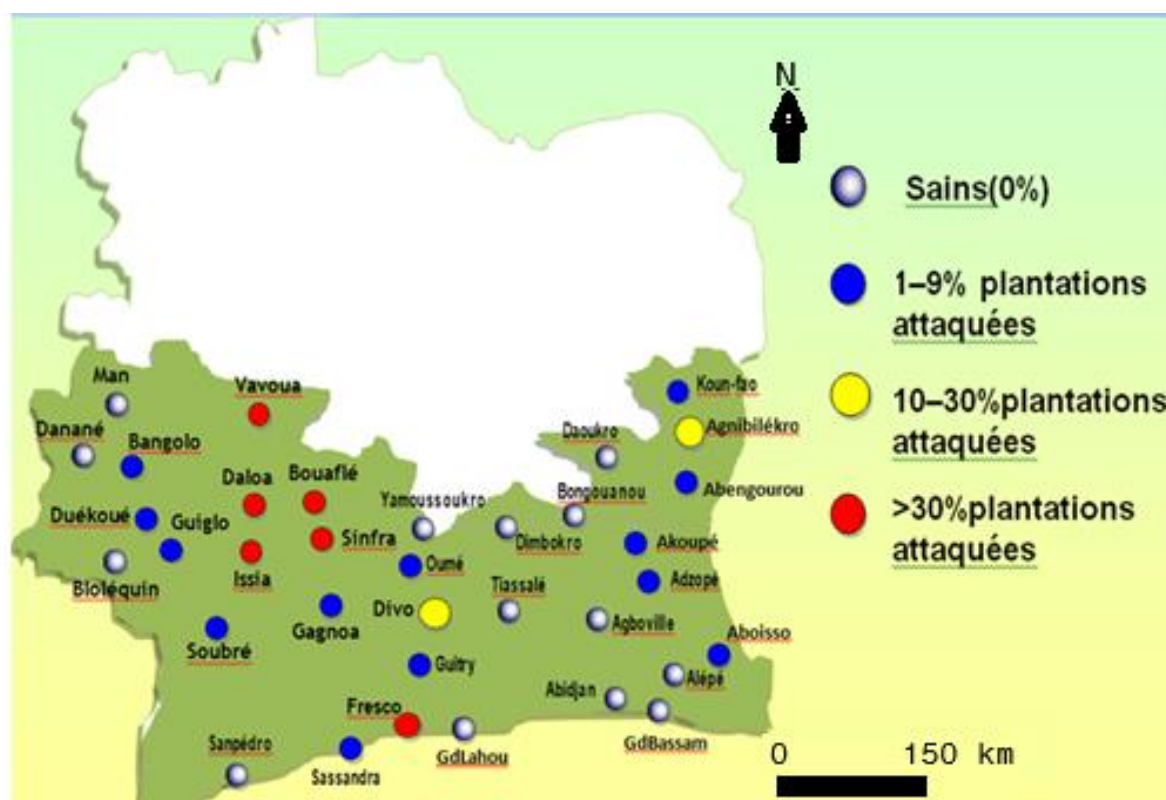


Figure 12 : Carte de distribution du swollen-shoot en Côte d'Ivoire

Source : CNRA (2009).

#### I.3.1.4. Symptômes et formes de la maladie

Les principaux symptômes de la maladie du swollen shoot chez le cacaoyer sont constitués par l'apparition des gonflements plus ou moins prononcés de certains rameaux et tiges, de bandes rouges sur les jeunes feuilles, des symptômes de mosaïques (les plus constants) sur les feuilles âgées. L'arbre atteint de swollen shoot reste donc dans un état moribond improductif et peut mourir après deux ou trois ans.

La maladie se présente sous diverses formes plus ou moins agressives, ce qui a donné lieu à l'usage de divers termes pour nommer les formes de la maladie selon les symptômes et les techniques utilisées par chaque auteur.

Posnette (1947a), sur la base de la variation des symptômes, a identifié quatre variantes du virus, à savoir, 1A, 1B, 1C et 1D. Box (1945), a utilisé des chiffres romains (I à IV) pour décrire quatre isolats de CSSV affectant le cacao au Ghana. Sagemann *et al.* (1985) ont, de leur côté, distingué cinq groupes (de A à E) sur la base des symptômes observés et des propriétés sérologiques. Au moins 60 isolats de virus ont été identifiés au Ghana sur la base

des symptômes produits sur des cacaoyers infectés (Dzahini-Obiatey, 1993). Quelque soient ces différents cas, les formes du swollen shoot sont désignées par le nom de la localité d'où elles sont originaires.

L'étude réalisée par Mangenot *et al.* (1946) portant sur les caractères des lésions dans les cacaoyères de Côte d'Ivoire fait partie des premières recherches menées sur le swollen shoot dans le pays. Les caractères des lésions du swollen shoot ont été décrits dans cette étude avec précision tout comme la description des aspects extérieurs de la maladie, leur étude anatomique et cytologique. Deux variétés morbides, bien distinctes, malgré certains caractères communs ont été ainsi établies en Côte d'Ivoire. Ces caractères communs résident d'abord dans les phénomènes d'hyperplasie cambiale, hyperplasie génératrice des tuméfactions caulinaires. Un autre caractère commun est la tendance à l'oblitération de la structure foliaire au niveau des taches mosaïquées. Les modalités de cette oblitération permettent de distinguer les deux types morbides.

Dans les lésions du type Kongodia, l'effondrement de la structure foliaire n'est jamais total. La différenciation entre les couches palissadiques et les couches lacuneuses subsiste très généralement. De plus, les altérations cytologiques dans les taches mosaïquées sont extrêmement discrètes. Dans les lésions du type Sankadiokro par contre, l'effondrement de la structure foliaire est total et les cellules présentent, dans les taches mosaïquées, des altérations manifestes. De nombreux indices relevés lors de cette étude permettent de supposer que les lésions observées dans les feuilles adultes ne sont que l'aboutissement de troubles très précoces du développement. Il est possible d'observer dans les jeunes feuilles encore roses émergeant du bourgeon, certaines des dispositions anormales constatées dans les feuilles adultes. Il s'agit particulièrement des tensions unilatérales présentées par le système des nervures réalisées dans le bourgeon et visibles dès l'épanouissement de la feuille très jeune. De même, la petitesse des chloroplastes des taches mosaïquées paraît correspondre à une inhibition primitive du développement de ces organites et non à une régression secondaire de chloroplastes adultes. Tout se passe comme si le virus du swollen shoot attaquait sélectivement les cellules en voie de division active, soit celles des méristèmes primaires de la tige, soit celles du méristème secondaire qu'est le cambium.

### **I.3.1.5. Moyens de lutte**

La lutte contre le swollen shoot est envisagée en général sous trois aspects. La destruction des insectes vecteurs, la suppression des cacaoyers malades et l'utilisation de matériel végétal

résistant aux attaques du virus dans les replantations. En Côte d'Ivoire, les moyens de lutte sont réduits à l'éradication des arbres infectés et à la lutte contre les cochenilles. Cette méthode a permis de déraciner au moins 150 000 cacaoyers, soit l'équivalent de 113 ha de cacaoyers. Malgré tous les financements et les efforts considérables consentis liés à l'arrachage et l'indemnisation des producteurs par les gouvernements qui se sont succédés, aucune solution véritable n'a pour le moment été trouvée et le swollen shoot sévit toujours dans le pays (Anthony *et al.*, 2003 ; Dzahini-Obiatay, 2006).

### I.3.2. Maladies telluriques des plantes

Les maladies des plantes liées au sol ou maladies telluriques sont multiples et présentent une diversité de facteurs impliqués dans leur expression. Certaines de ces maladies sont infectieuses car causées par des microorganismes du sol quand d'autres sont causées par des conditions telluriques inadéquates telles que les carences ou les excès de nutriments.

#### I.3.2.1. Carences nutritionnelles

La figure 13 illustre quelques symptômes de déficit nutritionnel chez le cacaoyer (CIRAD, 2020).



**Figure 13 : Symptômes des déficiences minérales chez le cacaoyer**

A : azote ; B : potassium ; C : zinc

Source : CIRAD (2020)

On y note que la déficience en azote se traduit par des feuilles plus petites, avec jaunissement du limbe et des nervures. La déficience en potassium commence par une décoloration jaune

de part et d'autre de la nervure centrale, se poursuivant par la formation de tâches nécrotiques brunes. Ce cas est fréquent sur sables tertiaires en Côte d'Ivoire et aussi lorsque les sols sont trop riches en calcium et magnésium. La déficience en zinc provoque, quant à elle, des malformations foliaires que des pulvérisations de sulfate de zinc font disparaître (CIRAD, 2020).

### I.3.2.2. Maladies telluriques infectieuses

Les maladies causées par les champignons concernent diverses cultures. Les laitues par exemple sont principalement sensibles à trois maladies provoquées par des champignons, notamment la pourriture grise (*Botrytis cinerea*), le Sclérotiniose (*Sclerotinia sclerotiorum* et *Sclerotinia minor*) et le Rhizoctone brun (*Rhizoctonia solani*) ((Beliard, 2003 ; Ceja *et al.*, 2008 ; Lecompte *et al.*, 2013). Les symptômes observables sur les feuilles se traduisent généralement par un pourrissement des tissus infectés, suivi par l'apparition d'un feutrage gris due à une production importante de spores (Williamson *et al.*, 2007). Outre la laitue, les maladies les plus importantes de la tomate sont d'origine fongique, à savoir la flétrissure fusarienne et la pourriture racinaire. Elles sont causées par *Fusarium oxysporum* f.sp. lycopersici (Fol) et sont dévastatrices pour les cultures de tomate dans le monde (Jarvis & Shoemaker, 1978).

Parmi les maladies telluriques d'origine bactérienne, figure le «greening» ou maladie du dragon jaune qui est une maladie particulièrement grave due aux espèces *Liberibacter africanum* et *Liberibacter asiaticum*, très dévastatrices pour les agrumes (orangers, citronniers, mandariniers). Transmise par un insecte (le psylle), *Liberibacter africanum* et *Liberibacter asiaticum* provoquent le jaunissement des feuilles des agrumes, la déformation et la chute prématurée de leurs fruits, et finit par faire mourir les arbres. Il n'existe à ce jour aucun traitement efficace contre cette maladie (Aubert, 1992; Tamesse *et al.*, 2002). Aussi, les bactérioses les plus redoutables du pois sont la brûlure bactérienne causée par *Pseudomonas syringae* pv. pisi, qui provoque des pertes économiques significatives, et la maladie des taches brunes causée par *Pseudomonas syringae* pv. *Syringae* (Cousin, 1997).

Concernant les maladies telluriques virales, il ressort qu'elles sont dommageables dans la plupart des régions du monde où les pois sont cultivés. Le virus de la mosaïque du pois (Pea Seed borne Mosaic Virus) qui est le plus important, s'est disséminé dans le monde entier par les graines infectées (Khetarpal *et al.*, 1990 ; Cousin, 1997 ; Kraft & Pflieger, 2001 ; Redden *et al.*, 2005). Le pois peut également être affecté par d'autres virus, tels que le virus de

l'enroulement des feuilles (Bean Leaf Roll Virus), le virus de la mosaïque et d'énation du pois (Pea Enation Mosaic Virus), le virus de la mosaïque commune du pois (Pea Common Mosaic Virus) et le virus de brunissement précoce du pois (Pea Early Browning Virus) (Cousin, 1997). Outre le pois, la maladie virale la plus dévastatrice pour les agrumes est la Tristeza causée par le virus (*Citrus Tristeza Cloterovirus*) transmis par les pucerons (Aubert, 1992 ; Tamesse *et al*, 2002). Elle perturbe la circulation de la sève dans l'arbre, provoquant un jaunissement des feuilles, un rabougrissement, et potentiellement un dépérissement et la mort de l'arbre. Le virus peut également être transmis par du matériel végétal infecté. La gestion de la maladie repose sur l'utilisation de plants sains et de porte-greffes résistants (Aubert, 1992; Tamesse *et al*, 2002).

### **I.3.3. Relation entre le CSSV et le sol**

Bien que le CSSV soit viral, les symptômes (gonflement racinaire, affaiblissement général du cacaoyer) peuvent évoquer des problèmes liés au sol, notamment les carences nutritionnelles (Posnette, 1947b). Aussi, des infections secondaires causées par des champignons, bactéries et virus telluriques peuvent-elles aggraver l'état des arbres déjà affaiblis par le virus (Lepoivre, 2003). Du coup, directement ou indirectement, la maladie du swollen shoot du cacaoyer semble être liée au sol.

## I.4. CADRE DE L'ETUDE

### I.4.1. Localisation géographique

L'étude a été réalisée dans la région administrative de la Marahoué en Côte d'Ivoire, précisément dans six villages. Trois de ces villages (Guessanfla, Krayaokro et Simporéfla) sont situés dans la Sous-Préfecture de Bouaflé et les trois autres (Diénemboufla, Kayéta et Koumoudji) dans la Sous-Préfecture de Kononfla (Figure 14).

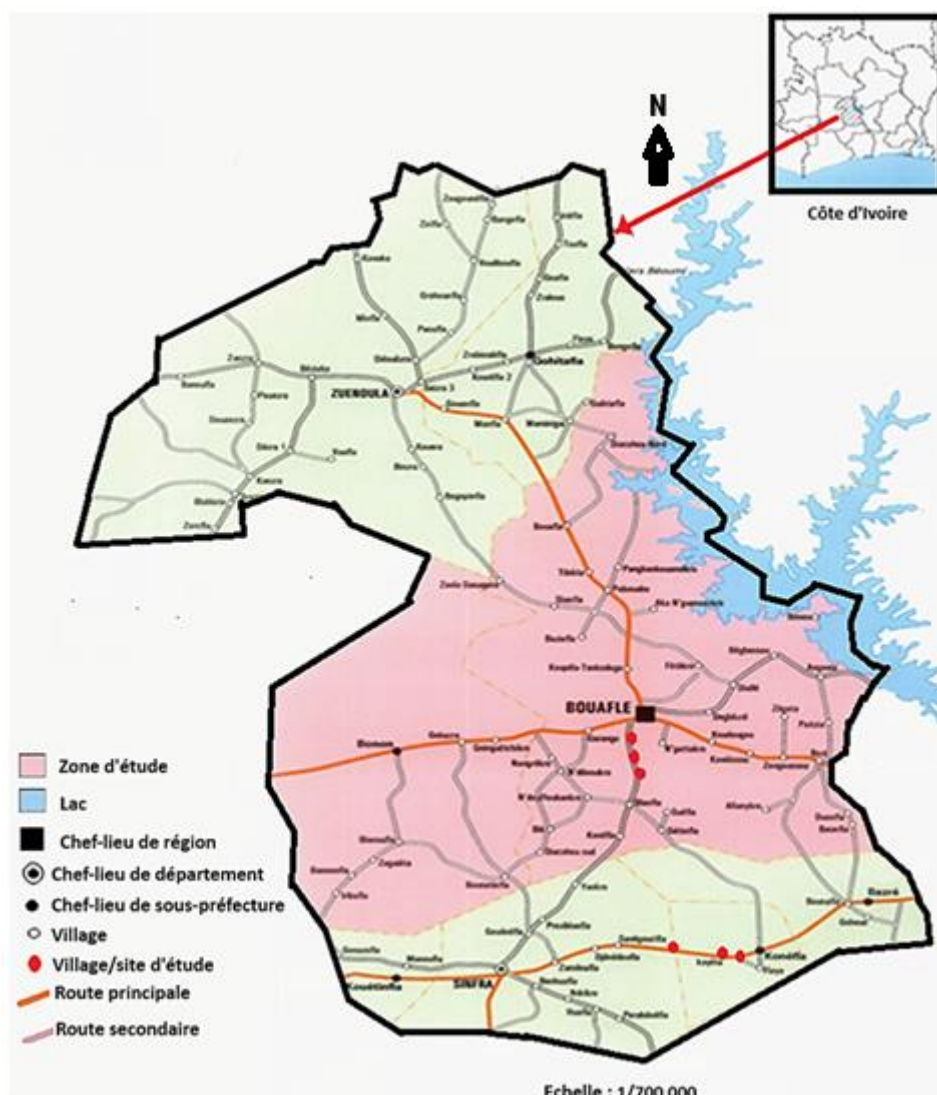


Figure 14 : Localisation de la zone d'étude

Source : BNETD/CCT (2000) (<https://crmarahoue.ci/caracteristiques-territoriales/>).

Ces différentes localités font partie des zones de productions cacaoyères de la Marahoué fortement touchées par la maladie du swollen shoot. La Région de la Marahoué est, elle-même, située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes Nord  $6^{\circ}58'59.999''$  et  $6^{\circ}37'12''$  et les longitudes Ouest  $5^{\circ}45'0''$  et  $5^{\circ}55'12''$ . Elle est limitée au sud par la Région du Goh, à l'Ouest par la Région du Haut-Sassandra, au nord par la Région du Béré et à l'Est par le District autonome de Yamoussoukro et les Régions du Gbêkê et du Bélier (BNETD/CCT, 2000).

### I.4.2. Relief

La Région de la Marahoué présente un relief relativement plat. Il est constitué de bas-plateaux avec quelques bas-fonds dans les plaines et de collines dont l'altitude moyenne est de 260 m. Les principaux sommets sont entre autres, le Mont Lotanzia à Bouaflé, le Mont Léako et les chaînes de Kocoumbo à Sinfra (Avenard *et al.*, 1971). À côté de ces formations géologiques, il existe des plaines dominantes qui alternent avec les bas-plateaux présentant des affleurements rocheux granitiques par endroits.

### I.4.3. Climat

La zone étudiée est à cheval sur le climat subéquatorial de type attiéen et le climat tropical humide de type baouléen. Ce climat de transition est caractérisé par deux grandes saisons alternées par deux petites. La grande saison des pluies commence en mars et prend fin en juin tandis que la petite saison des pluies part de mi-août à octobre. Entre les deux saisons des pluies, se situe la petite saison sèche de juillet à mi-août alors que la grande saison sèche va de novembre à février (Kouamé, 2013 ; Irié *et al.*, 2015 ; Irié, 2017). Un vent sec et dominant (Harmattan) souffle de décembre à février pendant la grande saison sèche. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1800 et 2000 mm, quand les valeurs moyennes annuelles, pour la température et le taux d'humidité valent respectivement :  $25,30^{\circ}\text{C}$  et 75 pc environ. Le climat de la zone est un climat de transition entre la savane et la forêt (Avenard *et al.*, 1971 ; Brou, 2005).

### I.4.4. Végétation

La Région de la Marahoué est une zone de transition entre la forêt dense et la savane arborée. Ces deux types de formations végétales, selon la dominance de l'une sur l'autre, se répartissent au sud et au Sud-ouest pour la forêt dense avec le parc de la Marahoué et au Nord

et au Nord-est pour la savane arborée. Dans les forêts denses, les espèces d'arbres dominantes (Essences) sont *Milicia excelsa* (Iroko), *Triplochiton scleroxylon* (Samba), *Terminalia superba* (Fraké), *Ceiba pentandra* (Fromager), *Nesogordonia papaverifera* (Kotibé), *Mansonia altissima* (bois Bété) et *Sterculia rhinopetala* (Lotofa), tandis que les espèces *Phragmites australis* (roseaux) et *Borassus aethiopum* (rôniers) dominent la zone de savane (Brou, 2005).

### I.4.5. Hydrographie

La région de la Marahoué est drainée par le fleuve Bandama rouge ou Marahoué et le Bandama blanc sur lequel est construit le barrage hydro-électrique de Kossou. Ces deux fleuves forment un confluent au niveau du village de Bozi. En plus de ces principaux cours d'eau qui arrosent la zone. Il y a aussi la présence de plusieurs rivières notamment les rivières Baha, Ouréné, Bolè, Zabré, Bouré, Dromonyi, Houda et Tenéré Groupeni (Avenard *et al.*, 1971 ; N'guessan *et al.*, 2017).

### I.4.6. Géologie

La région de la Marahoué appartient à l'ensemble granitique et schisteux du Birrimien, vieux de 1700 à 2000 millions d'années. Cette formation a été plissée et métamorphisée par l'orogénèse éburnéenne. Il s'est écoulé ensuite plus de 1500 millions d'années d'érosion et d'altération avant que se déposent les premières formations sédimentaires du bassin côtier (Leneuf & Tempier, 1969).

### I.4.7. Pédologie

L'étude pédologique réalisée dans la zone par Aubert & Segalen (1966) montre que la Région de la Marahoué repose sur des Ferralsols (Dystric) profonds et riches en argile. Ces sols présentent des caractères légèrement différents selon qu'on se trouve en forêt ou en savane.

En forêt, l'horizon humifère peu épais, combiné à un horizon gravillonnaire peu développé assimilent ces sols à des Plinthic Ferralsols (Dystric). Par contre en savane, l'horizon gravillonnaire plus important avec de nombreuses zones cuirassées font de ces sols des Plinthic Ferralsols (Densic, Dystric).

Des gleysols se rencontrent dans les bordures du fleuve Marahoué. Les affluents de ce fleuve forment ainsi de nombreux bas-fonds qui ont non seulement de bonnes propriétés de rétention

en eau de surface, mais aussi, jouent le rôle d'accumulation des matières organiques drainées dans les alluvions qui constituent un atout pour la production rizicole.

### I.4.8. Etat sanitaire

L'état sanitaire des cacaoyers dans la région de la Marahoué, comme dans d'autres régions de Côte d'Ivoire, est généralement affecté par plusieurs maladies et parasites. Parmi les principaux problèmes, on retrouve notamment les maladies fongiques comme la verticilliose, la maladie du flétrissement à *Ceratocystis* et la fusariose. Les maladies les plus fréquentes sont également provoquées par des oomycètes du genre *Phytophthora* (*P. palmivora*, *P. megakarya*, *P. capsici* and *P. citrophthora*), qui entraînent d'importantes pertes, car responsable de la pourriture brune des cabosses. D'autres fléaux sévissent en Côte d'Ivoire, notamment les mirides ou capsides qui entraînent des pertes estimées à 30 pc de la récolte totale du pays (N'guessan & Coulibaly, 2001).

Les départements de Bouaflé et de Sinfra, situés dans la Région de la Marahoué, appartiennent au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, zone actuelle de la plus grande production de cacao du pays. Dans ces départements, en dehors des problèmes sanitaires déjà évoqués, la maladie du swollen shoot est très présente dans les cacaoyères. En effet, au moins 30 pc des plantations sont infectés par cette maladie endémique, situant ainsi Bouaflé et Sinfra parmi les zones de plus grande infection du swollen shoot en Côte d'Ivoire (Kébé & N'guessan 2003 ; CNRA, 2009 ; Aka *et al.*, 2020).

*DEUXIÈME PARTIE :*  
*MATÉRIEL ET MÉTHODES*

### II.1. MATÉRIEL

#### II.1.1. Matériel édaphique et végétal

Cette étude a porté sur deux types essentiels de matériel : le sol et l'ensemble de la flore des cacaoyères explorées. (Figure 15). Le sol a servi à la détermination des facteurs édaphiques impliqués dans la persistance du swollen shoot dans les cacaoyères quand la flore permettait d'identifier et répertorier la flore hôte du virus du swollen shoot.



**Figure 15 : Matériel édaphique et végétal utilisé**

A : Echantillons de sol ; B : Plante d'ombrage ; C : Plante adventices.

#### II.1.2. Matériel technique et consommables

La présente recherche a nécessité l'utilisation d'un certain nombre de matériel technique de terrain et des consommables. Le tableau III est l'illustration de ces matériels et de leurs modes d'usage.

**Tableau III : Matériel technique de terrain, de laboratoire et produits chimiques**

	<b>Matériels &amp; consommables</b>	<b>Usages</b>
De terrain	Clisimètre	Détermination de la pente du terrain
	Couteau de pédologue	Identification et délimitation les horizons puis prélèvement des échantillons de sol
	Marteau de géologue	Échantillonnage des roches
	Code Munsell	Identification de la couleur du sol
	Décamètre	Mesure de distance
	GPS	Relevé des coordonnées géographiques des parcelles et des fosses
	Appareil photo numérique	Réalisation des prises de vue
	Machettes	Ouverture des layons et délimitation des parcelles
	Pioches et Pelles	Réalisation des fosses pédologiques sur les parcelles
	Papier journal	Séchage des échantillons de sol
De laboratoire	Tamis de maille 2 mm	Tamisage des échantillons de sol séchés
	Sachets plastiques	Conditionnement des échantillons de sol
	Balance électronique	Détermination des masses des différentes fractions de sol
	Pipettes	Prélèvement des produits chimiques
	Spectromètre d'absorption atomique	Détermination des taux des bases échangeables
Produits chimiques	Spectromètre de masse	Détermination des taux d'oligo-éléments
	Pipette de Robinson	Détermination des taux de sables, de limons et des argiles
	Acide sulfurique et Examétaphosphate de soude	Réalisation de l'analyse granulométrique
	Dichromate de potassium et Acétate d'ammonium	Extraction des cations
	Acide chlorhydrique	Détermination de la teneur en carbonate

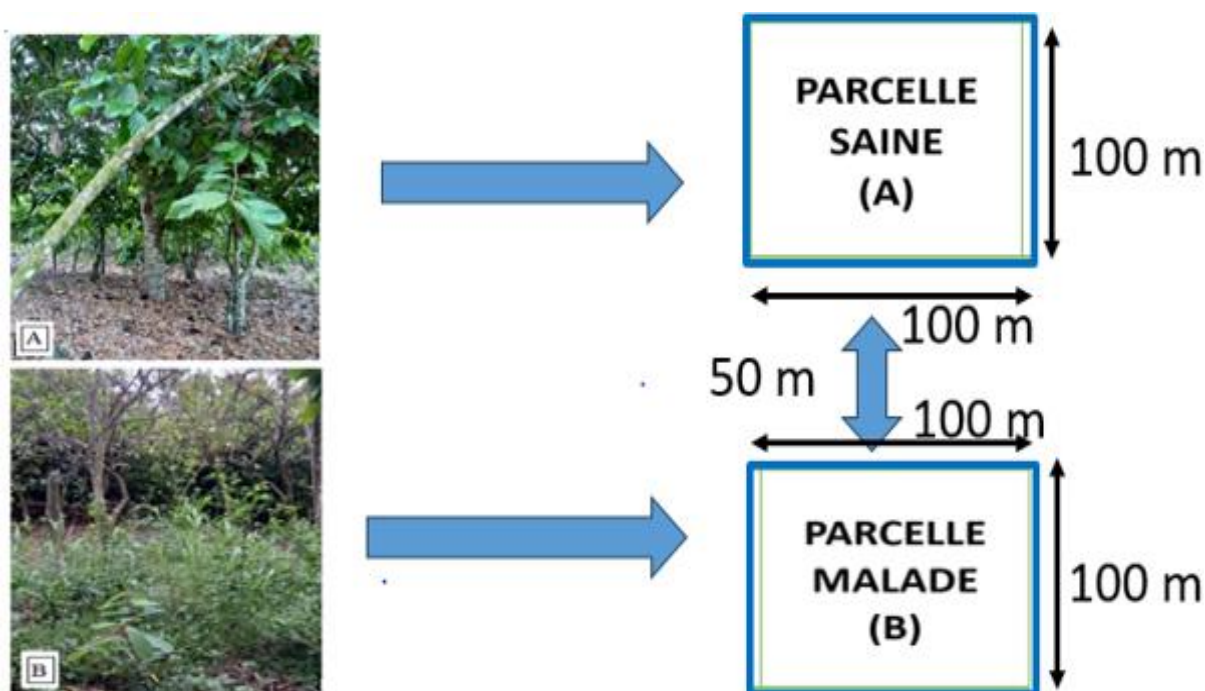
## II.2. MÉTHODES

### II.2.1. Choix, préparation et description des sites de l'étude

Les sites ont été choisis en collaboration avec la Zone Départementale de l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER) de Bouaflé qui dispose d'une cartographie de la maladie du swollen shoot dans la Marahoué. Six sites (plantations de cacaoyers) répartis équitablement entre les Sous-préfectures de Bouaflé et de Kononfla ont été identifiés. Les coordonnées géographiques de l'ensemble de ces sites ont été relevées et l'occupation du sol et/ou de l'environnement a été décrite.

### II.2.2. Inventaire des plantes réservoirs du virus et calcul des densités

Deux parcelles utiles de 100 m × 100 m chacune ont été délimitées sur chaque site, faisant un total de douze parcelles considérées dans le cadre de l'étude. La première parcelle utile était située dans la partie saine de la cacaoyère et la seconde, dans la partie infectée. Les deux parcelles utiles étaient distantes de 50 m (Figure 16).



**Figure 16 : Dispositif d'inventaire de la flore**

A : Parcelle de cacaoyers sains ; B : Parcelle de cacaoyers malades.

À l'intérieur de chaque parcelle utile, un inventaire des espèces de flores hôtes du virus du swollen shoot a été réalisé. Cet inventaire a été fait par deux méthodes de relevés complémentaires : les relevés itinérants et les relevés de surface.

La méthode utilisant les relevés itinérants a consisté à parcourir la parcelle en notant toutes les espèces de plantes d'ombrage rencontrées dans les plantations (Aké-Assi, 1984). La récolte des adventices a été faite à l'aide des relevés de surface en utilisant deux carrés de densités de 10 m×10 m par parcelle utile. À l'intérieur de chaque carré, le nombre de pieds de chaque espèce d'adventice a été relevé sur la parcelle.

Le nombre d'espèces végétales des parcelles utiles correspond à la moyenne obtenue sur les deux carrés des densités. Ce nombre est rapporté à l'hectare pour déterminer la densité de l'espèce selon la formule de l'équation 1.

$$D = \frac{\sum D_i}{n=2} \times 100 \quad (1)$$

Avec n : Nombre de carrés par parcelle et  $D_i$  : Densité élémentaire.

D : nombre d'espèces végétales / hectare

Les plantes collectées ont été acheminées au laboratoire pour leur identification. Les plantes d'ombrages, les adventices et les cultures vivrières hôtes du virus du Swollen shoot ont été identifiés sur la base de l'APG III. C'est la troisième réforme de "l'Angiosperm Phylogenic Group" ou Groupe phylogénétique des angiospermes, considérée comme la réforme la plus aboutie en termes de classification des plantes (Haston *et al.*, 2009).

### II.2.3. Etude pédologique

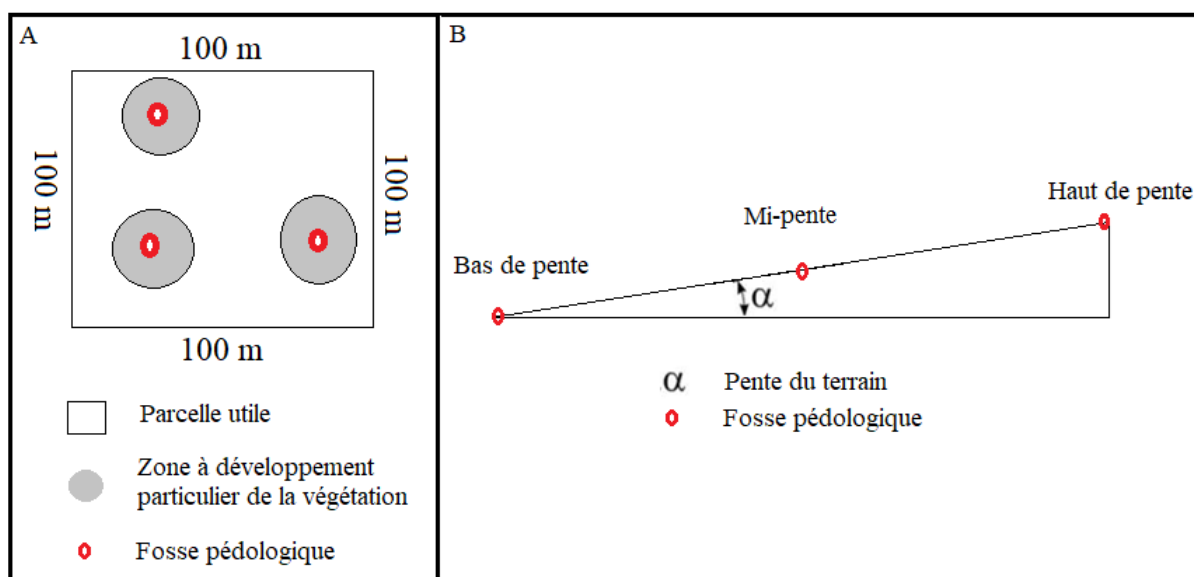
#### II.2.3.1. Etude morphopédologique

##### II.2.3.1.1. Positionnement des fosses

Les deux parcelles utiles de 100 m ×100 m chacune délimitées précédemment et sur lesquelles l'inventaire floristique a été réalisé ont servi également de cadre pour l'étude pédologique suivant un dispositif randomisé stratifié par niveaux topographique et sanitaire.

En effet, lorsque la topographie de la plantation n'est pas négligeable (pente > 8 pc), l'emplacement des fosses pédologiques sur la parcelle utile est guidé par la méthode des toposéquences fondée sur le principe qu'il existe une relation étroite entre la morphologie d'une région et la pédologie (Lévêque, 1972). L'étude morphopédologique est alors réalisée le long d'un trajet perpendiculaire aux courbes de niveau. Trois fosses sont placées sur un transect le long de la toposéquence. Une fosse (F1) est positionnée en haut de versant, une autre (F2) à mi-versant et la dernière fosse (F3) au bas du versant (Figure 17).

Si au contraire la topographie est quasi plane (pente  $\leq$  8 pc), les trois fosses par parcelle utile sont implantées selon l'état de vigueur des cacaoyers car cet état traduirait mieux la nature du sol sous-jacent (Freschet *et al.*, 2018). F1, F2 et F3 correspondent alors respectivement aux fosses implantées dans les zones de plantes vigoureuses, peu vigoureuses et non vigoureuses de la parcelle saine. En parcelle malade, elles correspondent dans le même ordre, aux fosses implantées dans les secteurs de faible, moyenne et forte infections par le swollen shoot.



**Figure 17 : Dispositif d'emplacement des fosses pédologiques**

A : selon la vigueur de la couverture végétale ; B : selon la toposéquence.

### II.2.3.1.2. Ouverture des fosses pédologiques et description de la morphologie du sol

Chaque fosse a été ouverte avec une longueur de 100 cm et une largeur de 100 cm pour une profondeur de 120 cm en cas d'absence d'obstacles infranchissables, notamment au niveau de la profondeur. La terre enlevée a été mise sur un même côté de la fosse à droite ou à gauche de la face d'observation, qui est la face la plus éclairée.

Les observations au niveau de chaque fosse ont consisté à identifier (visuellement ou à l'aide du couteau de pédologue) les différents horizons et à les délimiter. Ensuite la description a porté sur :

- l'épaisseur à l'aide du décimètre ;
- la couleur à l'aide du code Munsell ;
- la texture de manière tactile en réalisant un boudin de terre humide et un anneau avec le boudin : le sol est plus argileux quand le boudin se forme aisément et sableux quand on ne peut le former ;
- la structure générale du sol et celle du débit par observation visuelle des faces d'un échantillon de sol prélevé et cassé en morceaux ;
- la compacité de l'horizon mesurée par le test de pénétration, qui consiste à enfoncer un couteau de pédologue au droit de l'horizon et à estimer la facilité avec laquelle le couteau pénètre le sol : le sol est plus compact quand l'opérateur fournit plus d'effort ;
- la présence de matière organique dans le sol par une observation visuelle : l'horizon est plus humifère quand sa coloration est plus sombre ;
- la perméabilité de l'horizon en appréciant la vitesse d'infiltration d'une goutte d'eau déposée sur une motte de terre, le sol étant plus perméable quand l'eau s'infiltré plus rapidement ;
- la qualité de drainage du sol par le repérage et le comptage de taches de rouille de pseudogley au niveau de l'horizon occasionnée par la stagnation de l'eau ;
- la profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie (PATH) à l'aide du décimètre ;
- le taux d'éléments grossiers calculé selon la formule 2 :

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

Avec MT = Masse en gramme de l'échantillon séché et MR = Masse en gramme du refus de sol séché après tamisage.

Deux échantillons de sol ont été constitués par fosse. Ils ont été prélevés sur les 40 premiers centimètres du sol, entre 0-20 et 20-40 cm, en vue des analyses physico-chimiques. Le choix de cette partie du sol est justifié par sa forte imprégnation en matière organique (Mossu, 1990).

Au total 72 échantillons de sol ont été constitués sur l'ensemble des douze parcelles. Ces échantillons ont été étiquetés et conservés dans des sachets en plastique avant leur transfert au laboratoire.

### II.2.3.2. Analyses du sol en laboratoire

#### II.2.3.2.1. Mesure des propriétés physico-chimiques

Les analyses réalisées dans cette recherche ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Végétaux et des Sols (LAVESO) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro. Elles ont porté sur les 72 échantillons constitués au cours de la phase de terrain.

Le  $pH_{eau}$  a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre (Diack & Loum, 2014). Pour ce faire, on réalise un potentiomètre où une demi-pile est constituée par une électrode de verre plongeant dans la suspension, tandis que l'autre électrode est une électrode au calomel ou électrode de référence.

Le carbone organique total a été dosé par la méthode de Walkley & Black ou la méthode d'attaque sulfochromique à froid (Hilhort & Balendonck, 1999). Cette méthode consiste à ajouter une solution de bichromate de potassium à un échantillon en présence d'acide sulfurique. Après la réaction, le dosage de la quantité de bichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon permet d'établir la concentration de carbone organique total.

Le dosage de l'azote total a été fait par la méthode de Kjeldahl (Diack & Loum, 2014). La mesure se fait en deux étapes. Une première étape ou digestion en milieu acide, transforme tous les composés organiques azotés en azote ammoniacal. Dans la seconde étape, les ions ammonium sont dosés par un système automatisé. Les ions ammonium réagissent avec du salicylate, du nitroferrocyanure et de l'hypochlorite de sodium pour former en milieu alcalin un complexe salicylate ammoniacal, dont l'absorbance à 660 nm est proportionnelle à la concentration d'azote ammoniacal.

La méthode d'Olsen modifiée (Hilhort & Balendonck, 1999) qui a permis de doser le phosphore assimilable a pour principe d'extraire le phosphore assimilable avec une solution de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium à pH 8,5 dans un rapport m/V de 1/50.

Les bases échangeables ont été extraites par la méthode de saturation à l'ammonium à pH=7. Les teneurs en Ca, Mg et K sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (Pansus & Gautheyrou, 2003). La CEC est mesurée sur les sols désaturés issus de l'extraction des bases échangeables. La saturation subséquente du complexe avec des ions  $Na^+$  apportés par une solution à 10 pc de chlorure de sodium (NaCl) libère les ions  $NH_4^+$  du complexe et permet de distiller le  $NH_4^+$  recueilli par la méthode Kjeldahl.

Le dosage des oligoéléments (cuivre, manganèse et zinc) a été réalisé par spectrométrie de masse qui est une technique analytique basée sur la détermination du rapport entre masse et charge des ions. Le principe réside dans la séparation en phase gazeuse de molécules chargées (ions) en fonction de leur rapport masse/charge ( $m/z$ ).

Une analyse granulométrique du sol a été réalisée à l'aide de la pipette de Robinson-Köhn pour le prélèvement des limons et de l'argile, après quoi, les fractions sableuses ont été isolées par tamisage à sec (Douzals, 2000).

### II.2.3.2.2. Nomenclature des sols étudiés

La synthèse des propriétés morphologiques et physico-chimiques des sols prospectés a permis de les nommer selon la classification WRB (IUSS Working Group WRB, 2015) qui compte trois principales étapes résumées par la figure 18.

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

Dans l'étape 2, la synthèse obtenue avec les horizons, propriétés et matériaux diagnostics est mise en regard de la Clé WRB pour attribuer le sol au Groupe de Sols de Référence (RSG) approprié.

La dernière étape consiste à attribuer des qualificatifs au RSG. Ces qualificatifs sont listés et définis dans la Clé WRB. Il en existe deux types. Les qualificatifs principaux et les qualificatifs supplémentaires. Les premiers correspondent aux caractéristiques typiques du sol résultant du processus pédogénétique principal. Les seconds différencient les sols selon des caractéristiques du sol résultant de tout processus pédogénétique secondaire ayant affecté de manière significative les caractéristiques primaires du sol telles que les caractéristiques du sol qui ont un effet significatif sur son utilisation.

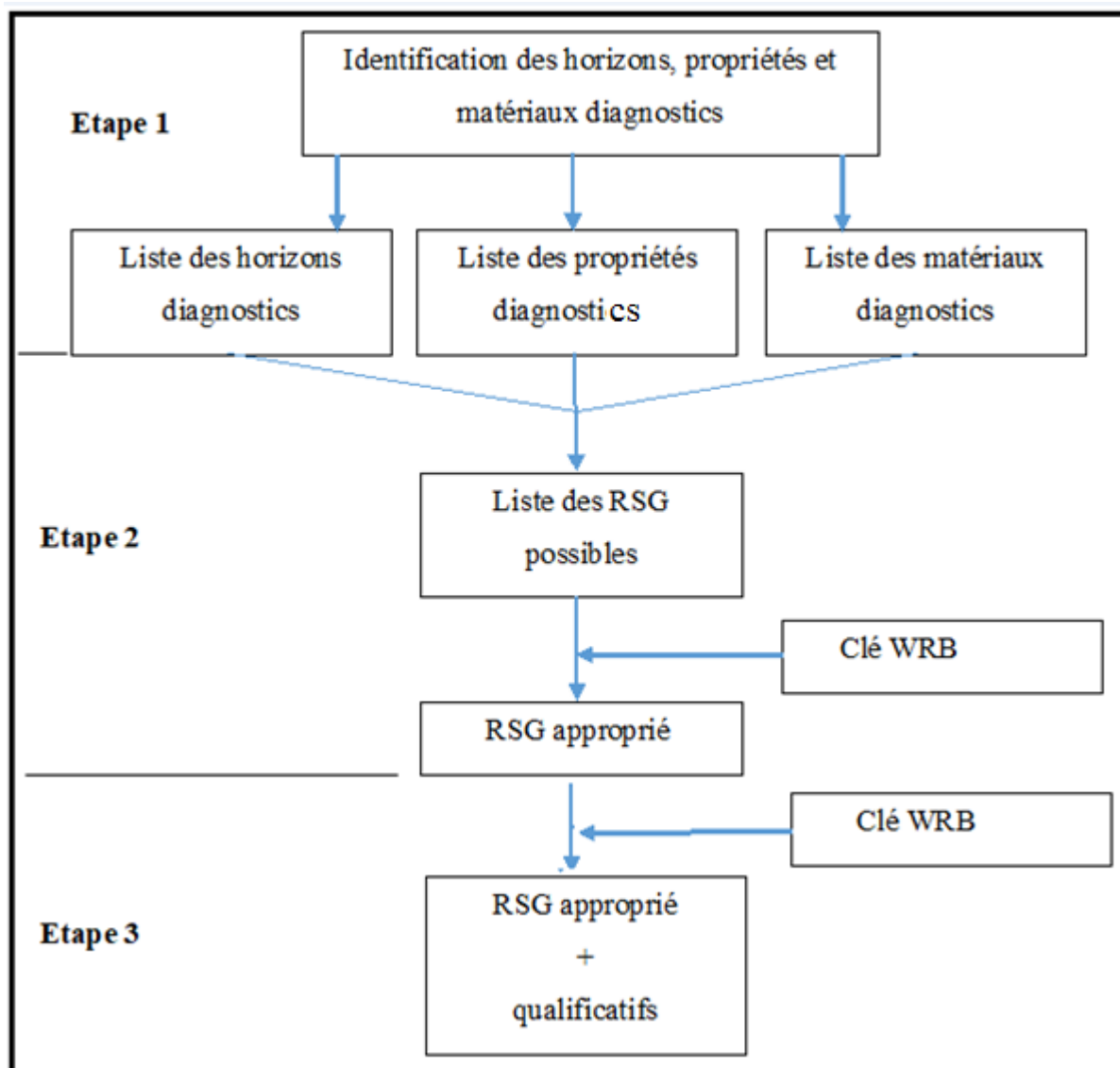


Figure 18 : Schéma récapitulatif de la classification des sols selon la WRB

Source : Kacou (2023).

### II.2.3.3. Détermination des équilibres chimiques dans les sols

Les équilibres chimiques déterminés sont ceux qui sont en général recherchés pour vérifier le bon fonctionnement des sols en cacaoculture (Smith, 1980 ; Boyer, 1982 ; Mossu, 1990). Leur détermination consiste en des calculs de rapports entre les taux des éléments nutritifs dosés dans le sol. Ainsi, les rapports du potassium (K), du calcium (Ca) et du magnésium (Mg) relativement à la somme de ces bases (respectivement  $K/S$ ,  $Ca/S$  et  $Mg/S$ , S étant la somme des bases) ont été particulièrement analysés. Le taux de saturation en bases échangeables (V) a été également calculé en divisant la somme des bases échangeables (S)

par la capacité d'échange cationique (CEC) du sol et en multipliant le résultat par 100 pour obtenir un pourcentage ( $V = (S/CEC)*100$ ). Pour Mossu (1990), les valeurs optimales de ces paramètres calculés sont estimées à : 8 ; 68 et 24 pc, respectivement pour K/S, Ca/S, et Mg/S. la valeur minimale de V est de 60 pc.

### II.2.3.4. Analyse des données

#### II.2.3.4.1. Analyse de variance

Les données collectées sur le terrain (pédologiques et sanitaire) ont été saisies et codifiées à l'aide du tableur Excel. La normalité des distributions des échantillons ainsi que l'homogénéité de leurs variances ont été vérifiées respectivement par les tests de Shapiro-Wilk et de Levène. Une ANOVA a été réalisée lorsque la variable dont provient l'échantillon suit une loi normale et qu'il y a une homogénéité des variances. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué dans le cas contraire. L'analyse de variance a aussi consisté à mesurer les différences, à l'échelle du paysage, entre les moyennes des variables des sols des deux types de parcelles étudiées (parcelles saines et parcelles malades).

#### II.2.3.4.2. Analyse en Composante Principales

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a consisté à créer, à partir de variables préexistantes constituées par les données collectées sur le terrain, de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées entre elles, et qui sont les combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats a été restreinte aux deux premiers plans factoriels, car ceux-ci expliquaient la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales (Baccini, 2010). En effet, le graphe des variables (projection des variables sur le plan factoriel 1x2) a permis de visualiser les corrélations entre les variables de l'étude. Celui des individus a permis de visualiser les corrélations entre les sols des différents sites de l'étude, permettant ainsi de regrouper ces sols dans des sous-ensembles homogènes. La projection, à la fois, des variables et des individus sur le plan factoriel (1x2) a permis de déterminer les variables caractéristiques du fonctionnement de chaque sous-ensemble de sol. Il s'est agi ici de mettre en évidence, parmi les facteurs édaphiques analysés, ceux qui sont corrélés aux sols des parcelles saines d'une part et sols des parcelles infectées d'autre part. Toutes ces analyses ont été réalisées sous le logiciel R (Version 3.6.3).

*TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS  
ET DISCUSSION*

### III.1. RÉSULTATS

#### III.1.1. Caractéristiques générales des sites de l'étude

Les sites de Bouaflé situés dans les villages de Guessanfla (N6°55'73,3" W5°45'76,8"), Krayaokro (N6°54'91,1" W5°45'71,2") et de Simporéfla (N6°53'51,0" W5°45'74,0") étaient occupés par des cacaoyers à proximité de forêts secondaires. Ce fut le cas pour les sites de Kononfla localisés dans les villages de Diénembroufla (N6°38'54,6" W5°38'01,3"), Koumoudji (N6°38'22,9" W5°38'24,5") et Kayéta (N6°38'50,2" W5°40'06,1"). La topographie de ces différentes parcelles est constituée par des plateaux de faibles pentes en général (7 à 8 pc par endroits ou parfois > 8 pc). Le micro relief de ces parcelles était dominé par des termitières (Figure 19) et de quelques affleurements de granite.



Figure 19 : Vues du microrelief des parcelles

A : Termitière à Guessanfla ; B : Termitière à Koumoudji ; C : Termitière à Krayaokro.

### III.1.2. Espèces végétales associées à la maladie du swollen shoot

#### III.1.2.1. Diversité et abondance des espèces végétales

L'inventaire réalisé a permis de recenser au total 13 espèces réservoirs dans la zone d'étude. Ces espèces sont composées de plantes d'ombrage (8 espèces), des adventices (2 espèces) et des cultures vivrières (3 espèces). Elles sont réparties entre 9 familles et 12 genres et sont toutes présentes sur les sites de Bouaflé contre 9 à Kononfla, aussi bien sur les parcelles saines que les parcelles malades (Tableau IV).

Les plantes d'ombrages sont constituées par *Adansonia digitata* (Malvaceae), *Carica papaya* (Caricaceae), *Ceiba pentandra* (Malvaceae), *Citrus sinensis* (Rutaceae), *Cola gigantea* (Malvaceae), *Cola nitida* (Malvaceae), *Milicia excelsa* (Moraceae) et *Spondias mombin* (Anarcadiaceae). *Chromolaena odorata* (Asteraceae) et *Tapinanthus bangwensis* (Loranthaceae) sont des adventices pendant que *Capsicum frutescens* (Solanaceae), *Solanum distichum* (solanaceae) et *Xanthosoma maffafa* (Araceae) sont quant à eux des cultures vivrières. Parmi l'ensemble de ces plantes, quatre espèces dont *Adansonia digitata* (Malvaceae) et *Cola gigantea* (Malvaceae) qui sont des plantes d'ombrages et *Capsicum frutescens* (Solanaceae) et *Solanum distichum* (Solanaceae) qui sont des cultures vivrières étaient spécifiques aux sites de Bouaflé. Globalement, les plantes hôtes répertoriées étaient largement dominées par *Chromolaena odorata* (Asteraceae) en termes de nombre de pieds.

**Tableau IV : Espèces végétales hôtes du virus du swollen shoot**

Familles	Espèces	Noms vernaculaires	Nombres de pieds	Sites
Malvaceae	<i>Adansonia digitata</i>	Baobab	1	Bouaflé
	<i>Ceiba pentandra</i>	Fromager	4	Bouaflé et Kononfla
	<i>Cola gigantea</i>	Grand ouara	1	Bouaflé
	<i>Cola nitida</i>	Vrai colatier	10	Bouaflé et Kononfla
Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	Papayer	14	Bouaflé et Kononfla
Rutaceae	<i>Citrus sinensis</i>	Oranger	45	Bouaflé et Kononfla
Moraceae	<i>Milicia excelsa</i>	Iroko	32	Bouaflé et Kononfla
Anarcadiaceae	<i>Spondias mombin</i>	Mirabellier	9	Bouaflé et Kononfla
Asteraceae	<i>Chromolaena odorata</i>	Sékou touré	11900	Bouaflé et Kononfla
Loranthaceae	<i>Tapinanthus bangwensis</i>	Loranthus	17	Bouaflé et Kononfla
Solanaceae	<i>Capsicum frutescens</i>	Piment	5	Bouaflé
	<i>Solanum distichum</i>	Gnangnan	5	Bouaflé
Araceae	<i>Xanthosoma maffafa</i>	Taro	11	Bouaflé et Kononfla

### III.1.2.2. Densité des plantes réservoirs du virus

Le graphe de la figures 20 présente la densité dans les parcelles des plantes d’ombrage hôtes du virus du swollen shoot (*Adansonia digitata*, *Carica papaya*, *Ceiba pentandra*, *Citrus sinensis*, *Cola gigantea*, *Cola nitida*, *Milicia excelsa* et *Spondias mombin*). La figure 21 présente le même résultat pour les adventices hôtes de ce virus (*Chromolaena odorata* et *Tapinanthus bangwensis*).

On note que les densités des plantes hôtes sont plus élevées dans les parcelles malades, quel que soit le site. Plus précisément, il y avait environ quatre fois plus de plantes hôtes à ombrage dans les parcelles malades que dans les parcelles saines à Bouaflé et deux fois plus à Kononfla. À Bouaflé comme à Kononfla, les adventices étaient très rares dans les parcelles saines contrairement aux parcelles malades où on a dénombré plus de 1500 pieds à Bouaflé et au moins 700 pieds à Kononfla.

L’inventaire des espèces végétales hôtes du virus de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères explorées a ainsi mis en évidence une diversité floristique en termes d’espèces (13 espèces) et de types de plante (plantes d’ombrage et plantes adventices). Cette flore est diversement répartie dans la zone, les sites de Bouaflé étant les plus densément peuplés. Les parcelles malades abritent en général deux à quatre fois, ou même plus de plantes hôtes que les parcelles saines.

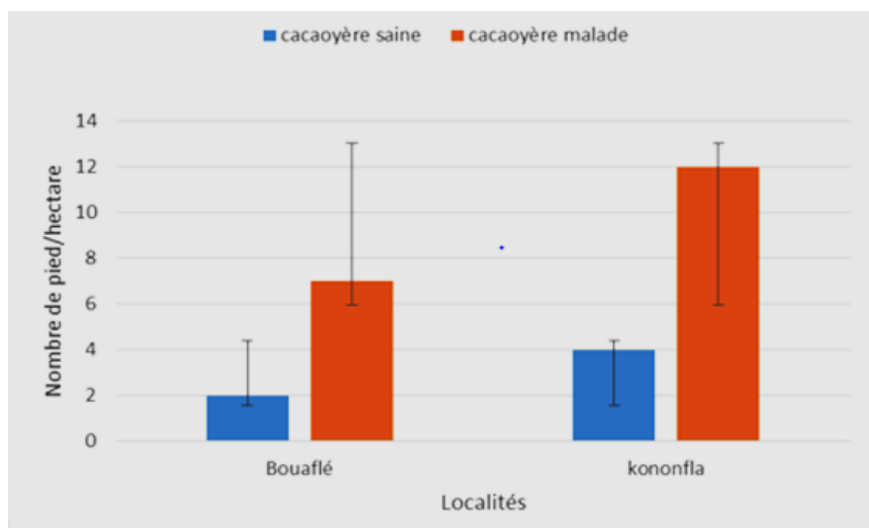


Figure 20 : Densités des plantes d’ombrage réservoirs du swollen shoot

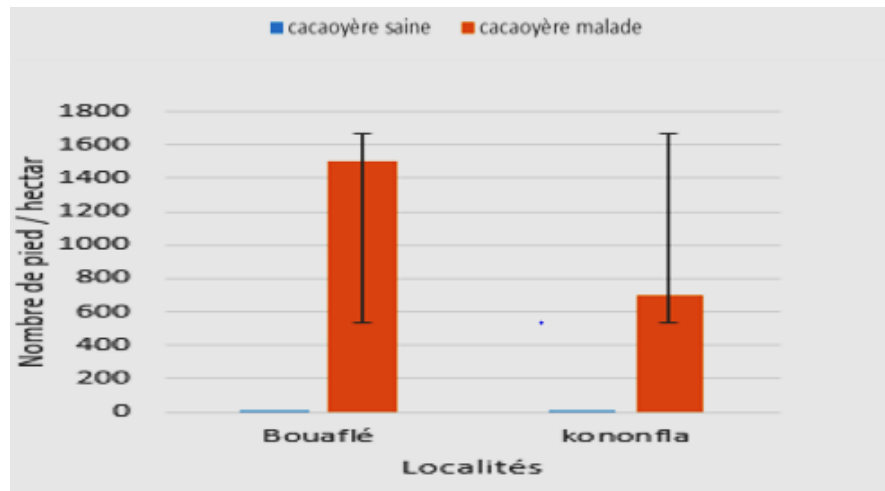


Figure 21 : Densités des plantes adventices réservoirs du swollen shoot

### III.1.3. Propriétés morphophysiques des sols

Les profils de sols ouverts sur tous les sites, en parcelles saines comme en parcelles malades, ont en général le même niveau de développement (Figure 22). Ces sols sont en effet tous bien évolués, profonds (120 cm au moins) et très différenciés. Ils sont aussi caractérisés par une altération totale des minéraux primaires. Les horizons superficiels sont humifères, peu épais en général (10 à 20 cm) et colorés brun (7,5YR 5/6 à 7,5YR 7/2) ou brun rougeâtre (5YR 3/3 à 5YR 4/4). Ces horizons sont surmontés d'une litière de feuilles très mince. Leur structure d'ensemble est grumeleuse avec une texture sablo-argileuse au toucher. Les horizons médians et de profondeurs sont plus épais avec des colorations très variées (jaune rougeâtre : 7,5 YR 6/8 à 7,5YR 7/6 ; rouge : 2,5YR 3/6 à 2,5YR4/6 et brun rougeâtre 5YR 4/3). Dans cette partie du sol, la texture est argilo-sableuse ou limono-sableuse au toucher, quand la structure d'ensemble est massive avec un débit polyédrique.

Sur les parcelles de Bouaflé, précisément celles de Krayaokro et de Guessanfla, les sols ont la particularité de renfermer des charges très élevées (50 à 60 pc) de gravillons ferrugineux entre 20 et 40 cm de profondeur, alors que dans l'horizon sus-jacent (0-20 cm), ces taux sont faibles (< 30 pc) (Tableau V). Les sols de Simporéfla au contraire sont presque dépourvus d'éléments grossiers. Au total, à Bouaflé, toutes les couches des sols en parcelles saines comparées aux couches des sols en parcelles infectées ne présentent pas de différences significatives entre elles pour le même type de couches (0-20 cm) ou (20-40 cm) ( $P > 0,05$ ) (Tableau V).

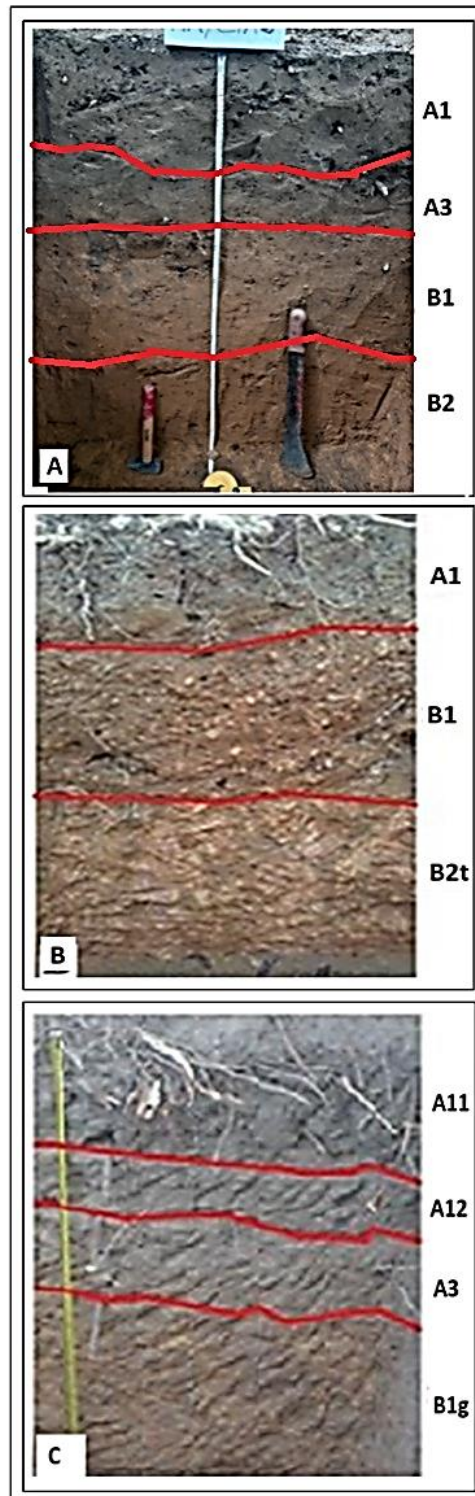


Figure 22 : Quelques profils des sols

- A- Sol profond, bien drainé et presque dépourvu d'éléments grossiers en parcelle saine à Simporéfla ;
- B- Sols profond, avec un horizon B1 chargé en éléments grossiers et un horizon B2t compacté du fait de l'argile à Guessanfla ;
- C- Sols profond, avec un horizon B1g présentant des traces d'hydromorphie temporaire à Guessanfla.

**Tableau V : Taux de concrétions dans les sols de Bouaflé**

		Parcelles											
Couches	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	EG (pc)	20,83±9,82a	23,99±11,31a	0,09	0,79	29,70±4,1a	29,48±4,0a	0,00	0,964	0,00±0,0 a	0,00±0,0a	--	--
20-40	EG (pc)	50,40±23,75a	63,55±0,00 a	0,61	0,51	66,67±0,04a	59,13±9,6a	1,21	0,385	0,00±0,0 a	0,00±0,0a	--	--

- EG : taux d'éléments grossiers ;

- Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

**Tableau VI : Taux de concrétions dans les sols de Kononfla**

		Parcelles											
Couches	Variables	Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	EG (pc)	4,28±2,02a	6,72±2,58a	1,10	0,405	1,50±2,14a	0,61±0,86a	0,30	0,639	18,12±0,54a	9,19±13,00a	0,94	0,43
20-40	EG (pc)	10,47±2,18a	15,85±2,97a	4,23	0,175	5,09±1,03a	7,26±3,23a	0,81	0,463	26,87±5,46a	19,59±22,41a	0,20	0,69

- EG : taux d'éléments grossiers ;

- Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

A Kononfla, les taux de concrétions oscillent entre 1,5 et 18,12 pc pour les couches 0-20 cm et entre 5 et 27 pc pour les couches 20-40 cm en parcelles saines. En parcelles infectées, ces taux varient entre 0,61 et 9,19 pc pour les couches 0-20 cm et entre 7,26 et 19,59 pc pour les couches 20-40 cm. Les sols des deux types de parcelles ne présentent ainsi pas de différence significative concernant leurs taux de concrétions entre 0 et 40 cm ( $P > 0,05$ ) (Tableau VI). Les résultats consignés dans les Tableau VII et VIII permettent de mieux préciser la texture des sols. En effet, dans les couches 0-20 cm des sols, les teneurs en sables sont plus élevées (plus de 50 pc) que celles des argiles (25 à 35 pc) et des limons (16 à 24 pc), conférant ainsi à cette partie du sol une texture limono-argilo-sableuse en général. Les couches 20-40 cm présentent une accumulation d'argiles avec des taux atteignant plus de 30 ou 50 pc dans les parcelles saines ou parcelles malades de Bouaflé, puis plus de 30 pc dans les deux types de parcelles à Kononfla. Ces couches sont argileuses. Les sols en parcelles saines et parcelles infectées à Bouaflé ou à Kononfla ne présentent globalement pas de différence significative concernant leurs taux d'argile (33.pc), de limon (21.pc) et de sable (45. pc) entre 0 et 40 cm ( $P > 0,05$ ), d'où leur texture limono-argileuse.

Tableau VII : Textures des sols de Bouaflé

		Parcelles											
Couches	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporefla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	A (pc)	24,75±6,71a	26,88±9,36a	0,07	0,8187	25,25±5,30a	41,00±5,65a	8,25	0,1028	15,75±7,42a	20,50±9,09a	0,11	0,77
	L (pc)	23,62±1,23a	24,25±3,18a	0,07	0,8199	24,75±2,47a	30,00±0,70a	8,32	0,1021	19,00±2,82a	20,75±4,59a	0,21	0,69
	S (pc)	51,62±7,95a	48,63±12,90a	0,08	0,8059	49,50±7,77a	28,75±4,59a	10,55	0,0831	65,00±4,94a	59,25±23,68a	0,11	0,76
20-40	A (pc)	44,62±6,89a	56,00±7,77a	2,40	0,2618	41,50±9,19a	40,75±1,06a	0,01	0,9192	38,25±11,6a	23,75±18,03a	0,91	0,44
	L (pc)	21,75±0,35a	21,00±14,14a	1,50	0,3454	26,00±2,82a	20,50±0,00a	7,56	0,1107	21,50±0,70a	22,75±3,88a	0,20	0,69
	S (pc)	33,37±7,60a	22,91±48,79a	0,58	0,5254	32,25±6,71a	38,75±1,06a	1,83	0,3091	40,25±13,0a	53,50±21,92a	0,54	0,53

- A : taux d'argiles ; L : Taux de limons ; S : Taux de sables ;

- Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

Tableau VIII : Textures des sols de Kononfla

		Parcelles											
Couches	Variables	Diénebroufla				Kayéta				Koumoudji			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	A (pc)	26,94±1,81a	27,59±0,56a	0,23	0,67	34,99±5,93a	26,01±0,53a	4,55	0,16	29,16±4,82a	28,99±1,18a	0,00	0,96
	L (pc)	16,78±0,54a	19,62±0,83a	16,38	0,056	19,05±1,58a	18,55±0,99a	0,14	0,74	18,27±0,47a	18,17±0,26a	0,07	0,81
	S (pc)	56,28±2,35a	52,80±1,39a	3,21	0,214	45,96±7,52a	55,44±0,45a	3,17	0,21	52,57±5,29a	52,84±0,91a	0,01	0,94
20-40	A (pc)	34,47±4,02a	33,73±1,06a	0,06	0,823	27,14±1,70a	30,99±7,06a	0,56	0,53	26,79±1,19a	28,15±2,42a	0,51	0,55
	L (pc)	18,76±0,95a	19,03±0,35a	0,14	0,748	18,18±2,04a	18,78±1,41a	0,12	0,76	18,80±1,82a	18,32±0,89a	0,11	0,76
	S (pc)	46,76±4,97a	47,24±1,41a	0,02	0,907	54,67±3,74a	50,23±8,47a	0,46	0,56	54,41±3,01a	53,53±3,32a	0,08	0,80

- A : taux d'argiles ; L : Taux de limons ; S : Taux de sables ;

- Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$

L'ensemble des sites explorés a présenté deux à trois fois plus de traces d'hydromorphie de profondeur dans les sols sous parcelles malades que les sols en parcelles saines (Tableau IX). Cette fréquence d'apparition de l'hydromorphie dans les profils n'est toutefois pas différente significativement ( $P > 0,05$ ). Leurs profondeurs d'apparition sont au contraire différentes significativement ( $P < 0,05$ ). En effet, dans toutes les parcelles saines, l'hydromorphie n'a pas été observée jusqu'à 120 cm. Par contre dans certaines parcelles malades, l'hydromorphie a été observé à 50 cm ou à 55 cm (Tableau X).

**Tableau IX : Moyennes des taux d'apparition de l'hydromorphie dans les parcelles saines et malades à Bouaflé et à Kononfla**

Localités	Taux (pc) en parcelles saines	Taux (pc) en parcelles malades	Test ANOVA	
			F	P
Bouaflé	0,11± 0,19a	0,33± 0,57a	0,32	0,60
Kononfla	0,11±0,19a	0,22± 0,38a	0,09	0,77
Echelle du paysage	0,11±0,17a	0,27±0,44a	0,50	0,49

*Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes affectées d'une même lettre sur une même ligne ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .*

Tableau X : Profondeurs d'apparition de l'hydromorphie dans les 120 premiers cm des sols

		Parcelles											
Localités	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporefla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
Bouaflé	PATH												
	(cm)	> 120±00a	> 120±00a	1	0,33	> 120±00a	> 120±00a	1	0,33	> 120±00a	50±10b	147	0,00
Kononfla	PATH												
	(cm)	> 120±00a	> 120±00a	1	0,33	> 120±00a	55±11b	104,8	0,00	> 120±00a	> 120±00a	1	0,33

- *PATH* : Profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie ;

- Pour les sols des parcelles de chaque localité, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

### III.1.4. Propriétés chimiques des sols

#### III.1.4.1. $pH_{eau}$

Les tableaux XI et XII présentent dans cet ordre les  $pH_{eau}$  des sols des sites de Bouaflé et de Kononfla. Les sols en parcelles infectées ont une réaction proche de la neutralité ( $pH_{eau} = 6,6-6,9$ ) alors que ceux en parcelles saines sont en général peu acides ( $pH_{eau} = 6,2-6,5$ ).

Les sols de Bouaflé ont une acidité similaire en parcelles saines ( $pH_{eau} = 6,2-6,5$ ) comme en parcelles infectées ( $pH_{eau} = 6,6-6,9$ ), aussi bien dans les couches 0-20 cm que 20-40 cm, ( $pH_{eau} = 6,2-6,5$  en parcelles saines et  $6,6-6,9$  en parcelles infectées). Toutefois une différence est observée d'un type de parcelle à un autre, notamment à Guessanfla ( $P < 0,05$ ).

Les sols de Kononfla ont, dans la couche 0-20 cm, une acidité similaire à l'échelle parcellaire locale ( $pH_{eau} = 6,2-6,3$  sous parcelles saines et  $pH_{eau} = 6,2$  en parcelles infectées). Ces deux types de parcelles sont par ailleurs similaires ( $P > 0,05$ ). Un résultat similaire est observé avec les couches 20-40 cm caractérisées par des  $pH_{eau}$  variant dans l'intervalle 6,2-6,3 en parcelles saines et en parcelles infectées.

**Tableau XI : pH des sols de Bouaflé**

		Parcelles												
Couches	Variable	Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla				Seuil
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	
0-20	pHeau	6,5±0,26a	6,6±0,03a	0,00	0,953	6,2±0,03a	6,9±0,45a	3,98	0,1843	6,5±0,56a	6,6±0,00a	0,06	0,82	5-7
20-40	pHeau	6,4±0,03b	6,9±0,05a	105,31	0,009	6,5±0,31a	6,6±0,14a	1,74	0,3177	6,2±0,10a	6,6±0,70a	0,20	0,69	5-7

*Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .*

**Tableau XII : pH des sols de Kononfla**

		Parcelles												
Couches	Variable	Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji				Seuil
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	
0-20	pHeau	6,2±0,02a	6,2±0,00a	15,6	0,05	6,3±0,08a	6,2±0,01a	0,83	0,457	6,3±0,03a	6,2±0,04a	2,65	0,24	5-7
20-40	pHeau	6,3±0,03a	6,3±0,02a	0,63	0,50	6,3±0,03a	6,3±0,03a	2,00	0,292	6,2±0,01a	6,3±0,04a	4,90	0,15	5-7

*Pour les sols d'une parcelle donnée, les moyennes d'une ligne affectées par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .*

**III.1.4.2. Carbone organique et azote total**

Les sols explorés à Bouaflé en parcelles saines présentent des taux de C proches de 1,00 pc dans la couche 0-20 cm, ce qui équivaut à 1,72 pc de MO. Dans cette couche, les taux moyens de N oscillent autour de 0,08 pc. Sous parcelles malades, la même tendance est observée avec les taux de C et de N, sauf à Krayaokro où ces taux sont plus élevés (respectivement : 1,27 pc de C soit 2,18 pc de MO et 0,12 pc de N contre 1,05 de C soit 1,80 pc de MO et 0,08 pc de N en parcelle saine). Le rapport C/N varie entre 10 et 13, ce qui ne distingue pas significativement les parcelles saines des parcelles infectées ( $P > 0,05$ ). Les sols de Krayaokro sont au contraire très distincts par leurs taux d'azote total (N) ( $P < 0,05$ ), les sols des parcelles saines étant les plus fournis (0,12 pc contre 0,08 pc) (Tableau XIII).

Dans la couche 20-40 cm, les teneurs de C et de N sous parcelles saines correspondent approximativement au tiers ou à la moitié des moyennes observées dans la couche 0-20 cm du même type de parcelle. Les rapports C/N qui varient en parcelles saines entre  $10,00 \pm 1,41$  et  $11,00 \pm 0,00$  sont ainsi similaires, tout comme ceux des parcelles malades qui oscillent autour de 12. Aucune différence significative n'est observable entre les sols des parcelles saines et les sols des parcelles infectées ( $P > 0,05$ ) (Tableau XIII).

Sur les sites de Kononfla (Tableau XIV), les taux de C (1 pc au maximum correspondant à 1,72 pc de MO), les taux de N (0,06 à 0,07 pc) ainsi que le rapport C/N (12 à 13) marquent peu de différences entre les sols en parcelles saines, aussi bien les couches 0-20 cm que les couches 20-40 cm. Sur les parcelles malades, le constat est le même. La comparaison des sols des deux types de parcelles ne révèle donc aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) (Tableau XIV).

Tableau XIII : Taux de C et de N, et ratio C/N des sols de Bouaflé

		Parcelles													
Couches	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla				Seuil	
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P		
0-20	C (pc)	0,92±0,17a	0,87±0,17a	0,08	0,803	1,05±0,07a	1,27±0,24a	1,53	0,341	0,99±0,31a	0,87±0,53a	0,05	0,84	2,03	
	N (pc)	0,07±0,00a	0,07±0,01a	0,03	0,882	0,12±0,00a	0,08±0,00b	81,00	0,012	0,08±0,02a	0,08±0,06a	0,09	0,78	0,16	
	C/N	12,87±0,88a	12,50±0,70a	0,22	0,685	13,00±2,12a	10,00±2,12a	2,00	0,292	12,37±0,35a	11,75±3,18a	0,05	0,84	9-12	
20-40	C (pc)	0,35±0,00a	0,40±0,14a	0,25	0,666	0,60±0,28a	0,62±0,03a	0,02	0,912	0,35±0,00a	0,32±0,31a	0,01	0,92	2,03	
	N (pc)	0,03±0,00a	0,03±0,01a	0,66	0,827	0,05±0,01a	0,05±0,01a	0,00	1,00	0,03±0,00a	0,02±0,03a	0,06	0,83	0,16	
	C/N	11,00±0,00a	12,00±0,70a	4,00	0,183	10,00±1,41a	11,75±1,76a	1,20	0,388	10,50±0,70a	12,25±1,76a	1,69	0,32	9-12	

- C : Carbone organique du sol ; N : Azote total ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

Tableau XIV : Taux de C et de N, et ratio C/N des sols de Kononfla

Couches	Variables	Parcelles												Seuil
		Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji				
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	
0-20	C (pc)	0,93±0,01a	0,90±0,04a	0,77	0,47	0,83±0,09a	1,01±0,02a	7,28	0,11	0,90±0,09a	0,84±0,09a	0,33	0,62	2,03
	N (pc)	0,07±0,00a	0,067±0,00a	0,03	0,88	0,065±0,0a	0,075±0,00a	9,00	0,09	0,067±0,00a	0,062±0,00a	1,00	0,42	0,16
	C/N	13,25±0,24a	13,34±0,05a	0,25	0,66	12,74±0,01a	13,48±0,35a	8,52	0,10	13,24±0,76a	13,42±0,70a	0,06	0,83	9-12
20-40	C (pc)	0,82±0,05a	0,83±0,01a	0,11	0,76	0,98±0,06a	0,91±0,15a	0,40	0,59	0,88±0,01a	0,95±0,12a	0,60	0,52	2,03
	N (pc)	0,06±0,00a	0,063±0,00a	0,04	0,86	0,07±0,00a	0,067±0,01a	0,20	0,69	0,06±0,00a	0,070±0,00a	1,00	0,42	0,16
	C/N	13,00±0,16a	13,14±0,03a	1,44	0,35	13,12±0,3a	13,40±0,24a	0,92	0,43	13,03±0,45a	13,51±0,43a	1,12	0,40	9-12

- C : Carbone organique du sol ; N : Azote total ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

### III.1.4.3. Phosphore assimilable

L'analyse des taux de phosphore assimilable ( $P_{\text{ass}}$ ) dans les sols montre qu'à Bouaflé comme à Kononfla, les taux oscillent entre 0,60 et 0,75 g/kg sur les sites pour les mêmes types de parcelles et pour les mêmes couches. Ces résultats marquent tout de même des différences entre les sols, notamment entre les sols de Guessanfla et de Simporéfla à Bouaflé. Les sols les plus fournis sont ceux explorés en parcelles saines qui renferment par endroits 0,82 g/kg contre 0,60 g/kg en parcelles malades (Guessanfla) ( $P < 0,05$ ) (Tableaux XV). Dans tous les cas observés, les taux de  $P_{\text{ass}}$  demeurent inférieurs à 1 g/kg et supérieurs à 0,56 g/kg (Tableaux XV et XVI).

**Tableau XV : Taux de phosphore assimilable des sols de Bouaflé**

		Parcelles												
Couches	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla				
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Seuil
0-20	P <sub>ass</sub> (g/kg)	0,72±0,00a	0,68±0,01a	0,11	0,76	0,72±0,10a	0,70±0,13a	2,22	0,27	0,75±0,00a	0,66±0,01b	63,18	0,01	0,1
20-40	P <sub>ass</sub> (g/kg)	0,82±0,06a	0,60±0,07b	84,99	0,01	0,75±0,15a	0,73±0,01a	0,90	0,44	0,68±0,07a	0,63±0,00a	8,02	0,10	0,1

- *Pass* : Phosphore assimilable ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

**Tableau XVI : Taux de phosphore assimilable des sols de Kononfla**

		Parcelles												
Couches	Variables	Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji				
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Seuil
0-20	P <sub>ass</sub> (g/kg)	0,63±0,00a	0,57±0,03a	11,21	0,07	0,69±0,13a	0,61±0,17a	0,04	0,86	0,68±0,02a	0,66±0,0a	7,20	0,11	0,1
20-40	P <sub>ass</sub> (g/kg)	0,63±0,02a	0,59±0,07a	0,29	0,64	0,75±0,13a	0,63±0,01a	0,62	0,51	0,77±0,05a	0,66±0,0a	0,02	0,91	0,1

*Pass* : Phosphore assimilable ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

### III.1.4.4. Bases échangeables et CEC

Les tableaux XVII et XVIII affichent les teneurs de calcium (Ca), potassium (K) et de magnésium (Mg) dans les sols ainsi que les capacités de ces sols à échanger les cations (CEC).

À Bouaflé, les teneurs des sols en Ca et Mg, puis la CEC affichent des valeurs plus élevées dans les sols des parcelles saines, marquant ainsi une différence significative entre les sols des deux types de parcelles étudiés (respectivement 65,41 mmol(+).kg<sup>-1</sup> et 11,41 mmol(+).kg<sup>-1</sup>, puis 72,75 mmol(+).kg<sup>-1</sup> contre 50,85 mmol(+).kg<sup>-1</sup> et 7,17 mmol(+).kg<sup>-1</sup>, puis 53,37 mmol(+).kg<sup>-1</sup>). Le K a tendance à être plus relevé dans les sols des parcelles saines sans toutefois marquer une différence significative avec les sols des parcelles malades (3,96 mmol(+).kg<sup>-1</sup> contre 2,99 mmol(+).kg<sup>-1</sup>).

À Kononfla, les sols des parcelles saines sont aussi en général plus fournis en Ca, Mg et K, avec une CEC plus élevée. Aussi, ces facteurs différencient-ils significativement par endroits les sols des parcelles saines et sols des parcelles malades ( $P < 0,05$ ) (Tableau XVIII).

Tableau XVII : Bases échangeables et de la CEC des sols de Bouaflé

Couches (cm)	Variables (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	Parcelles											
		Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	Ca	62,18±5,83a	57,49±12,46a	0,23	0,67	53,13±8,16a	54,28±24,00a	5,27	0,14	60,60±19,72a	54,10±32,59a	0,06	0,83
	K	3,52±0,67a	2,82±0,24a	1,91	0,30	2,87±0,81a	4,27±1,23a	1,79	0,31	1,90±0,28a	2,57±0,38a	3,94	0,18
	Mg	12,52±1,02a	7,10±0,07b	55,73	0,01	10,30±2,7a	7,25±6,64a	1,87	0,30	11,02±0,95a	9,65±3,81a	0,24	0,67
	CEC	71,63±0,53a	66,00±14,84a	0,29	0,64	66,00±21,92a	61,75±29,34a	4,15	0,17	59,75±15,20a	60,00±36,06a	0,00	0,99
20-40	Ca	63,64±1,50a	52,06±2,35b	34,42	0,02	76,03±34,25a	53,80±3,81b	35,09	0,02	56,58±14,81a	46,70±19,44a	0,00	0,99
	K	4,45±0,28a	2,47±0,81a	10,52	0,08	3,47±0,45a	3,52±1,02a	0,00	0,95	3,55±2,12a	1,72±1,37a	1,04	0,41
	Mg	9,55±1,48a	11,23±5,49a	0,18	0,71	14,17±1,52a	9,65±2,40a	5,06	0,15	10,37±5,62a	14,70±11,59a	0,23	0,68
	CEC	58,13±1,59	68,75±10,25a	2,1	0,28	84,25±25,10a	59,50±8,48b	1,54	0,00	61,25±0,35a	47,25±0,35b	1,56	0,00

Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

Tableau XVIII : Bases échangeables et de la CEC des sols de Kononfla

Couches (cm)	Variables (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	Parcelles											
		Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	Ca	62,88±0,04a	60,35±3,07a	1,36	0,36	56,52±9,13a	62,32±2,17a	1,76	0,316	59,36±6,75a	55,73±2,87a	0,49	0,55
	K	3,29±0,02a	3,34±0,02a	3,81	0,19	3,16±0,26a	3,27±0,18a	0,24	0,67	3,44±0,16a	3,34±0,10a	0,58	0,52
	Mg	22,34±0,02a	22,40±0,89a	0,01	0,92	20,10±3,07a	22,71±2,25a	0,94	0,43	21,10±2,51a	20,91±0,09a	0,01	0,92
	CEC	126,20±20,1a	128,87±18,0a	0,02	0,90	97,16±19,4a	100,25±13a	0,03	0,87	121,88±3,0a	113,21±24a	0,24	0,67
20-40	Ca	63,55±1,27a	50,37±0,44b	190,0	0,00	64,44±2,57a	60,70±13,2a	0,15	0,73	66,67±0,08a	67,79±11,4a	1,89	0,30
	K	3,53±0,01a	3,16±0,05b	74,65	0,01	3,43±0,19a	3,15±0,16a	2,35	0,26	3,65±0,05a	3,16±0,12b	27,07	0,03
	Mg	23,90±0,14a	20,00±1,00b	29,82	0,03	22,10±2,10a	19,93±2,91a	0,73	0,48	20,21±1,52a	23,22±4,43a	0,83	0,45
	CEC	94,93±0,07a	95,37±4,58a	0,02	0,9044	114,38±27a	123,15±25,5a	0,11	0,77	112,92±21a	106,08±49,6a	0,03	0,87

Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

### III.1.4.5. Oligoéléments

Les oligoéléments dosés dans cette recherche sont le cuivre (Cu), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn). Sur l'ensemble des sites de l'étude, aucune de ces variables ne permet de différencier significativement les couches de sol des parcelles saines de celles des parcelles malades. On observe toutefois que le Mn a tendance à être plus présent dans les sols des parcelles infectées avec des teneurs de plus de 300 mg/kg dans la couche 0-20 cm (cas du sol de Guessanfla) (Tableau XIX).

A Kononfla, les taux des oligoéléments dosés sont peu différents dans les couches des sols d'un même type de parcelle (Tableau XX). C'est le cas aussi pour la comparaison entre les sols des parcelles saines et ceux des parcelles infectées ( $P > 0,05$ ) (Tableau XX). Cependant, les sols en parcelles malades ont tendance à être plus fournis en manganèse comme les sols de Bouaflé, principalement la couche 0-20 cm (Tableau XX).

Tableau XIX : Taux d'oligoéléments des sols de Bouaflé

		Parcelles											
Couches	Variables	Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	Cu (mg/kg)	1,86±0,47a	2,21±0,76a	0,30	0,63	2,12±1,09a	2,17±0,24a	0,00	0,95	1,07±0,31a	1,45±1,20a	0,18	0,71
	Mn (mg/kg)	274,43±5,19a	300,21±22,82a	2,43	0,25	227,03±29,3a	275,03±9,29a	4,85	0,15	196,63±94,4a	273,73±21,0a	1,20	0,38
	Zn (mg/kg)	0,14±0,00a	0,14±0,00a	0,71	0,48	0,15±0,00a	0,14±0,01a	1,80	0,31	0,13±0,00a	0,15±0,00a	8,00	0,10
20-40	Cu (mg/kg)	2,15±0,70a	1,70±0,28a	0,70	0,49	1,72±0,03a	1,52±0,38a	0,52	0,54	1,55±1,27a	1,35±0,35a	0,05	0,85
	Mn (mg/kg)	242,71±69,34a	278,58±65,58a	0,28	0,64	261,73±121a	146,73±5,76a	1,80	0,31	122,93±38,6a	145,98±9,22a	0,67	0,49
	Zn (mg/kg)	0,14±0,00a	0,145±0,00a	0,02	0,90	0,13±0,00a	0,141±0,01a	0,20	0,69	0,15±0,01a	0,140±0,01a	0,50	0,55

Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

Tableau XX : Taux d'oligoéléments des sols de Kononfla

		Parcelles											
Couches	Variables	Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	Cu (mg/kg)	2,12±0,02a	2,10±0,05a	0,23	0,6810	2,09±0,28a	2,11±0,05a	2,28	0,26	2,05±0,18a	2,06±0,04a	0,00	0,93
	Mn (mg/kg)	210,60±1,35a	211,64±7,33a	0,04	0,8615	202,12±7,93a	224,44±3,89a	12,76	0,070	203,66±33,5a	214,95±15,1a	0,19	0,70
	Zn (mg/kg)	0,142±0,00a	0,14±0,00a	11,52	0,0769	0,143±0,00a	0,14±0,00a	0,00	1,00	0,145±0,00a	0,15±0,00a	2,00	0,29
20-40	Cu (mg/kg)	2,16±0,06a	2,02±0,05a	0,47	0,5637	2,18±0,03a	2,03±0,19a	1,04	0,41	2,11±0,04a	2,12±0,14a	1,21	0,38
	Mn (mg/kg)	212,47±4,51a	200,1±0,38a	14,91	0,0610	217,8±6,01a	213,51±17,8a	0,10	0,77	206,83±9,02a	218,82±21,9a	0,51	0,54
	Zn (mg/kg)	0,140±0,00a	0,13±0,00a	1,00	0,4226	0,140±0,00a	0,14±0,00a	11,53	0,07	0,145±0,00a	0,15±0,00a	1,00	0,42

Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

### III.1.4.6. Equilibres cationiques et saturation du complexe adsorbant des sols

Dans les tableaux XXI à XXII, figurent le taux de saturation des bases échangeables (V), leur somme (S) ainsi que les équilibres entre ces bases et leur somme (Ca/S, Mg/S et K/S). Seuls V et/ou S distinguent les sols significativement entre 20 et 40 cm de profondeur, à chaque fois, sur un seul des trois sites à Bouaflé (Guessanfla) et à Kononfla (Diénembroufla) ( $P < 0,05$ ). En général, le taux de saturation en bases échangeables (V) dépasse 60 pc sur toutes les parcelles.

Tableau XXI : Équilibres chimiques dans les sols de Bouaflé

Couches	Variables	Parcelles											
		Guessanfla				Krayaokro				Simporéfla			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	S (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	78,22 ±4,13a	67,41±12,78a	1,3	0,37	66,30±6,22a	115,8±31,89a	4,64	0,16	73,52±19,05a	66,32±36,8a	0,06	0,82
	Mg/S	0,160±0,02a	0,107±0,01a	8	0,10	0,158±0,05a	0,146±0,01a	0,12	0,75	0,156±0,05a	0,153 ±0,02a	0,02	0,91
	Ca/S	0,793±0,03a	0,85±0,02a	2,95	0,22	0,799±0,04a	0,81±0,01a	0,28	0,65	0,816±0,05a	0,80±0,04a	0,08	0,80
	K/S	0,045±0,01a	0,042±0,00a	0	1	0,042±0,00a	0,036±0,00a	1	0,42	0,026±0,00a	0,043±0,01a	1,6	0,33
	V (pc)	109,23±6,58a	102,55 ±3,70a	2,3	0,26	104,66±25,32a	97,16±2,84a	5,18	0,15	122,97±0,60a	112,41±6,2a	0,26	0,65
20-40	S (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	90,99±1,14a	73,53±0,61b	22,24	0,04	89,98±4,86a	83,79±16,35a	1,09	0,40	80,05±1,55a	94,67±15,8a	0,01	0,91
	Mg/S	0,26±0,00a	0,27±0,01a	0	1	0,24±0,01a	0,23±0,01a	0,15	0,73	0,25±0,01a	0,24±0,00a	0,08	0,80
	Ca/S	0,69 ±0,00a	0,68±0,01a	1,1	0,40	0,71±0,01a	0,72±0,01a	0,01	0,93	0,70±0,01a	0,71 ±0,00a	0,02	0,90
	K/S	0,038±0,00a	0,042±0,00a	16	0,05	0,038±0,00a	0,038±0,00a	0,5	0,55	0,039±0,00a	0,039±0,00a	0,47	0,56
	V (pc)	95,85±1,13a	77,21±4,35a	1,6	0,333	81,50±23,69a	68,13±0,85a	0,73	0,48	72,39±15,44a	96,32±30,1a	0,13	0,75

- S : Somme des bases échangeables ;

- V : Taux de saturation en bases ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

Tableau XXII : Équilibres chimiques dans les sols de Kononfla

Couches	Variables	Parcelles											
		Diénembroufla				Kayéta				Koumoudji			
		Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P	Saine	Malade	F	P
0-20	S (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	88,52±0,04a	86,10 ±3,99a	0,73	0,48	79,79±12,47a	81,31 ±4,62a	1,5	0,34	83,91±9,10a	79,99 ±2,67a	0,34	0,61
	Mg/S	0,252±0,0a	0,260 ±0,0a	0,20	0,69	0,252±0,00a	0,248 ±0,01a	0	1	0,251±0,00a	0,261 ±0,00a	1	0,42
	Ca/S	0,710±0,0a	0,70 ±0,0a	0,20	0,69	0,708±0,00a	0,71 ±0,01a	1	0,42	0,707±0,00a	0,69 ±0,01a	0,2	0,69
	K/S	0,037±0,0a	0,038 ±0,0a	0,20	0,69	0,039±0,00a	0,035 ±0,00a	0,21	0,69	0,041±0,00a	0,041 ±0,00a	1	0,42
	V (pc)	71,05±11,39a	67,69 ±12,55a	0,13	0,75	85,12±29,91a	72,23 ±17,07a	0,34	0,62	68,77±5,72a	72,66 ±18,2a	0	0,99
20-40	S (mmol(+).kg <sup>-1</sup> )	90,99±1,14a	73,53±0,61b	357,2	0,00	89,98±4,86a	83,79±16,35a	0,26	0,65	80,05±1,55a	74,67±15,81a	1,69	0,32
	Mg/S	0,26 ±0,00a	0,27±0,01a	0,2	0,69	0,24±0,01a	0,23±0,01a	0,2	0,69	0,25±0,01a	0,24±0,00a	0,2	0,69
	Ca/S	0,69 ±0,00a	0,68±0,01a	2	0,29	0,71±0,01a	0,72±0,01a	0,2	0,69	0,70±0,01a	0,71±0,00a	1	0,42
	K/S	0,038±0,00a	0,042±0,00a	0,19	0,69	0,038±0,00a	0,038±0,00a	1	0,42	0,039±0,00a	0,039± 0,00a	1	0,42
	V (pc)	95,85±1,13a	77,21±4,35b	92,33	0,01	81,50±23,69a	68,13±0,85a	0,76	0,47	72,39 ±15,44a	76,32±30,19a	4,32	0,17

- S : Somme des bases échangeables ;

- V : Taux de saturation en bases ;

- Pour une parcelle donnée, les moyennes d'une même ligne affectées par des lettres différentes sont significativement différentes au seuil  $\alpha < 0,05$ .

L'étude aura montré au plan chimique que les sols des parcelles infectées, surtout à Bouaflé, ont globalement une réaction proche de la neutralité alors que les sols en parcelles saines sont peu acides.

Les taux les plus relevés de P sont caractéristiques des couches 20-40 cm des parcelles saines idem au cas de l'azote qui a plutôt affiché des valeurs plus élevées en parcelles saines, mais seulement dans les couches 0-20 cm à Krayaokro (Bouaflé).

Des différences sont induites respectivement par le Mg et la CEC, puis le Ca et le K entre les sols des parcelles saines et ceux des parcelles infectées avec une tendance des valeurs plus grandes pour les sols des parcelles saines.

Excepté le Mn qui semble s'accumuler dans les sols des parcelles infectées sans les différencier significativement, tous les autres oligoéléments dosés (Cu, Zn) dans cette recherche ne distinguent pas véritablement les sols.

Les sommes des bases échangeables et les taux de saturation en ces bases marquent par endroits des différences significatives entre les sols, les valeurs les plus grandes étant chaque fois caractéristiques des sols des parcelles saines.

### **III.1.5. Analyses en Composantes Principales et relations entre les propriétés des sols et la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères**

#### **III.1.5.1. Corrélations entre les variables des sols et entre les variables et les sols**

Le jeu de données utilisé pour réaliser l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est composé de douze individus ou sols (Sols des parcelles saines et Sols des parcelles malades), dont six localisés à Bouaflé, quand les six autres sont à Kononfla. Ce jeu comprend aussi 22 variables réparties entre les variables morpho-physiques et les variables chimiques des sols des cacaoyères.

Les deux premières composantes principales afférentes aux données issues des couches 0-20 cm des parcelles de Bouaflé expriment ensemble 79 pc de l'inertie totale (Figure 23.A). Ainsi, 79 pc de la variabilité totale du nuage des variables étudiées sont expliqués par le plan déterminé par ces deux premières composantes de l'ACP. Relativement aux données collectées dans les couches 20-40 cm sur les mêmes sites de Bouaflé, le pourcentage d'inertie exprimé par le premier plan s'élève à 69,79 (Figure 23.C). Ces pourcentages étant assez élevés, traduisent que pour chaque cas, le premier plan peut bien représenter la variabilité

contenue dans l'ensemble du jeu de données utilisé. Comme pour le cas de Bouaflé, l'analyse des données édaphiques collectées sur les parcelles de Kononfla affiche des pourcentages d'inertie élevés pour le premier plan, aussi bien pour les couches 0-20 cm du sol (69,35 pc) (Figure 24.A) que pour les couches 20-40 cm du sol (72,10 pc) (Figure 26.C). Le premier plan peut donc bien représenter dans chacun des cas la variabilité contenue dans l'ensemble du jeu de données utilisé.

L'axe 1 de l'ACP afférente aux données issues des couches 0-20 cm des sols de Bouaflé est corrélé positivement au ratio potassium/somme des bases échangeables (K/S), puis aux sols des parcelles malades de Guéssanfla (Guess-M) et de Krayaokro (Kraya-M). Cet axe et les sols précités sont négativement corrélés au phosphore échangeable (P) (Figure 23.A). L'axe 2 est corrélé positivement à la CEC, à l'azote total (N), et dans une moindre mesure à la somme des bases échangeables (S), au calcium échangeable (Ca), au carbone organique (C) et à l'argile (Figure 23.A). Cet axe est par ailleurs corrélé positivement et négativement, dans cet ordre, au sol en parcelle saine de Krayaokro (Kraya-S) et au sol en parcelle malade de Simporéfla (Figure 23.B).

L'axe 1 pour l'ACP réalisée à partir des données issues des couches 20-40 cm des sols de Bouaflé est positivement corrélé au potassium (K), au ratio potassium/somme des bases échangeables (K/S) (Figure 23.C) ainsi qu'au sol de la parcelle saine de Guéssanfla (Guess-S) (Figure 23.D). À contrario, cet axe et ce dernier sol sont corrélés négativement au magnésium (Mg) (Figure 23.C). Les variables constituées par le calcium (Ca), la charge en éléments grossiers (EG), le ratio calcium/somme (Ca/S) et la CEC y compris les sols en parcelles saines de Krayaokro sont corrélés positivement à l'axe 2, qui est aussi négativement corrélé au ratio magnésium/somme (Mg/S) et au sol de la parcelle malade de Simporéfla (Simpo-M) (Figure 23 D).

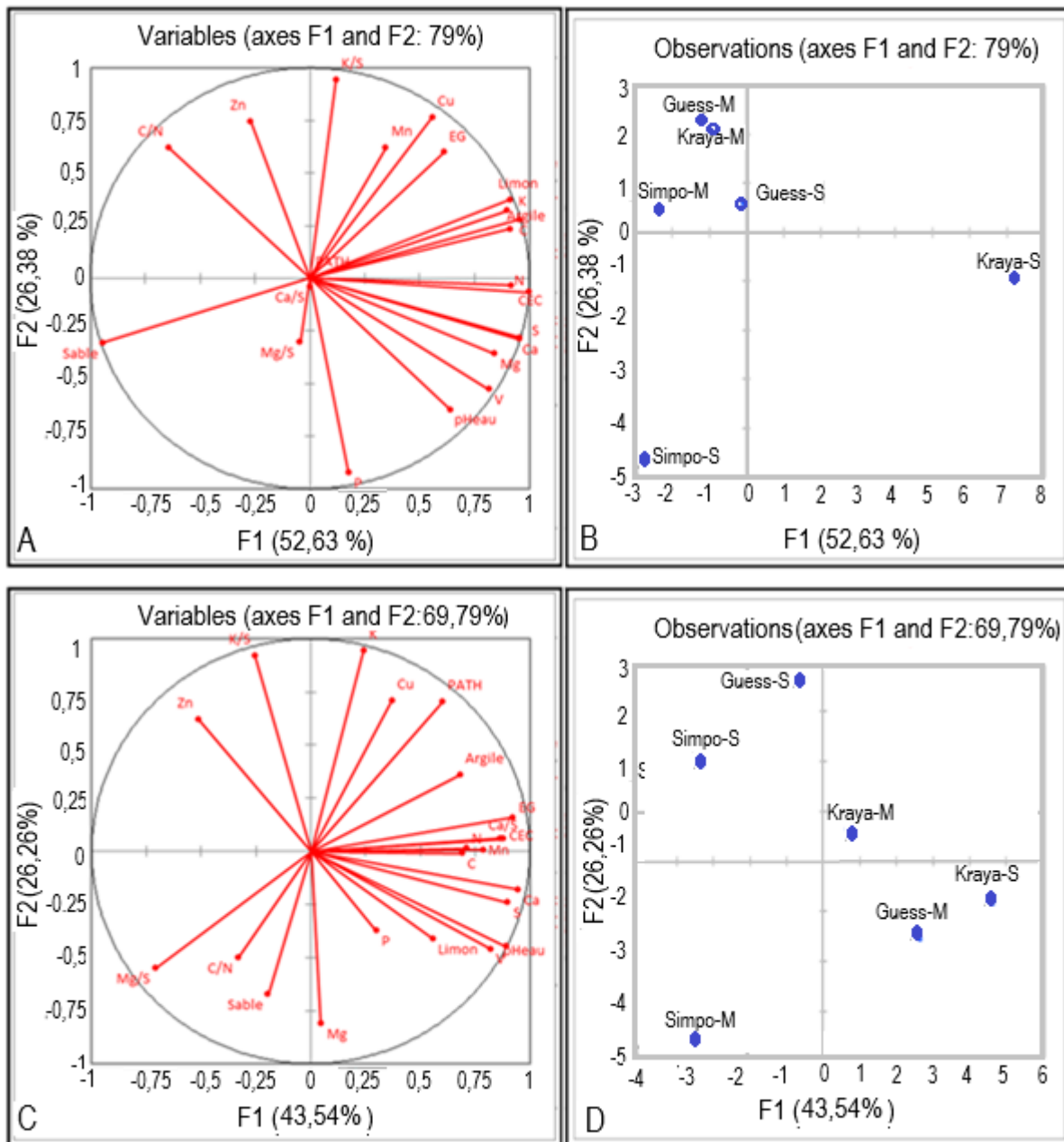


Figure 23 : Nuages des variables et des sols explorés à Bouaflé

- A : Nuage des variables de la couche 0-20 cm ; B : Nuage des sols de la couche 0-20 cm ;
- C : Nuage des variables de la couche 20-40 cm ; D : Nuage des sols de la couche 20-40 cm.
- PATH : Profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie ;
- EG : Taux d'éléments grossiers du sol ;
- Guess-M : Sol en parcelles malades à Guessanfla ; Guess-S : Sol en parcelles saines à Guessanfla ;
- Kraya-M : Sol en parcelles malades à Krayaokro ; Kraya-S : Sol en parcelles saines à Krayaokro ;
- Simpo-M : Sol en parcelles malades à Simporéfla ; Simpo-S : Sol en parcelles saines à Simporéfla

À Kononfla une analyse similaire réalisée dans la couche 0-20 cm montre que l'axe 1 affiche une corrélation positive avec le potassium (K), la CEC (Figure 24 A) et les sols en parcelles malades de Koumoudji (Koumo-M) (Figure 24.B), puis dans une moindre mesure, avec la charge en éléments grossiers (EG) et le ratio magnésium/somme (Mg/S) (Figure 24.A). Cet axe est négativement corrélé au ratio Ca/S, au taux de saturation en base (V), au taux de phosphore (P) puis aux sols en parcelles saines et malades de Kayéta (Kaye-S ; Kaye-M) (Figure 24.B). L'axe 2 est quant à lui corrélé positivement à la somme des bases échangeable (S), au carbone, au calcium, au magnésium (Mg) (Figure 24.A) ainsi qu'au sol en parcelle malade de Kayéta (Kaye-M) (Figure 24.B). Cet axe avec ce dernier sol sont négativement corrélés à l'argile, au  $pH_{eau}$  et dans une moindre mesure au limon. Une corrélation négative s'observe également avec les sols en parcelles saines de Kayéta (Kaye-S) (Figure 24.B).

Dans la couche 20-40 cm, ce sont le magnésium, le taux de saturation en base et le potassium qui sont positivement corrélés à l'axe 1 (Figure 24.C). Il en est de même avec le sol en parcelle saine de Diénembroufla (Diéne-S) (Figure 24.D). Cet axe affiche une corrélation négative avec la CEC, le phosphore (Figure 24.C), puis avec les sols en parcelles malades et saines, respectivement à Kayéta et Koumoudji (Kaye-M et Koumo-S) (Figure 24.D). L'axe 2 est positivement corrélé au manganèse, au calcium, au carbone (Figure 24.C) ainsi qu'au sol en parcelle malade de Koumoudji (Koumo-M) (Figure 24 D). Une corrélation négative de cet axe s'observe avec le limon, le ratio magnésium/somme (Mg/S) et l'argile (Figure 24.C), puis avec le sol en parcelles malades de Diénembroufla (Diéne-M) (Figure 24.D).

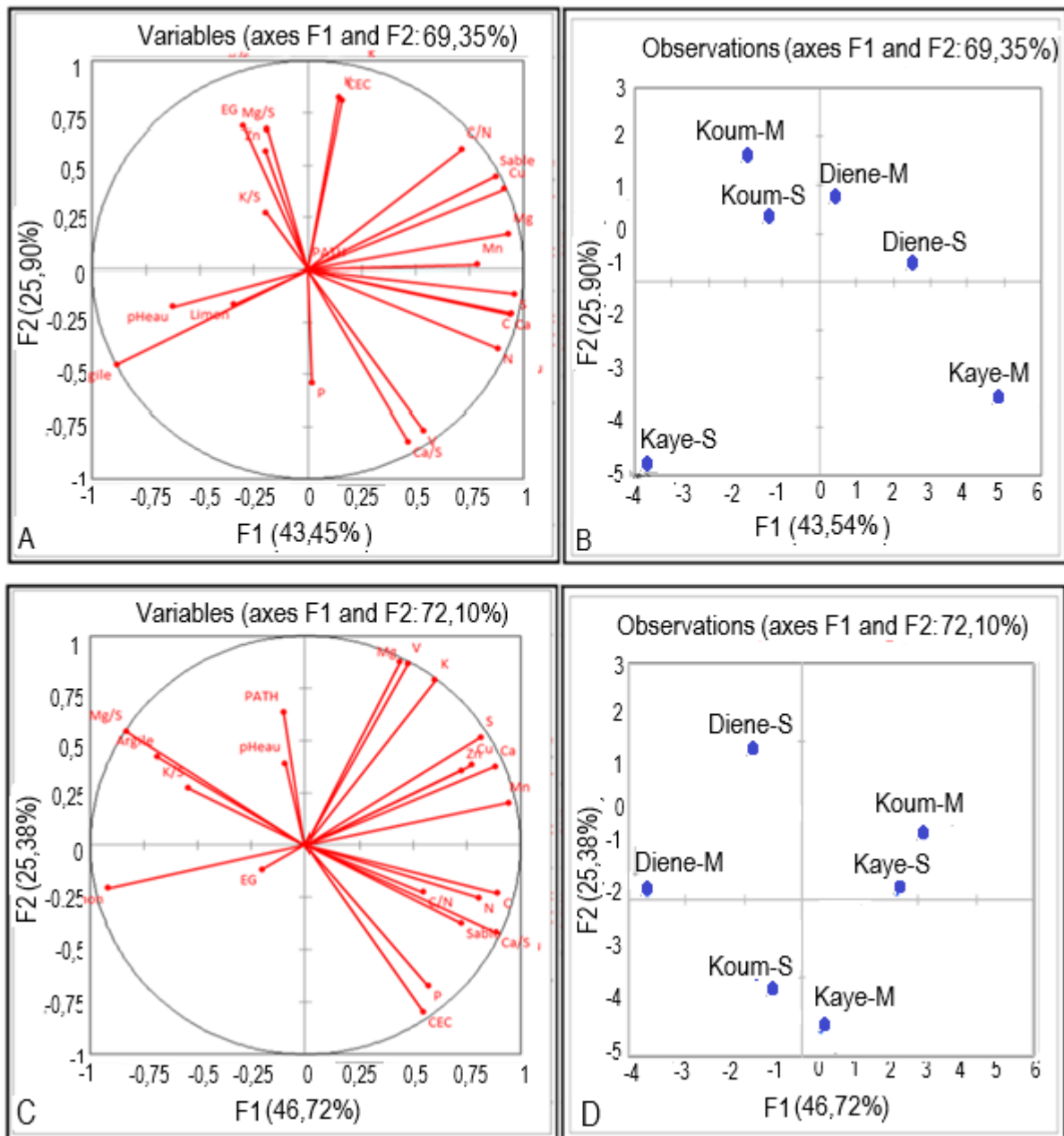


Figure 24 : Nuages des variables et des sols explorés à Kononfla

- A : Nuage des variables de la couche 0-20 cm ; B : Nuage des sols de la couche 0-20 cm ;
- C : Nuage des variables de la couche 20-40 cm ; B : Nuage des sols de la couche 20-40 cm.
- PATH : Profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie ;
- EG : Taux d'éléments grossiers du sol ;
- Diene-M : Sol en parcelles malades à Diénembroufla ; Diene-S : Sol en parcelles saines à Diénembroufla ;
- Kaye-M : Sol en parcelles malades à Kayéta ; Kaye-S : Sol en parcelles saines à Kayeta ;
- Koumo-M : Sol en parcelles malades à Koumoudji ; Koumo-S : Sol en parcelles saines à Koumoudji.

### III.1.5.2. Facteurs édaphiques liés à la présence du swollen shoot dans les parcelles

La projection des sols (individus) et leurs variables sur les plans factoriels (1x2) met en évidence, parmi ces variables, celles qui sont corrélées aux sols des parcelles saines d'une part et aux sols des parcelles infectées d'autre part. Les sols sont représentés sur les plans par des points bleus et les variables par des points rouges (Figures 25 et 26).

À Bouaflé, des taux croissants de Zn dans les couches 0-20 cm des sols sont caractéristiques des parcelles infectées, notamment à Krayaokro (Kraya-M) et Guessanfla (Guess-M) (Figure 25 A). Au contraire, lorsque les sols sont bien pourvus en P à Simporéfla (Simpo-S) ou en N et Ca avec des valeurs élevées de CEC et de S à Krayaokro (Kraya-S), les cacaoyères sont maintenues en bonne santé. La présence de la maladie à Simporéfla (Simpo-M) ou son absence à Guessanfla (Guess-S) ne peuvent être analysées avec confiance vu que les sols sont situés près du centre du mapping de l'ACP. Dans les couches 20-40 cm des sols (Figure 25 B), un taux élevé de limon semble expliquer la présence de la maladie dans les cacaoyères de Guessanfla (Guess-M), alors que le taux de saturation en bases y est élevé. C'est le cas aussi à Simporéfla (Simpo-M) lorsque le sol a un taux élevé en sable et un ratio C/N élevé. Par ailleurs, lorsque la somme des bases échangeables (S) est importante dans la couche 20-40 cm des sols, tout comme le taux de Ca, la maladie ne se développe pas à Krayaokro (Kraya-S). Un ratio K/S élevé et un taux de Zn élevé également produisent le même effet, respectivement à Guessanfla (Guess-S) et à Simporéfla (Simpo-S).

À Kononfla, le taux élevé d'éléments grossiers dans la couche 0-20 cm est la seule condition édaphique d'apparition de la maladie dans les cacaoyères la mieux exprimée (Figure 26.A).

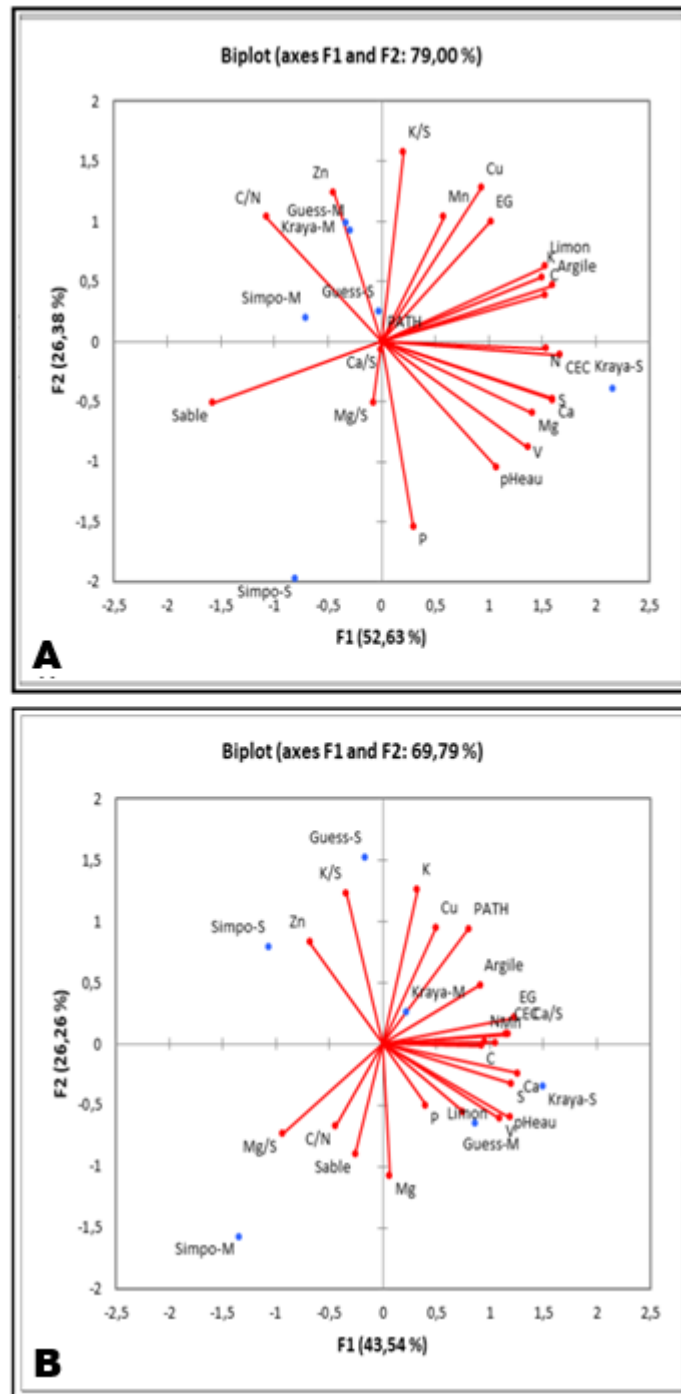


Figure 25 : Projections des variables et des individus de Bouaflé sur le plan factoriel (1x2)

A : Cas des couches 0-20 cm ; B : Cas des couches 20-40 cm.

- PATH : Profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie ;
- EG : Taux d'éléments grossiers du sol ;
- Guess-M : Sol en parcelles malades à Guessanfla ; Guess-S : Sol en parcelles saines à Guessanfla ;
- Kraya-M : Sol en parcelles malades à Krayaokro ; Kraya-S : Sol en parcelles saines à Krayaokro ;
- Simpo-M : Sol en parcelles malades à Simporéfla ; Simpo-S : Sol en parcelles saines à Simporéfla.

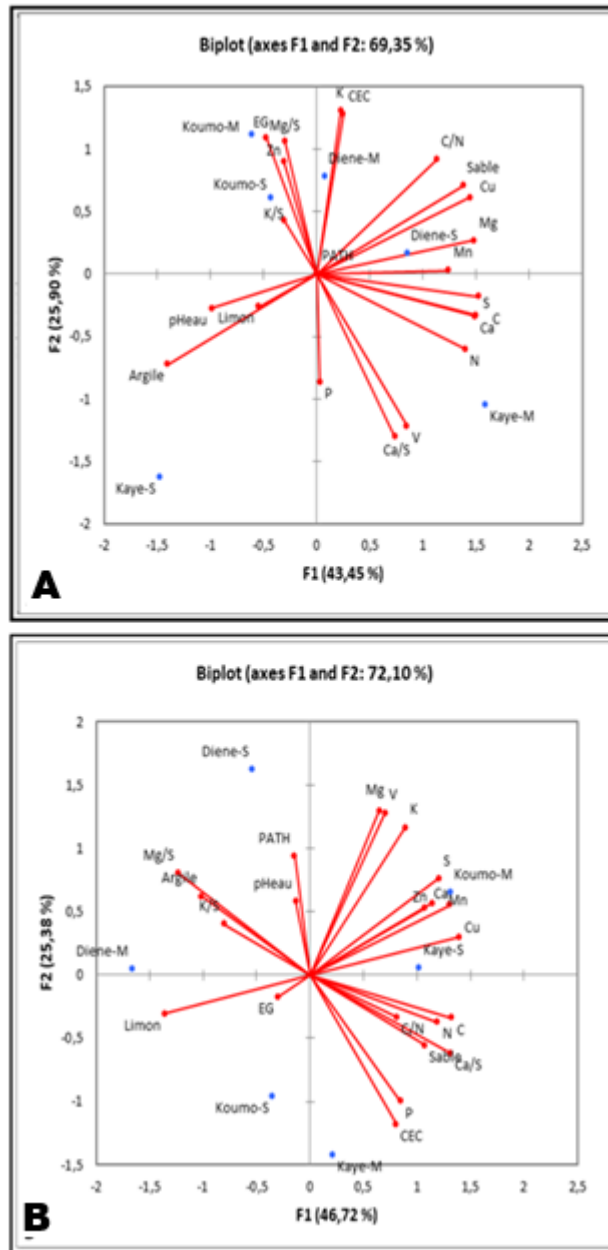


Figure 26 : Projections des variables et des individus de Kononfla sur le plan factoriel (1x2)

A : Cas des couches 0-20 cm ; B : Cas des couches 20-40 cm ;

- *PATH* : Profondeur d'apparition du toit de l'hydromorphie ;
- *EG* : Taux d'éléments grossiers du sol ;
- *Diene-M* : Sol en parcelles malades à Diénembroufla ; *Diene-S* : Sol en parcelles saines à Diénembroufla ;
- *Kaye-M* : Sol en parcelles malades à Kayéta ; *Kaye-S* : Sol en parcelles saines à Kayeta ;
- *Koumo-M* : Sol en parcelles malades à Koumoudji ; *Koumo-S* : Sol en parcelles saines à Koumoudji.

Les autres sols en parcelles saines ou en parcelles malades ne sont, soit pas bien représentés sur le mapping (Koumo-S, Diene-M et Diene-S), soit pas bien corrélés avec les variables des sols (Kaye-S et Kaye-M). Pour ces mêmes raisons, les seules conditions édaphiques d'apparition de la maladie pour les couches 20-40 cm se résument en des taux élevés de limon (Diene-M), de Mn et de Zn (Koumo-M). Cela se fait en dépit de la tendance de cette partie du sol à renfermer des teneurs optimales de Ca, couplée à une somme importante de bases échangeables (S) (Figure 26 B).

Au regard de l'ensemble des résultats relatifs aux ACP, on retient que quand le sol est caractérisé, entre 0 et 40 cm de profondeur, par des taux relativement élevés de P, N et Ca, avec une CEC et une somme des cations échangeables élevées, puis avec un ratio K/S élevé également, le swollen shoot est inexistant dans les cacaoyères. Un constat contraire est fait lorsque le Zn s'accumule vers la surface du sol (entre 0 et 20 cm) pendant que plus en profondeur (20 à 40 cm), ce sont les limons ou les sables qui s'accumulent, avec un ratio C/N élevé ( $\geq 13$ ). Lorsque le Zn est présent abondamment en surface (entre 0 et 20 cm), la maladie est présente sur les sites de Bouaflé ; au contraire, quand c'est la couche 20-40 cm qui est très fournie en cet élément, la maladie ne se déclare pas. À Kononfla, la présence de la maladie dans les cacaoyères s'explique par des teneurs élevées en éléments grossiers dans les couches 0-20 cm, de même qu'un taux élevé de limon, de Mn et de Zn dans les couches 20-40 cm des sols.

### III.2. DISCUSSION

#### III.2.1. Implication des plantes d'ombrage et plantes adventices hôtes dans la prolifération du virus du swollen shoot du cacaoyer

L'étude a montré que les parcelles malades abritent en général deux à quatre fois plus de plantes d'ombrages hôtes et beaucoup plus d'adventices que les parcelles saines. Il est ressorti, de ces densités d'arbres, une probable implication significative de ces plantes d'ombrage et plantes adventices dans la prolifération du virus du swollen shoot dans la zone, notamment à Kayéta et Koumoudji.

Si selon Aka (2013) certaines plantes d'ombrage comme *Cola clamydantha* étaient à l'origine du swollen shoot dans les cacaoyères ouest africaines, la gamme de plantes hôtes du virus et leur rôle dans l'expansion du CSSV sont encore mal connus. Cet auteur qui a travaillé sur l'identification des hôtes alternatifs du virus du swollen shoot du cacaoyer basées sur l'utilisation d'outils moléculaires (PCR), a mis en cause de nombreuses espèces, dont plusieurs sont des plantes d'ombrage associés habituellement au cacaoyer. Quelques-unes de ces plantes ont été effectivement recensées dans les parcelles d'étude. Ce sont notamment, *Cola nitida*, *Cola gigantea* (Sterculiaceae), *Pterygota macrocarpa* (Sterculiaceae), *Theobroma bicolor*, *Sterculia tragacantha*, *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), *Carica papaya*, *Citrus sinensis* et *Milicia excelsa*. Les adventices observées comme *Chromolaena odorata* (Asteraceae) et *Tapinanthus bangwensis* (Loranthaceae), ont été signalés par Aka (2013).

Ces résultats mettent en évidence un nombre très réduit d'adventices hôtes du virus relativement à celui des plantes d'ombrage hôtes. Du coup, certaines espèces d'arbres qui sont laissées dans les plantations pour le bénéfice que leur ombrage offre au cacaoyer, apparaissent comme des facteurs clés qui contribuent au développement et à la propagation des symptômes du CSSV dans les cacaoyères. En effet, en cherchant à évaluer l'impact des arbres associés aux cacaoyers sur la présence et la configuration des foyers de la maladie du CSSV dans les cacaoyères dans le département de Fresco, Gandet (2023) avait procédé à un inventaire botanique des arbres d'ombrages à l'intérieur et autour des foyers. Il a, ensuite, effectué une projection au sol de la couronne des arbres. La mesure des densités d'arbres d'ombrage a montré qu'il y avait plus d'arbres autour des foyers que dans les foyers eux-mêmes. Apparemment, en recouvrant le sol, l'ombrage crée un microclimat dans la cacaoyère qui permet de conserver l'humidité du sol indispensable à la nutrition minérale et donc au

bon fonctionnement du cacaoyer (Mollet *et al.*, 2000 ; FIRCA, 2008 ; Adou Yao *et al.*, 2016). Celui-ci reste vigoureux et résilient à plusieurs maladies parmi lesquelles figure la maladie du swollen shoot.

Les arbres associés au cacaoyer pour assurer la durabilité de la culture ne pourront remplir cette fonction pleinement que s'ils sont bien choisis vu que certains de ces arbres abritent naturellement le virus du swollen shoot. Ces derniers peuvent donc constituer des points de départ de la maladie dans les cacaoyères. C'est à ce résultat que cette recherche a aboutit au contraire des travaux de Gandet (2023).

Les adventices étant éliminés en général régulièrement dans les cacaoyères aux cours des processus d'entretien des parcelles, leur rôle est apparu moins prépondérant que celui des arbres hôtes du virus. Ce résultat concourt aussi à penser que les herbicides utilisés pour l'entretien des parcelles ont un effet sur le virus.

### **III.2.2. Propriétés morphologiques des sols et présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères**

Sur la base de leur morphologie, les sols étudiés présentent une grande profondeur couplée à une différenciation en plusieurs horizons, une altération totale des minéraux primaires et un faible développement de la couche humifère. Toutes ces caractéristiques permettent de les assimiler à des Ferralsols. Au sein d'un même type de parcelle à l'échelle locale, ces Ferralsols sont différemment fournis en concrétions ferromanganiques. Les sols les plus chargés sont des Plinthic Ferralsols qu'on retrouve en général dans les parcelles malades. Ces Plinthic Ferralsols présentent souvent à faible profondeur des traces d'hydromorphie, qui font d'eux des Plinthic Ferralsols (Stagnic). Si en plus, les Ferralsols, les Plinthic Ferralsols et les Plinthic Ferralsols (Stagnic) identifiés en parcelles malades en général ont une couche argileuse, comme cela a été observé par endroits, ils sont nommés, dans cet ordre : Ferralsols (Differentic), Plinthic Ferralsols (Differentic) et Ferralsols (Differentic, Stagnic).

Les conditions édaphiques (la structure, la porosité, la texture, la profondeur et l'humidité du sol) au plan de la morphologie des sols étudiés sont en général favorables, au regard des bonnes dispositions à observer en cacaoculture (Mossu, 1991 ; Koko, 2014 ; CNRA, 2015). Cependant, leur grande profondeur est contrariée dans les parcelles infectées par une faible profondeur d'apparition, non seulement, du toit de l'humidité (PATH) (cas des sols de

Kayéta), mais aussi, de celui des horizons très fournis en éléments grossiers (cas des sols de Guessanfla).

La présence d'un horizon d'hydromorphie temporaire à faible profondeur constitue un obstacle qui gêne l'enracinement des plantes sensibles à l'excès d'eau comme le cacaoyer. Elle survient quand les horizons profonds sont argileux ou présentent des structures continues (compaction du sol). Dans ce cas, les eaux de pluies ne s'évacuent que très lentement et stagnent dans les couches supérieures du sol, y créant un excès d'eau. Cet excès d'eau constitue un obstacle à l'enracinement de nombreuses cultures à cause des conditions d'hypoxie engendrées dans le sol (Concaret, 1981). L'accumulation des argiles observée dans les couches 20-40 cm de certains sols en parcelles malades, avec des taux atteignant par endroits 50 pc, peut certes créer un mauvais drainage de l'eau, mais aussi, permettre au sol de fixer des cations au profit des cacaoyers. C'est ce rôle qui est mis en évidence par la corrélation positive affichée par l'ACP entre l'argile et les couches 20-40 cm des sols des parcelles saines. Les limons, apparus quant à eux corrélés positivement à l'apparition de la maladie, seraient effectivement impliqués dans l'hydromorphysation temporaire des couches 20-40 cm du sol. À propos des conditions d'hypoxie qui en découlent, Forestier (1964) pense qu'elles peuvent engendrer des troubles physiologiques chez les plantes, notamment une carence en potassium associée à une absorption à doses toxiques de magnésium et de sodium. L'expansion du swollen shoot dans les cacaoyères étudiées peut s'expliquer par ces troubles dans les sols de culture constituant des facteurs aggravants, puisque les conditions d'apparition de ces troubles, telles que décrites, ont plus ou moins été observées dans les sols des parcelles infectées.

Les fortes charges d'éléments grossiers constitués de gravats ou de concrétions ferromanganiques qui apparaissent en général dans les Ferralsols, comme ce fut le cas par endroits dans la présente étude, traduit le remaniement du sol. Selon Schwartz & Lanfranchi (1990), ce remaniement provient en général du transport latéral de matériaux par colluvionnement, ablation, apports éoliens, perturbations d'origine anthropique et brassage biologique. Ces éléments grossiers favorisent l'aération du sol ainsi que les capacités d'infiltration du sol. Leurs effets sur la fertilité agronomique est toutefois défavorable. Il s'agit, notamment, de la réduction de la réserve en eau du sol, de l'usure des outils de travail du sol et de la favorisation du lessivage des éléments nutritifs du sol (Delaunois, 2013). La présence de fortes charges d'éléments grossiers dans le sol peut être, par ailleurs, un facteur rédhibitoire pour la pénétration des racines dans le sol (Boyer, 1982). Un certain nombre

d'observations convergent sur ce point précis. Ces études permettent de fixer vers 50 pc par rapport au poids du sol, soit à environ 75 pc par rapport à son volume, la limite à partir de laquelle les racines rencontrent de très grandes difficultés à pénétrer le sol et à s'y développer (Boyer, 1982).

Les éléments grossiers et l'hydromorphie de faible profondeur dont les effets de perturbation de la nutrition minérale et hydrique du cacaoyer ont été démontrés dans la présente recherche, rendant la plante potentiellement vulnérable vis à vis du swollen shoot, avaient été déjà cités de façon récurrente comme les principales conditions dégradantes en cacaoculture en Côte d'Ivoire (Yoro, 2004 ; Koko *et al.*, 2006 ; Kacou, 2023).

### III.2.3. Propriétés chimiques des sols et présence de la maladie du swollen shoot du cacaoyer

#### ❖ pH<sub>eau</sub>

Les sols en parcelles infectées, surtout à Bouaflé, ont affiché globalement une réaction proche de la neutralité (pH = 6,5-7,5). Selon Thomas (2010), cette gamme de pH du sol est idéale, car la plupart des nutriments végétaux y sont disponibles de façon optimale pour les plantes. Beaucoup d'études ont aussi montré que cette plage de pH est aussi la plus favorable à la cacaoculture (Smith, 1980 ; Appiah *et al.*, 2006 ; Tossah *et al.*, 2006). À l'opposé, les sols en parcelles saines sont apparus peu acides (pH = 5,6-6,5), comme pour dire qu'un pH peu acide des sols ne constitue pas une contrainte pour le cacaoyer. Ce constat rejoint les résultats obtenus par de nombreux auteurs comme Appiah *et al.* (2006) et Tossah *et al.* (2006).

Le pH du sol n'est vraisemblablement pas impliqué dans le développement du swollen shoot dans les cacaoyères étudiées, toute chose qui a été matérialisée par l'absence de corrélation pH-Sol révélée par les ACP réalisées.

#### ❖ Azote total, ratio carbone organique/azote total et phosphore échangeable du sol

Les résultats des tests statistiques et des ACP réalisés révèlent que des taux de plus en plus élevés d'azote total (N), de calcium (Ca) et une CEC élevée dans les couches 0-20 cm des sols expliquent l'absence de la maladie dans certaines cacaoyères. Dans d'autres parcelles, cette explication est fournie par des taux élevés de phosphore échangeable (P).

L'azote (N) est important pour soutenir la croissance végétative et assurer des rendements élevés en cacao (Ribeiro *et al.*, 2008). Ainsi, il doit être facilement disponible, mais pas en excès, de la floraison au remplissage des cabosses. De ce fait, l'utilisation des engrais à base

de nitrate est la source privilégiée d'azote pour la cacaoculture, le nitrate étant la source d'azote la plus disponible et assimilable pour les plantes. En absence de fertilisation, comme c'est le cas pour les sols étudiés, le cacaoyer se procure en azote par la minéralisation de l'azote organique apporté par les résidus de cultures ou issu de l'humus du sol. Lors de ce processus, l'azote organique est transformé en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (difficilement assimilable par les plantes), puis en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sous l'effet de l'activité microbienne. La disponibilité de l'azote dans le sol dans le contexte de cette étude dépend fortement du niveau de matière organique ou de carbone organique du sol.

Le cacaoyer a un besoin de sols riches en matière organique, soit des sols renfermant un taux minimum de 3 pc dans les horizons superficiels (Smith, 1980). Ce taux correspond à 1,74 pc de C au minimum. Les taux de C mesurés sur l'ensemble des parcelles, qui avoisinent 1 pc, sont donc faibles. Ces bas taux en carbone organique n'indiquent pas toujours un sol peu ou non fertile chimiquement. En effet, ils traduisent, comme c'est le cas ici, un sol où la vitesse de transformation de la matière organique par les microorganismes est légèrement accélérée du fait du climat chaud et humide de la zone. Le ratio C/N en est l'indicateur. Les valeurs de ce ratio obtenues qui varient entre 10 et 13 pour toutes les parcelles, alors que la fourchette optimale est 10-12, attribuent les bas taux de C observés à une activité microbologique importante dans le sol. Cela explique que les cations du sol, notamment le Ca, mais aussi des anions comme le P, soit libérés régulièrement dans le sol pour assurer la durabilité de la cacaoculture dans les parcelles saines. Une autre conséquence de cette activité microbienne importante est le niveau élevé de la CEC qui semble caractériser les sols en parcelles saines. Cette argumentation peut être utilisée pour expliquer les bons états d'équilibre chimique observés dans une partie des sols des parcelles saines.

### ❖ Équilibres cationiques

Les équilibres ressortis entre les bases échangeables relativement à leur somme se situent à hauteur de 4 pc de K dans toutes les couches, 80 et 70 pc de Ca entre, respectivement, 0-20 et 20-40 cm du sol, puis environ 15 et 25 pc de Mg, dans les couches 0-20 et 20-40 cm. Quels que soient le cas, les taux de saturation en bases échangeables dépassent 60 pc sur toutes les parcelles. En se référant aux seuils énoncés par Mossu (1990) relativement aux équilibres cationiques dans les sols de cacaoculture, les résultats obtenus sont bons en général excepté le ratio K/S qui, étant inférieur à 8 pc dans toutes les couches, quels que soient les sols, est ainsi faible. Un autre déséquilibre cationique caractérise aussi la couche 0-20 cm des sols de Bouaflé. En effet, le ratio Mg/S est y apparu inférieur à 25 pc qui est le seuil minimal

(Mossu, 1990). Entre 20 et 40 cm, les valeurs mesurées sont bonnes quel que soit le type de parcelle.

Les bons niveaux d'équilibre cationique observés trouvant leur explication dans le paragraphe précédent, cette partie de la discussion sera axée sur la carence des sols étudiés en K vu le ratio K/S faible dans toutes les couches, en parcelles saines comme en parcelles malades.

Deux types de déséquilibres nutritionnels sont sources de problèmes sanitaires directs, à savoir, les toxicités et les carences de certains éléments minéraux. Les toxicités correspondent à l'excès d'un ou de plusieurs éléments dans le sol, quand les carences décrivent le contraire.

La carence en K observée dans les sols de toutes les parcelles peut s'expliquer en parcourant la revue de lecture réalisée par Bel (2021) sur les réservoirs de Ca, Mg et K dans les sols et leurs contributions à la biodisponibilité.

Les cations nutritifs Ca, Mg et K ont plusieurs réservoirs dans les sols qui conditionnent leur disponibilité pour les plantes. Quand ils sont stockés dans l'humus du sol, le K est moins retenu dans les matières organiques que le Ca ou le Mg car il ne rentre pas initialement dans la structure des végétaux. Il se trouve alors plus rapidement libéré dans la solution du sol et est ainsi plus sujet au risque de lixiviation, d'où son déficit récurrent dans le sol. Les cations Ca, Mg et K peuvent être aussi stockés dans la biomasse microbienne du sol, surtout le K (Lorenz *et al.*, 2010 ; Kohei *et al.*, 2014; Meena *et al.*, 2014; Van der Heijden *et al.*, 2014 ; Yaghoubi *et al.*, 2019). Il en découle que ses taux sont en général faibles dans le sol, si les microorganismes sont maintenus en vie pendant longtemps, ce qui semble être le cas dans les sols étudiés où une activité microbienne un peu plus que l'optimale a été détectée à travers le ratio C/N. Lorsque les cations Ca, Mg et K sont enfin stockés dans les minéraux du sol, le Ca et le Mg peuvent se retrouver associés à des minéraux amorphes (oxydes d'aluminium et de fer) abondants dans le sol. Le K par contre, malgré son abondance dans la croûte terrestre (7<sup>e</sup> ou 8<sup>e</sup> élément le plus observé selon Wedepohl (1995)), est incorporé à hauteur de 90 à 98 pc dans la structure cristalline des minéraux. Il n'est donc pas disponible directement à la nutrition des plantes, d'où sa carence observée, non seulement dans les sols des parcelles étudiées, mais également, dans l'ensemble des sols des pays tropicaux (Sparks & Huang 1985). Dans les sols tempérés par contre, l'abondance de K et sa présence dans de nombreux minéraux font que ses flux provenant de l'altération minérale est plus importante que ceux de Ca et de Mg dans les sols les écosystèmes forestiers (Legout *et al.* 2020).

### ❖ Oligoéléments

Les 20 ou 25 oligo-éléments présents dans les plantes, ne prennent généralement en compte que 6 ou 7 dont les carences ou les toxicités provoquent des troubles physiologiques bien visibles sur les plantes. Ce sont le fer, le manganèse, le bore, le cuivre, le molybdène, le soufre et le zinc. Parmi ces éléments, seuls le Mn, le Cu et le Zn ont été dosés. C'est le Mn qui a induit une différence significative entre les sols. Les couches 0-20 cm des sols en parcelles infectées en sont plus fournies, atteignant parfois des teneurs de 300 mg/kg. Même si ces teneurs ne sont pas excessives au regard du seuil tolérable situé à 1000 mg/kg, le Mn est par conséquent rendu plus disponible pour le cacaoyer dans un sol ayant une faible teneur en matière organique (Fageria *et al.*, 2002). Cette partie des sols serait donc confrontée à un problème de toxicité du Mn qui, pourtant, a pour rôle de participer à la production d'oxygène moléculaire lors de la photosynthèse, à l'élongation des racines et à la synthèse des membranes et des substances de défense de la plante (Mench & Baize, 2004). Ce sont donc des fonctions essentielles du cacaoyer, notamment la fonction de défense contre les pathologies qui serait affectée, faisant que le swollen shoot s'est installé dans les cacaoyères.

La toxicité des oligoéléments est en général due à la réaction acide des sols. Les éléments nutritifs majeurs, notamment le phosphore (P), deviennent moins utilisables par la plante tandis que les oligo-éléments tels le fer (Fe), le manganèse (Mn), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) peuvent atteindre parfois des niveaux très élevés dans le sol (Parent & Rivest, 2003). Cette raison ne saurait justifier la toxicité du Mn dans les sols étudiés puisque ces sols ont affiché globalement une réaction proche de la neutralité. Des procédés géologiques et géochimiques seraient impliqués, compte tenu des concentrations importantes de concrétions ferromanganiques observées dans les sols à divers endroits des parcelles infectées.

## *CONCLUSION ET PERSPECTIVES*

La présente recherche réalisée dans la région de la Marahoué, l'une des principales zones endémiques du swollen shoot, vient explorer la voie édaphique dans la recherche de solution contre cette maladie qui est en passe de décimer toute l'économie cacaoyère en Côte d'Ivoire. Son intérêt réside dans le fait que le sol, support naturel du cacaoyer, n'a fait que très rarement objet d'étude portant sur la thématique du swollen shoot du cacaoyer en Côte d'Ivoire.

Une enquête floristique préliminaire réalisée a révélé une plus forte concentration dans les parcelles malades des plantes d'ombrage reconnues comme hôtes du virus responsable de la maladie.

L'étude pédologique a montré que les sols des deux zones d'étude sont en général des Ferralsols (Eutric). Sur les sites de Bouaflé, lorsque ces sols sont caractérisés entre 0 et 40 cm de profondeur par des taux relativement élevés de P, N et Ca, couplée à une CEC et une somme des cations échangeables élevées, puis à un ratio K/S élevé également, le swollen shoot est inexistant dans les cacaoyères. Par contre, avec un ratio C/N relativement élevé ( $\geq 13$ ) dans les sols, couplé à accumulation du zinc vers la surface (entre 0 et 20 cm), mais aussi une accumulation des limons ou des sables entre 20 et 40 cm, la maladie se déclare. À Kononfla, la présence de la maladie dans les cacaoyères est avérée liée à des teneurs élevées d'éléments grossiers dans les couches 0-20 cm des sols, puis de limon, de Mn et de Zn dans les couches 20-40 cm des sols.

L'étude aura montré que la compaction du sol à faible profondeur par les limons et une charge élevée de cette partie du sol en éléments grossiers sont corrélées positivement à la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères. Ces conditions constituent en général des obstacles mécaniques à la bonne évolution des racines des cultures dans le sol. L'accumulation du sable dans cette partie des sols n'est certes pas un obstacle physique pour les racines, mais elle favorise une lixiviation des éléments nutritifs qui aboutit à l'appauvrissement des sols, suivi par l'installation de la maladie dans les cacaoyères. La première hypothèse de l'étude insinuant une relation entre les mauvaises propriétés morphologiques du sol et le swollen shoot du cacaoyer se trouve ainsi vérifiée.

D'autre part, les résultats qui ont montré que les sols en parcelles saines ont eu des états d'équilibre cationique plus intéressants (somme des bases, taux de saturation en bases et ratio K/S notamment) ont permis de vérifier la deuxième hypothèse qui stipule que des déséquilibres entre les minéraux du sol favorisent la présence de la maladie du swollen shoot

chez le cacaoyer. La vérification des deux premières hypothèses infirme la troisième ou dernière hypothèse énonçant qu'aucune corrélation n'existe entre la qualité du sol et la maladie du swollen shoot.

Les contraintes agronomiques affichées par les sols en parcelles infectées et les bonnes dispositions présentées par les sols en parcelles saines ont conduit à poser un diagnostic clair et précis de la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères. La maladie se déclare lorsque les conditions de nutrition minérale et hydrique dans le sol sont dégradées ou lorsque ces conditions ne sont pas bonnes initialement du fait des mauvaises propriétés du sol. La plante ne pouvant alors se nourrir correctement, est affaiblie et rendue vulnérable par le swollen shoot.

La lutte plus efficace contre cette pathologie pourrait être basée sur une gestion durable de la fertilité du sol, notamment, la pratique de l'agroforesterie sélective et l'apport de fertilisants (chimique, organique ou biologique) au sol.

Les facteurs édaphiques impliqués dans la propagation de la maladie semblent être différents d'une zone à une autre. Ils ont été constitués essentiellement par des facteurs morphologiques à Kononfla et facteurs chimiques à Bouaflé. Les niveaux d'impacts de ces facteurs dans le sol ont été également différents car ils ont varié entre 0-20 ou 20-40. Les présents travaux n'ont à *priori* pas pu cerner tous les aspects de la présence de la maladie du swollen shoot du cacaoyer liés au sol de culture. Cette étude devra donc être approfondie par des recherches complémentaires qui consisteraient à :

- inventorier les micro-organismes du sol impliqués et déterminer leurs rôles dans la prévalence de la maladie ;
- étendre l'étude à d'autres zones endémiques pour une confirmation ou une précision des conclusions ressorties de la présente étude ;
- valoriser cette recherche en améliorant la résistance des cacaoyers au swollen shoot par la mise au point d'une fertilisation organo-minérale basée sur la compensation des déficits nutritionnels mis en cause, et intégrant une biofertilisation microbienne.

## *REFERENCES*

- Adou Y. C. Y., Kpangui K. B., Vroh B. T. A. & Ouattara D. (2016). Pratiques culturelles, valeurs d'usage et perception des planteurs des espèces compagnes du cacaoyer dans des agroforêts traditionnelles au centre de la Côte d'Ivoire. *Revue d'ethnoécologie*, 9 : 1-17.
- Adu-Ampomah Y., Ollenu L. A. A. & Adomako B. (2003). Source of resistance / tolerance to the cocoa swollen shoot virus disease. Communication à la 14<sup>ème</sup> Conférence internationale sur la recherche cacaoyère. Accra, Ghana, 2003, 12 p.
- Adu-Ampomah Y., Owusu G. K. & Ollenu L. A. A. (1994). Mutation breeding and tissue culture techniques in cocoa. Report of the Cocoa Research Institute of Ghana 1991/1992, pp 55-57.
- Aka R. (2013). Hôtes alternatifs du virus du swollen shoot du cacaoyer. Atelier International d'échange sur la maladie du swollen shoot du cacaoyer, tenu du 26 au 28 Novembre 2013, Grand Bassam, Côte d'Ivoire, 24 p.
- Aka R., Walet P. N., Kouassi R. A., 2020, Cocoa Swollen shoot Disease in Côte d'Ivoire : History of Expansion, from 2008 to 2016. *International Journal of Sciences*, 9 :51-60.
- Aké-Assi L. (1984). Flore de la Côte d'Ivoire : Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale (Abidjan, Côte d'Ivoire), 665 p.
- Aké-Assi L. (2002). Flore de la Côte d'Ivoire : Catalogue, Systématique, biogéographie et écologie, Mémoire de Botanique systématique. *Boissiera*, 58 : 154-170.
- Alibert H. (1946). Note préliminaire sur une nouvelle maladie du cacaoyer le « swollen shoot ». *Agronomie Tropicale*, Paris (France), v1, pp 34-43.
- Alverson W. S., Whitlock B. A., Nyffeler R., Bayer C. & Baum D. A. (1999). Phylogeny of the core Malvales: evidence from sequence data. *American Journal of Botany*, 86 : 1474-486.
- Anonyme (2009). Projet de lutte contre le swollen shoot en Côte d'Ivoire. Présentation des résultats du diagnostic des foyers du swollen shoot, Abidjan, Côte d'Ivoire, 26 p.

- Anthony F., Nsiah F. E., Ampofo S. T. & Owusu G.K. (2003). Control of cocoa swollen shoot disease in a “cordon sanitaire” separating the area of heavy infection in Ghana from the rest of the country. *In: Proceeding of the 4th INCOPED, Accra, Ghana*, pp 12- 15.
- Appiah M. R., Ofori-Frimpong K., Afrifa A. A., Abekoe M. K. & Snoeck. D. (2006). Improvement of soil fertility management in cocoa plantations in Ghana. Regional Cocoa scientific and technical final report, Cocoa Research Institute of Ghana, Ghana, 22 p.
- Argout X., Martin G., Droc G., Labadie K., Rivals E. & Aury J. M. (2017). The cocoa criollo genome v2.0: an improved version of the genome for genetic and functional genomic studies. *BMC Genomics*, 18:730
- Argout X. (2017). Le génome du cacaoyer : du décodage de sa séquence jusqu'à l'étude de gènes impliqués dans des caractères agronomiques d'intérêt. Montpellier. Thèse de Doctorat : Biologie, interactions, diversité adaptative des plantes : Montpellier SupAgro, Université de Montpellier (Montpellier, France), 238 p.
- Aubert G. & Moulinier H. (1954). Observations sur quelques caractères des sols de cacaoyères en Côte d'Ivoire. *Agronomie Tropicale*, 9(4) : 428-437.
- Aubert B. (1992). Citrus greening disease, a serious limiting factor for citriculture in Asia and Africa. *Proceedings of the International Society of Citriculture*, 2 : 817-820.
- Assiri A.A., Adiko A. & Konan A. (2006). La replantation cacaoyère par des techniques agroforestières en Côte d'Ivoire. Communication à la 15<sup>ème</sup> conférence internationale sur les recherches cacaoyères, 9-10 Octobre 2006, San José, Costa Rica, pp 387-394.
- Assiri A. A., Yoro G. R., Deheuvelds O., Kébé B., Kéli Z. J. & 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.
- Aubert G. & Segalen P. (1966). Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cahiers ORSTOM-Pédologie*, 4(4) : 97-112.
- Avenard J.M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.L., Adjanohoun E. & Perraud A. (1971). Le milieu naturel de la Côte D'ivoire. Mémoire O.R.S.T.O.M., Paris, France, 401 p.

- Baccini A. (2010). Statistique Descriptive Multidimensionnelle (pour les nuls) (version de mai 2010). Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse, Université Paul Sabatier, Toulouse (France), 33 p.
- Baize D. (2022). L'importance des horizons profonds des sols. Planet-vie, ressources en science de la vie pour les enseignants et enseignantes. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie> [consulté le 20 avril 2024].
- BCEAO (2014). Etude monographique sur la filière cacao dans l'UEMOA. Rapport d'étude, Dakar, Sénégal, 33 p.
- Bel J. (2021). Biodisponibilité du calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers – Quantification, traçage et caractérisation des sources biodisponibles par dilution isotopique stable ( $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{26}\text{Mg}$  et  $^{41}\text{K}$ ). Thèse de doctorat, Université de Lorraine (France), 272 p.
- Beliard E. (2003). Maladies et ravageurs de la laitue et de la chicorée à salade en AB. TECHN'ITAB, maraîchage, Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), Fédération Régionale de Défense contre les Ennemis des Cultures, 6 p.
- Berner A. (2013). Les principes de la fertilité des sols. Bio Suisse, construire sa relation avec le sol. [www.shop.fibl.org](http://www.shop.fibl.org) [consulté le 20 septembre 2025]
- Bittelli M., Campbell G. S. & Flury M. (1999). Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. *Soil Science Society of American Journal*, 63(4): 782-788.
- Box H. E. (1945). Insect transmission of the swollen shoot virus in West Africa. *Nature*, 155 : 608-609.
- Boyer J. (1970). Influence des régimes hydrique, radiatif et thermique du climat sur l'activité végétative et la floraison de cacaoyers cultivés au Cameroun, 14 : 189-200.
- Boyer J. (1982). Facteurs de Fertilité et utilisation des sols. *In* : Les sols ferrallitiques. Tome X. Initiations-documentations techniques, ORSTOM, 52, Paris (France), pp 274-302.
- Braudeau J. (1969). Le cacaoyer. Techniques Agricoles et Productions Tropicales. Maisonneuve et Larose, Paris (France), pp 438-439.

- Brou Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université des Sciences et Technologies de Lille, 212 p.
- Brunt A. A., Kenten R. H. & Nixon H. L. (1964). Some properties of cocoa swollen shoot virus. *Journal of general Microbiology*, 36: 303-309.
- Bronick C.J. & Lal R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124 : 3-22.
- Calvet J. (2003). Le sol : propriétés et fonctions, contribution et structure, phénomènes aux interfaces (tome 1), Edition France agricole, 88 p.
- Ceja L. F., Mora G., Téliz D., Mora A., Sánchez P. M. C., Tlapal B. & De La Torre., R. (2008). Ocurrencia de hongos y etiología de la secadera de la fresa con diferentes sistemas de manejo agronómico. *Agociencia*, 42 : 451-461.
- Chesworth W. (2008). Encyclopedia of soil science. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 860 p.
- CIRAD (2020). Mesure de soutien aux projets agricoles et agro-alimentaires innovants, Programme de développement rural et régional de la Guyane 2014-2020, Guyane (France), 112 p.
- Clement D., Risterucci A. M., Motamayor J. C., N'goran J. & Lanaud C. (2003). Mapping quantitative trait loci for bean traits and ovule number. *In : Theobroma cacao L. Genome*, 46 : 103-111.
- Concuret J. (1981). Drainage agricole : Théorie et pratique. Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, Dijon (France), 509 p.
- Cotterell G. S. (1943). Swollen shoot virus. Reports of the Central Cacao Research Station Tafo, 1940, 42 : 51-55.
- Cousin R. (1997). Peas (*Pisum sativum* L.). *Field Crops Research*, 53 : 111-130.

- CNRA (2009). Acquis des projets antérieurs de lutte contre le swollen-shoot en Côte-d'Ivoire : distribution du swollen-shoot en 2009. Manuel technique, Centre National de Recherche Agronomique, Côte d'Ivoire, 18 p.
- CNRA (2015). Manuel technique de cacaoculture durable. A l'attention du technicien. Centre National de Recherche Agronomique, Côte d'Ivoire, 166 p.
- CNRA (2016). Bien lutter contre la maladie du swollen-shoot du cacaoyer en Côte-d'Ivoire. Fiche technique, Côte d'Ivoire, 4 p.
- Dabin B. (1970). Les facteurs chimiques de la fertilité des sols (bases échangeables, sels, utilisation des échelles de fertilité). *In* : Ségalen Pierre, Dabin Bernard, Maignien Roger, Combeau André, Bachelier Georges, Schmid Maurice, Bosser Jean, Guinard M., Verdier P. Pédologie et développement. ORSTOM, Paris, France, pp 221-237.
- 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, Université de Montpellier (France), 185 p.
- Delaunoy A. (2013). Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols. Document technique, Chambre d'agriculture du Tarn et INRA de Montpellier, France, 39 p.
- Demol J. (2002). L'amélioration des plantes. Application aux principales espèces cultivées en régions tropicales. Editions Presses Agronomiques Gembloux, Gembloux (Belgique), 581 p.
- Demolon A. (1949). La génétique des sols, Paris, PUF, 126 p.
- Dexter A. R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11 : 199-238.
- Diack M. & Loum M. (2014). Caractérisation par approche géostatistique de la variabilité des propriétés du sol de la ferme agropastorale de l'Université Gaston Berger (UGB) de Saint-Louis, dans le bas delta du fleuve Sénégal. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, 12 : 1-15.
- Dogbé S. Y., Békou K., Mississo E., Wégbé K., Bassimbako K. H., Tsatsu K. D., Gati K., Cilas C. & Muller E. (2006). Caractérisation des systèmes de cacaoculture et sélection

- participative des variétés de cacaoyers adaptées à l'environnement de production de la zone du Litimé au Togo. Rapport final du projet FSP-SCCS/Togo, 48 p.
- Dokuchaev, V. V. (1883). Russkii Chernozem-Report to the Free Economic Society, with 1 soil map and 12 figures in the text. St.-Petersburg. pp. 1-376 (Russian)
- Douka. A. M. (1981). Le développement des cultures vivrières spéculatives et leur impact sur l'organisation de l'espace. L'exemple du département de Bouaflé. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris I, Paris (France), 322 p.
- Douzals J. P. (2000). Mesures physiques de la variabilité des sols en agriculture de précision. Editions Ingénieries-E AT, IRSTEA, France : 45-52.
- Dublin P. (1972). Polyembryonie et haploïdie chez *Theobroma cacao*. *Café, Cacao, Thé*, 16(4) : 295-311.
- Duchaufour (1994). Vegetatio / Vegetatio Acta Geobot. *Plant Ecology Vegetation*, 112 (2) : 189-190.
- Dufour B., Djiekpor E. K., Paulin D. & Cilas C. (1993). Méthode de criblage pour la résistance au virus du swollen-shoot : Amélioration de la transmission par cochenilles. *In* : Actes de la 11<sup>ème</sup> conférence internationale sur la recherche cacaoyère tenue du 18 au 24 juillet 1993, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, pp. 243-244.
- Dzahini-Obiatay H. (1993). The development and use of molecular biological techniques in the diagnosis of cocoa swollen shoot virus (CSSV): Application to viruses from Malaysian cocoa leaves and Commelina species from cocoa fields in Ghana. Thesis, University of East Anglia, Norwich, 233 p.
- Dzahini-Obiatay H. & Fox R. T. V. (2006). Early developments in host pathogen interaction between Cocoa swollen shoot virus (CSSV) and the cocoa plant. Proceedings of the 15th International Cocoa Research Conference, October 9-1, San Jose, Costa Rica, pp 885-897.
- Facchini C. (2023). Le cacaoyer : plante médicinale ? Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, Sciences pharmaceutiques, (Marseille, France), 162 p.
- Fageria N. K., Baligar V. C. & Clark R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77: 185-268.

- FAO (2002). Rapport sur les ressources en sols du monde : Quatorzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols. 9-13 octobre 2000, Abomey, Bénin, 224 p.
- FAO (2017). Fiche d'information N°9: La gestion de l'eau. *In* : Améliorer la nutrition grâce aux jardins potagers, Module de formation à l'intention des agents de terrain en Afrique, ONU, Rome. <http://www.fao.org/docrep/005/x3996f/x3996f01.htm>. [Consulté le 19 novembre 2023].
- FAOSTAT (2020). Classement des états du monde par production de cacao (en tonne). Food and Agriculture Organization, United Nations. <https://atlasocio.com>. [Consulté le 23 Juillet 2023].
- FIRCA (2008). Guide de la régénération des vergers de cacaoyer et de caféier en Côte d'Ivoire. Document technique, Abidjan, Côte d'Ivoire, 119 p.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W. (2017). Caractéristiques et analyses du sol. Document technique, 34 p. (<https://www.agrarforschungschweiz.ch/>). [Consulté le 23 septembre 2023].
- Forestier J. (1964). Relations entre l'alimentation du caféier Robusta et les caractéristiques des sols. *Café Cacao Thé*, 8 (2) : 89-112.
- Freschet G.T., Violle C., Roumet C. & Garnier E. (2018). Interactions entre le sol et la végétation : structure des communautés de plantes et fonctionnement du sol. *In* : Les sols au cœur de la zone critique-écologie. ISTE éditions, Paris (France) : 83-99.
- Freud E. H., Petithuguenin P. & Richard J. (2000). Les champs de cacao : un défi de compétitivité Afrique-Asie. Editions Karthala et CIRAD, Paris, France, 207 p.
- Gandet F. (2023). Impact des arbres associés aux cacaoyers sur la prévalence et la configuration des foyers de la maladie du Cocoa swollen shoot virus dans la zone de Fresco (Sud de la Côte d'Ivoire). Editions Universitaires Européennes, Paris, France 72 p.
- Girard M. C., Schwartz C. & Jabiol B. (2011). Étude des sols, description, cartographie, utilisation. Coll. Sciences sup., Dunod, Paris. 432 p.

- Gobat J. M., Argno & Mathey W. (2010). Le sol vivant : Bases de Pédologie-Biologie des sols, 3<sup>ème</sup> édition, *Science et ingénierie de l'environnement*, 848 p.
- Hagen L S., Jacquemond M. A., Lepingle H., Lot. & Tepfer M. (1993). Nucleotide sequence and genomic organization of cacao swollen shoot virus. *Virology*, 196 : 619-628.
- Hasenstein K. H & Zavada M. S. (2001). Auxin modification of the incompatibility response in *Theobroma cacao* L. *Physiologia plantarum*, 112 : 113-118.
- Haston E., Richardson J., Stevens P., Chase M. & Harry D. (2009). The linear angiosperm phylogeny group (LAPG) III : a linear sequence of the families in APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161 : 128-131.
- Hilhorst M. A. & Balendonck J. (1999). A pore water conductivity sensor to facilitate non-invasive soil water content measurements. *Soil Science Society of América Journal*, 64 (6) : 211-222.
- Hilty J., Muller B., Pantin F., Leuzinger S. (2021). Plant growth: the What, the How, and the Why. *New Phytologist* , 232: 25–41.
- ICCO (2006). Organisation internationale du cacao. Rapport Annuel, ICCO, Londres, Royaume-Uni : 41 p.
- ICCO (2012). Rapport Annuel 2010/2011. ICCO, Londres WC1A, Londres, Royaume Uni : 13-26.
- ICCO (2015). Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLI, No. 2, Cocoa year 2014/15. International Cocoa Organization (ICCO), Westgate House, London, United Kingdom. <http://www.icco.org/statistics/otherstatistical-data.html>. [Consulté le 02 janvier 2021].
- ISO. (2015). Norme NF ISO 11074 Qualité du sol, 120 p. - Vocabulaire [WWW Document]
- Irié. G. R. (2017). Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 190 p.
- Irié G. R., Soro G. E., Goula B. T. A., (2015). Changements d'états de surface et évolutions spatio-temporelles des précipitations sur le bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 13 (2) : 386-397.

- IUSS Working Group WRB. (2015). Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, mise à jour en 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rome, Italie, 151p.
- Jadin P. & Vaast P. (1990). Estimation des besoins en engrais des sols à vocation cacaoyère dans le Littoral (Togo). *Café Cacao Thé*, (34)3 : 179-188.
- Jagoret (1992). Recherche d'un itinéraire technique pour la replantation des cacaoyers au togo : études comparatives de diverses techniques culturales en station. *Café Cacao Thé*, (36)3 : 207-212.
- 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 unique, Montpellier supagro, (Montpellier, France), 288 p.
- Jarvis W. R. & Shoemaker R. A. (1978). Taxonomic status of *Fusarium oxysporum* causing foot and root rot of tomato. *Phytopathology*, 68 : 1679–1680 .
- Kacou B. (2023). Évaluation du potentiel de fertilité du sol d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers dans une perspective de revalorisation au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire (Daloa). Thèse unique de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, (Daloa, Côte d'Ivoire), 169 p.
- Kassin K.E., Koko L., N'Goran K. E., Yao-K A & Yoro G. R. (2012). Sols favorables à la cacaoiculture au centre-ouest de la Côte d'Ivoire dans un contexte d'assèchement climatique. *International Journal of Biology and Chemical Science*, 6(3) : 1148-1157.
- Kébé I. B., N'Guessan F. K., Tahé 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.
- Kébé B. I., Koffi N., Konan A., N'guessan K. F., N'goran J. & Irié B. Z. (2005). Bien cultiver le cacaoyer. Fiche technique. Centre National de Recherche Agronomique, Août 2005, 4 p.
- Kébé B. I. & N'guessan, K. F. (2003). Rapport de la mission de prospection du swollen shoot. 11-13 Septembre 2003. CNRA, Divo, Côte d'Ivoire, 66 p.
- Khasirikani M. D. (2009). Note d'écologie générale. Mémoire Online, Université de la conservation de la nature et de développement de Kasugho, RDC, 96 p.

- Khetarpal R. K., Maury Y., Cousin R., Burghofer A. & Varma A. (1990). Studies on resistance of pea to pea seed borne mosaic virus pathotypes, *Annual Review of Applied Biology*, 116 : 297-304.
- Kohei Y., Hiroki H., Mizuhiko N. (2014). Estimation of microbial biomass potassium in paddy field soil. *Soil Science Plant Nutrition*, 60 : 512-519.
- 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., Kassin K. E., Yoro G., NGoran K. & Yao-Kouamé A. (2009). Corrélation entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morpho pédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 24 : 1508-1519.
- Koko L. K. (2008). Influence des caractères morpho-pédologiques et chimiques des sols sur la dégradation précoce des cacaoyères dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas des régions de Méagui et de San-Pedro. Thèse de Doctorat ès Sciences, Agropédologie, Université d'Abidjan-Cocody, Abidjan, p. 119.
- Koko L. K., Yoro R. G., N'Goran K., Assiri A. A. & Assa A. (2006). Identification des caractères morpho-pédologiques liés à la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *In* : Actes de la 15<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère, 9-14 Octobre 2006, San José, Costa Rica, 12 p.
- Kouadio K. H. (2022). Impact de la fertilisation minérale sur l'activité biologique et le stock de carbone dans les sols sous cacaoyers au Centre-Sud et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa (Daloa, Côte d'Ivoire), 146 p.
- Kouamé K. A. (2013). Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide soumis aux pressions anthropiques : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 195 p.
- Kouassi K.G. (2010). Analyse technique et socio-économique de l'exploitation agricole de M. Djato Emmanuel à Emmanuel-Bango (Département de San Pédro). Rapport de Stage,

- Ecole Supérieure d'Agronomie RDC- Diplôme d'Agronomie Générale, Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 45 p.
- Kraft J. M. & Pflieger, F. L. (2001). *Compendium of Pea Diseases*, APS Press, USA, St. Paul, Minnesota, 67 p.
- Lecompte F., Abro M. A. & Nicot P. C. (2013). Can plant sugars mediate the effect of nitrogen fertilization on lettuce susceptibility to two necrotrophic pathogens: *Botrytis cinerea* and *Sclerotinia sclerotiorum*?. *Plant and Soil*, 369 : 387-401.
- Legout A., Hansson K. & Van D. H. G. (2020). Chemical fertility of forest ecosystems. Part 2: Towards redefining the concept by untangling the role of the different components of biogeochemical cycling. *Forest Ecology and Management*, 461 : 117-844.
- Leneuf N. & Tempier P. (1969). Données récentes sur la géologie de la Côte-d'Ivoire. Rapport Inédit Faculté Sciences Université Abidjan, 50 p.
- Lepoivre P., (2003). *Phytopathologie*. De Boeck les presses agronomiques de Gembloux, 432p.
- Lévêque C. (1972). Les mollusques benthiques du Lac Tchad : écologie, étude des peuplements et estimation des biomasses. *Cahier ORSTOM*, série Hydrobiologie, 6(1) : 3-45.
- Lockhart B. E. L. (1990). Evidence for a double-stranded circular DNA genome in a second group of plant viruses. *Phytopathology*, 80 : 127-13.
- Loor Solorzano R. G. (2007). Contribution à l'étude de la domestication de la variété de cacaoyer Nacional d'Équateur : recherche de la variété native et de ses ancêtres sauvages. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, SUPAGRO, (Montpellier, France), 201p.
- Lorenz N., Verdell K., Ramsier C. & Dick R. (2010). A Rapid Assay to Estimate Soil Microbial Biomass Potassium in Agricultural Soils *Biology & Biochemistry. Soil Science Society of America Journal*, 74 : 512-516.
- Lund M., Lametsch R., Hviid M., Jensen L & Skibsted L. (1999). High-oxygen packaging atmosphere influences protein oxidation and tenderness of porcine longissimus dorsi during chill storage. *Meat Science*, 77 : 295-303.

- Mangenot G., Alibert H. & Basset A. (1946). Sur les caractères du "Swollen-Shoot" en Côte-d'Ivoire. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, 283-284.
- Marnier V. (2021). Étude ethnobotanique du cacao (2019). Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie, Université de Caen Normandie, France, 121 p.
- Martin J-P. (1970). Le cacaoyer. Abidjan : Ecole Nationale Supérieure Agronomique, multigr, 67 p.
- Meena V. S., Maurya B. R. & Verma J. P. (2014). Does a rhizospheric microorganism enhance K<sup>+</sup> availability in agricultural soils? *Microbiology Ressource*, 169 : 337-347.
- Mench M. & Baize D. (2004). Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces. Mesures pour réduire l'exposition. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 52 : 31-56.
- Micheli F. (2009). Etude de l'interaction *Theobroma cacao*-*Moniliophthora perniciosa*. Mémoire pour Habilitation à diriger des Recherches, URF Scientifique d'Orsay, Université de Paris-Sud (XI), (Paris, France), 85 p.
- Mirsal A. I. (2004). Soil Pollution. Origine, Monitoring And Remédiation. Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 58-60.
- 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) : 355-64.
- Mossu G. (1990). Le cacaoyer, Série : Le technicien d'Agriculture tropicale, Ed, G.P, Maisonneuve et Larose, Paris, France, 160 p.
- Mossu G. (1991). Le cacaoyer. *Les cahiers d'Outre-Mer*, Paris, France pp. 44-174.
- Mossu G. (1992). Cocoa. The MacMillan Press Ltd, Paris, France, 103 p.
- Motamayor J. C., Risterucci A.M., Lopez P A., Ortiz C. F., Moreno A. & Lanaud C. (2002) Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89 : 308-386.
- N'Dabalishye (1995). Agriculture vivrières ouest Africain à travers le cas de la Côte d'Ivoire. Monographie Bouaké (Côte d'Ivoire). Institut des savanes, Bouaké, Côte d'Ivoire, 208p.

- N'guessan K. F., Coulibaly N., 2001. Dynamique des populations de mirides et de quelques autres déprédateurs du cacaoyer dans la région Ouest de la Côte d'Ivoire. In : Actes de la 13<sup>e</sup> conférence internationale sur la recherche cacaoyère. Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, pp: 425-435.
- N'guessan B.V.H., Saley M., Oga Y., Yapi A. & Biémi J. (2017). Caractéristiques de la sécheresse hydrologique dans la région de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Engineering Science Invention*, 6(12) : 19-27.
- Ollennu L. A. A., Hughes J. A. & Owusu G. K. (1996). Mild strain cross-protection of cocoa against cocoa swollen shoot badnavirus. *Tropical Science*, 36 : 116-128.
- Ollennu, L. A. A., Owusu G. K. & Thresh J. M. (1989). The control of cocoa swollen shoot disease in Ghana. *Cocoa Growers' Bulletin*, 42 : 26-36.
- Ollennu L. A. A. & Owusu G. K. (2002). Spread of cocoa swollen shoot virus to cacao (*Theobroma cacao*) plantings in Ghana. *Tropical Agriculture*, 79 : 224-230.
- Oro Z-F (2011). Analyse des dynamiques spatiales et épidémiologie moléculaire de la maladie du swollen-shoot du cacaoyer au Togo: Etude de la diffusion à partir des systèmes d'information géographiques. Thèse de doctorat, SupAgro, Montpellier, 263 p.
- Oro Z-F. (2012). Analyse des dynamiques spatiales et épidémiologie moléculaire de la maladie du swollen shoot du cacaoyer au Togo. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier SupAgro, (Montpellier, France), 262 p.
- Pansu M. & Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. Edition : Springer, Paris, (France), 1012 p.
- Parent L. O. & Rivest R. (2003). Les éléments nutritifs. In : Guide de la fertilisation, 1<sup>ère</sup> édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec (Canada), 294 p.
- Partiot M. (1979). La résistance horizontale du cacaoyer au *Phytophthora spp.* : Contribution à l'étude de son évaluation, son amélioration et de son utilisation. Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, (Paris, France), 89 p.
- Paulin D. & Eskes A. B. (1995). Le cacaoyer : stratégie de sélection. *Plantations, Recherche, Développement*, 2 : 5-13.

- Petithuguenin P. (1998). Les conditions naturelles de production du cacao en Côte d'Ivoire, au Ghana et en Indonésie. *Plantation, Recherche, Développement*, 5(6) : 393-411.
- Pitcholo A. E. (1990). Essai d'utilisation des péricarpes de cabosses de cacao (*Theobroma cacao* L.) dans l'alimentation des poulets de chair au Togo. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Cheik Anta Diop (Dakar, Sénégal), 101 p.
- Pinheiro T. T., Litholdo J. R. C. G., Sereno M. L., Leal J. R. G. A., Albuquerque P. S. B & Figueira A. (2011). Establishing references for gene expression analyses by RT-qPCR in *Theobroma cacao* tissues. *Genetics and Molecular Research*, 5(1) : 15-26.
- Posnette A. F. (1947a). Virus diseases of cacao in West Africa. *Annals of Applied Biology*, 34: 388-402.
- Posnette A. F. (1947b). Some virus diseases of the cacao tree. *Empire Journal of Experimental Agriculture*, 15(58) : 161-168.
- Posnette A. F. (1952). Virus diseases of cacao in West Africa: the present position. Report of the thirteenth international horticultural congress, sect. 7, 11 p.
- Ribeiro M. A., Da-Silva Q. J. O., Aitken W. M., Machado R. C. R. & Baligar V. C. (2008). Nitrogen Use Efficiency in Cacao Genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 31 : 239-249.
- Redd. (2017). Stratégie Nationale REDD+ de la Côte d'Ivoire, <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/Ivc186335.pdf>. [Consulté le 20/09/2025].
- Redden B., Leonforte T., Ford R. & Croser J. S. (2005). Pea (*Pisum sativum* L.), In: Singh, R.J. and Jauhar, P.P. (Eds.), Genetic resources, chromosome, engineering, and crop improvement "Grain Legumes", CRC Press, Boca Raton : 58-98.
- Renaud R. (1957). Distribution of virus disease of cocoa in the Ivory Coast. In: Cocoa Conference, London. Proceeding London, UK: cocoa, chocolate and confectionary alliance: 78 – 80.
- Sagemann W., Lesemann D. E., Paul H. L., Adomako D. & Owusu G.K. (1985). Detection and comparison of some Ghanaian isolates of cacao swollen shoot virus (CSSV) by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) and immunosorbent electron microscopy (IEM) using an antiserum to CSSV strain 1A. *Phytopathologische Zeitschrift*, 114 : 78-89.

- Schwartz D. & Lanfranchi R. (1990). Origine et évolution des savanes intermayombiennes (R.P. du Congo), apports de la pédologie et de la bio-géochimie isotopique. *In* : Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. ORSTOM, Paris (France) : 314-325.
- Simunek J., Van G. M. T. & Sejna M. (2005). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. - *University of California-Riverside Research Reports*, 2005 (3) : 1-240.
- Smith A. J. (1980). Soils classification and the cocoa grower. *Cocoa Growers Bulletin*, 30 (5): 5-10.
- Snoeck D., Koko L., Joffre J., Bastide P. & Jagoret P. (2016). Cacao Nutrition and Fertilization : Sustainable Agriculture Reviews, Vol. 19, Chapter 4. E. Lichtfouse (Ed.). Cham, Springer International Publishing: pp.155-202.
- Soltner (2000). Les bases de la production végétale T1 : le sol. 22<sup>ème</sup> édition sciences et techniques agricole, Maine et Loire (France), 457 p.
- Soupi N. M. (2013). Implication des arabinogalactanes protéines dans le développement des embryons chez *Theobroma cacao* L. Laboratoire de chimie des substances naturelles. Université de Yaoundé I, Cameroun, 164 p.
- Sparks D. L. & Huang P. M. (1985). Physical Chemistry of Soil Potassium. *In*: Munson RD (ed) Potassium in Agriculture. ASA, CSSA, SSSA, Madison, USA, pp 201-276.
- Sparks D. L. (2003). Environmental soil chemistry. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Academic Press. 352 p.
- Statistat (2025). Production mondiale de fèves de cacao en volume de 2016/2017 à 2023/2024, par pays. Rapport d'étude, ICCO, 42 p. <https://fr.statista.com> [consulté le 8 juin 2025].
- Tahi G. M., Kébé B.I., Cilas C. & Eskes A. B. (2006). Facteurs affectant la résistance foliaire du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) à *Phytophthora palmivora* et sa corrélation avec la résistance des cabosses. Communication à la 14<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la recherche cacaoyère, 9-14 Octobre 2006, San José, Costa Rica, 118 p.

- Tamesse J. L., Messi J., Silatsa-Soufo E., Kambou J., Tiago A. B. & Ndongo A. O. (2002). Complexe des parasitoïdes de *Trioza erytreae* (Del Guercio) (Homoptera:Triozidae), psylle des agrumes au Cameroun. *Fruits*, 57 : 19-28.
- 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, (Toulouse, France), 263 p.
- Thomas L. (2010). Soil pH and the availability of plant nutrients. International Plant Nutrition Institute, Georgia (USA), 1 p.
- Thresh J. M. (1958). The spread of virus disease in cacao. *West African Cocoa Research Institute. Technical Bulletin*, 5 : 36 p.
- Thresh J. M. & Owusu G. K. (1986). The control of cocoa swollen shoot disease in Ghana: an evaluation of eradication procedures. *Crop Protection*, 5 : 41-52
- Tossah B. K., Koudjega T. & Snoeck D. (2006). Amélioration de la gestion de la fertilité des sols dans les plantations de cacaoyers au Togo. Rapport final scientifique et technique du FSP Régional Cacao. ITRA/CRAF Togo, 43 p.
- USDA (1987). Soil mechanics level I. Module 3. USDA Soil conservation service. Washington DC. (USA), 53 p.
- Van D. H. G., Legout A. & Pollier B. (2014). The dynamics of calcium and magnesium inputs by throughfall in a forest ecosystem on base poor soil are very slow and conservative: Evidence from an isotopic tracing experiment ( $^{26}\text{Mg}$  and  $^{44}\text{Ca}$ ). *Biogeochemistry*, 118 : 413-442.
- Verliere G. (1981). Etude par la méthode du diagnostic foliaire de la fertilisation et de la nutrition minérale du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.). *Mémoire ORSTOM*, Paris (France), 256 p.
- Vincent J. J. (1986). Défense des cultures. *ORSTOM*, Paris (France), 61 p.
- Vos J. G. M., Barbara J., Ritchie & Flood J. (2003). A la découverte du cacao. Un guide stimulant pour la formation des facilitateurs. CABI Biosciences, a division of CABI international, pp : 11-58

- Wedepohl K. (1995). The composition of the continental crust. *Geochim Cosmochim Acta*, 59 : 1217-1232.
- 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.
- Williamson B., Tudzynski B., Tudzynski P. & van Kan J. A. (2007). Botrytis cinerea: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology*, 8(5), 561-80.
- Wiltshire S. P. (1946). Common names of virus diseases used in the Review of Applied Mycology. *Revue applied Mycology*, 24 : 513.
- Wood G.A.R. & Lass R. A. (1985). Cocoa. Ed. Longman Group Ltd, Essex. Tropical Agriculture Series, 620 p.
- Yaghoubi K. M., Pirdashti H., Rahimian H. (2019). The role of potassium solubilizing bacteria (KSB) inoculations on grain yield, dry matter remobilization and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Plant Nutrition*, 42 : 1165-1179.
- Yoro G. (2004). Reconnaissance des sols favorables aux cacaoyers. Cours de formation des producteurs de cacao et des agents ANADER détachés auprès de STCP. Convention CNRA-STCP. Document interne du CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 24 p.
- Young A. M. (1985). Research on the natural pollination of cocoa in Central America : overview of current directions. *In: Procedure 9 International cocoa Restitute, Conference 12-18 Février 1984, Lomé, Togo*, 565 p.

*PUBLICATION*

**ANALYSIS OF THE MORPHO-PEDOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SOILS  
UNDER COCOA ORCHARDS AFFECTED BY SWOLLEN-SHOOT IN BOUAFLE  
(CENTRAL-WEST IVORY COAST)**

**Paterne Elvis TCHIMOU<sup>1</sup>, Gohi Ferdinand ZRO Bi<sup>1\*</sup>, BESSIMORY TOURE<sup>1</sup>, Koffi Hypolith KOUADIO<sup>1</sup>,  
Dogniméton SORO<sup>1</sup> & Sidiky BAKAYOKO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Agropedology, Agroforestry Training and Research Unit, Jean Lorougnon Guédé University, BP 150  
Daloa, Ivory Coast

<https://doi.org/10.35410/IJAEB.2024.5892>

**ABSTRACT**

The agricultural sector, in particular cocoa production, plays a key role in the socioeconomic development of Côte d'Ivoire. With climate change, soil impoverishment and diseases such as swollen-shoot, we are witnessing a drop in production, leading to the decline of many orchards. Since the various attempts to find solutions to this problem have all ended in failure, and even though these attempts have generally never overlooked the soil as a natural support for plants, the overall aim of this study is to diagnose the prevalence of swollen-shoot disease in the soil. A morpho-pedological study was carried out in the Bouaflé department in the Marahoué region, the main endemic area in Côte d'Ivoire, to compare the characteristics of soils under healthy orchards with those under infested orchards. The main differences observed were a higher load of ferruginous concretions and poor internal drainage of soils in diseased plots. While waiting to explore the chemical properties of soils, these results lead to the conclusion that the appearance of the disease in cocoa trees also depends on the quality of the cultivation soil.

**Keywords:** Swollen-shoot, Cocoa Tree, Soil, Morphology, Ivory Coast.

**1. INTRODUCTION**

The agricultural sector, particularly cocoa farming, plays a key role in the economic and social development of many African countries (Benin, Ivory Coast, Togo, Ghana and Nigeria) (Jagoret, 2011). Africa even holds the monopoly on cocoa production, with more than 70 pc of the global supply (Wessel and Quist Wessel, 2015). With production totalling 1.7 million tonnes, or 42 pc of global supply, Côte d'Ivoire is the world's leading producer (ICCO, 2015).

The areas of highest production were initially the east and centre-east of Côte d'Ivoire, which then formed the cocoa loop. With climate change, soil impoverishment and other constraints on cocoa farming, the cocoa loop has moved to the west of the country, driven by migratory flows. Today, with over 36pc of national production, the main cocoa-growing area in Côte d'Ivoire is the Centre-West, which includes the administrative region of Marahoué. Unfortunately, cocoa farming in this region is under serious threat from the Swollen shoot disease, which is causing very significant reductions in yields.

This viral disease is transmitted by mealybugs of the Pseudococcidae family, the most virulent isolate of which (Agou 1) causes intense red discolouration of young leaves, discolouration of adult leaves, swelling of stems and twigs and stunting of pods. Various methods have been put in place to combat the virus, but to no avail. These include uprooting (Ollennu et al., 1989), chemical and biological vector control (Entwistle, 1958), premunition (Ollennu et al., 1996), the use of cordon sanitaire and barrier crops (Fofie et al., 2003) and the selection of resistant

varieties (Adu-Ampomah et al., 2003 ; Dogbé et al., 2006). These efforts have not yet neglected the soil, the natural support of the cocoa orchard, leading us to believe that edaphic factors condition the vulnerability of the cocoa tree to the swollen-shoot virus. This research has come at the right time to shed light on this issue.

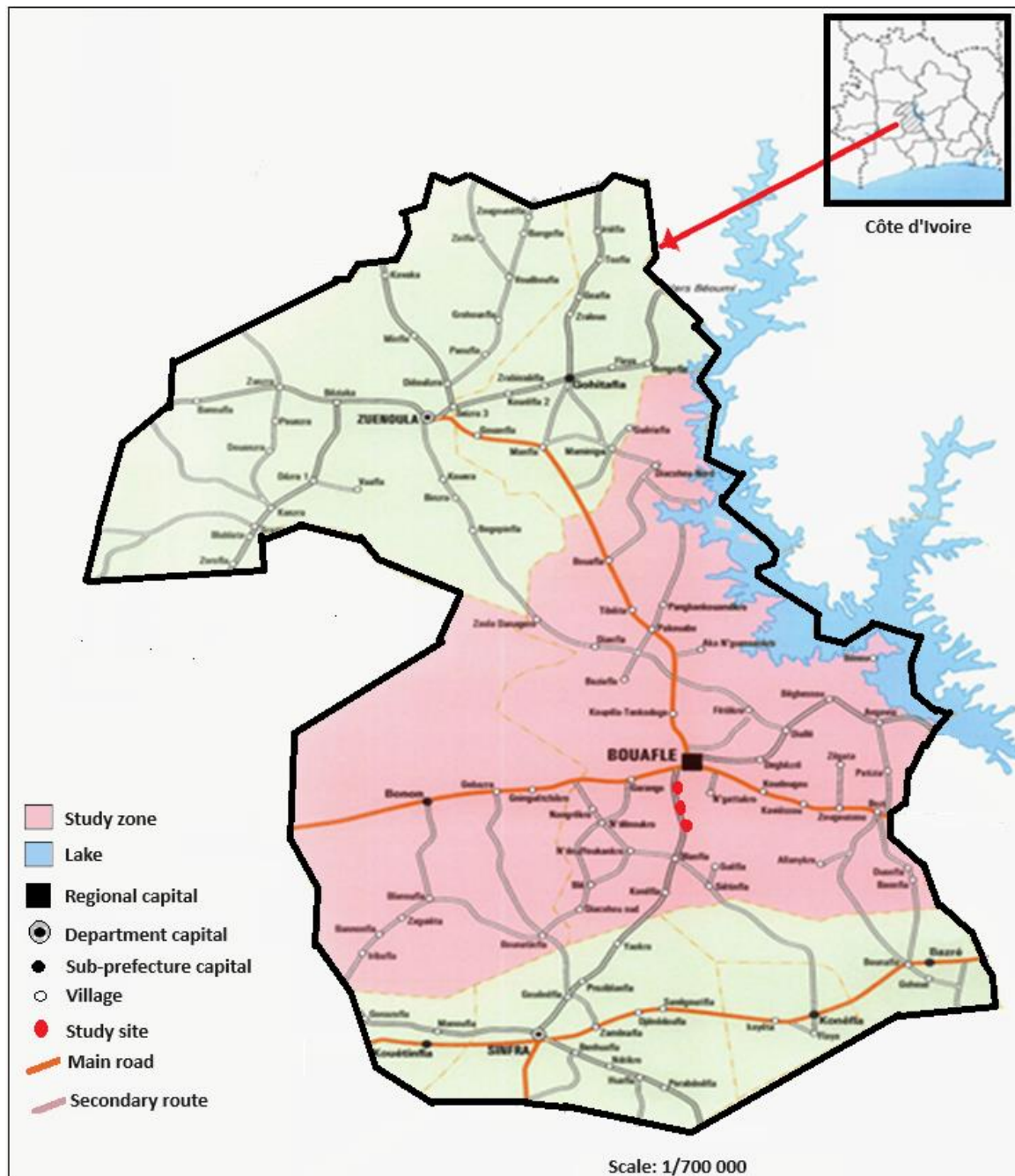
The overall aim is to establish a soil diagnosis of the prevalence of the swollen shoot disease, which inevitably involves: i) determining the morphological properties of soils under orchards of cocoa trees affected by swollen shoot and soils under orchards of healthy cocoa trees; ii) comparing the properties of the two categories of soil.

## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1. Presentation of the study area**

The study was carried out in the department of Bouaflé, capital of the Marahoué region in Côte d'Ivoire (West Africa). It was carried out at three sites : Guessanfla (N6°55'73.3" W5°45'76.8"), Krayaokro (N6°54'91.1" W5°45'71.2") and Simporéfla (N6°53'51.0" W5°45'74.0") (Figure 1). These different localities are part of the department's cocoa production zones that are heavily affected by swollen-shoot disease.

The region straddles the divide between the sub-equatorial Atean climate and the humid tropical Baulean climate. It is characterised by two main seasons alternating with two short ones. The long rainy season begins in March and ends in June, while the short rainy season runs from mid-August to October. Between the two rainy seasons is the short dry season from July to mid-August, while the long dry season runs from November to February (N'guessanet *al.*, 2012).



**Figure 1 :** Map showing the location of the study area.

Annual rainfall is between 1,800 and 2,000 mm ; the average annual temperature is around 25.30°C, with an average humidity of 75 pc. It is a transitional climate between savannah and forest, very favourable to farming and livestock rearing (Douka, 2012). The area is drained by

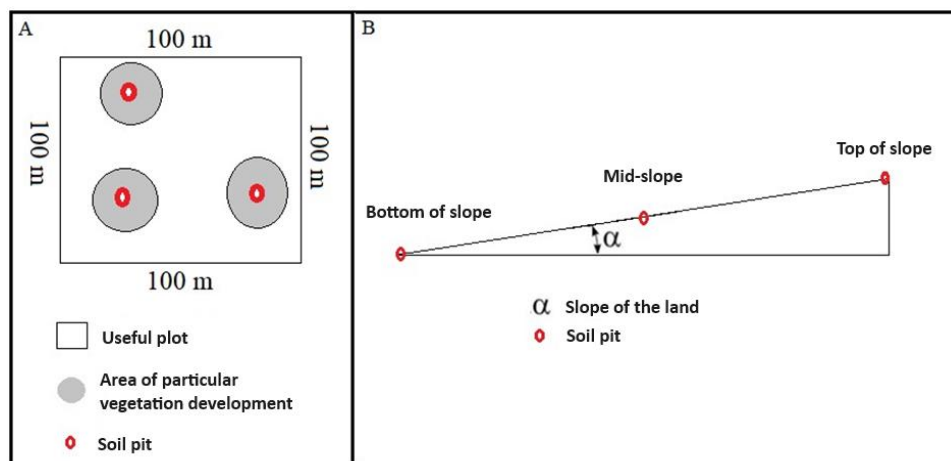
the Bandama rouge or Marahoué river and the Bandama blanc (N'guessan et al., 2017). It is a transition zone between dense forest and wooded savannah, two types of plant formation which, depending on the dominance of one over the other, are distributed to the south and south-west for the dense forest, then to the north and north-east for the wooded savannah (Douka, 2012).

The relief of the region is therefore relatively flat, consisting of low plateaux with a few shallows in the plains and hills with an average altitude of 260 m (Douka, 2012). Geologically, the area belongs to the Birrimian granite and schist group (Leneuf and Tempier, 1969). The soils are generally Ferralsols (Eutric), with slightly different characteristics depending on whether you are in the forest or the savannah. There are also pockets of Acrisols in the north and northeast of the zone, and Gleysols on the riverbanks (Douka, 1981).

## 2.2 Data collection

### 2.2.1. Experimental set-up

The soil survey is carried out according to the slope of the land, determined using a clisimeter. When the topography of the plantation is virtually flat (slope  $\leq 8$  pc) and the cultivation history of the plantation is identical throughout, the state of vigour of the vegetation (growth, development and health status, weed or pest infestation) is generally a better reflection of the nature of the underlying soil (Freschet et al., 2018). The soil pits (three in total per site) are then placed in the working plot in a sequence determined by the diversity observed in the plant cover (Figure 2). On the other hand, if the plot is characterised by a significant slope (slope  $> 8$  pc), the location of the soil pits on the working plot is guided by the toposéquence method based on the principle that there is a close relationship between the shape of a region (morphology) and the different types of soil described (pedology) (Lévêque, 1972). The morpho-pedological study was then carried out along a line perpendicular to the contour lines: the three pits were placed on a transect along the toposéquence, with one pit positioned at the top of the slope, another at mid-slope and the last pit at the bottom of the slope.

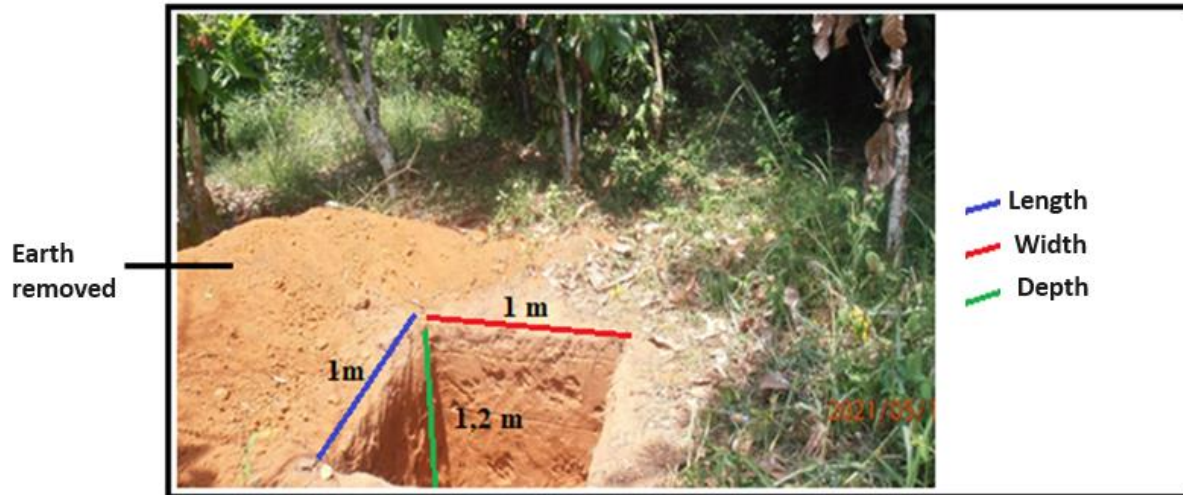


**Figure 2 :** Arrangement of soil pit locations

*A : according to the vigour of the plant cover ; B : according to the toposéquence..*

### 2.2.2. Opening of soil pits and description of soil morphology

Each pit was opened so that it was 120 cm deep, 100 cm long and 100 cm wide respectively, provided there were no impassable obstacles, particularly in terms of depth. To avoid compacting the soil around the edges of the pits, the soil removed was placed on one side of the pit only (to the right or left of the observation face) (Figure 3).



**Figure 3 : Soil pit**

Observations in each pit consisted of identifying the different horizons (visually or using a soil knife) and determining, for each horizon :

- the thickness using a decameter ;
- colour using the Munsell code;
- the texture by tactile means, by making a ring of moist soil and a ring with the ring: the soil is more clayey when the ring is easy to form and sandy when it is impossible to form it; the texture was also determined in the laboratory;
- the general structure of the soil and that of the flow by visual observation of the faces of a soil sample taken and broken into pieces;
- the compactness and general cohesion of the horizon measured by the penetration test, which consists of pushing a soil knife into the horizon and estimating the ease with which the knife penetrates the soil: the soil is more compact when the operator exerts more effort;
- the presence of organic matter in the soil by visual observation: the horizon is more humus-bearing when it is darker in colour;
- the porosity and permeability of the horizon by assessing the infiltration speed of a drop of water deposited on a lump of soil, the soil being more permeable when water infiltrates more quickly;
- the quality of soil drainage by locating and counting spots of pseudogley rust on the horizon caused by water stagnation;
- the depth at which the hydromorphic top appears (PATH) using a decameter; - the rate of coarse elements by the following formula 1 :

$$EG (pc) = (MR/MT) \times 100 (1)$$

---

Where : MT = Mass in grams of the dried sample and MR = Mass in grams of the dried soil reject after sieving.

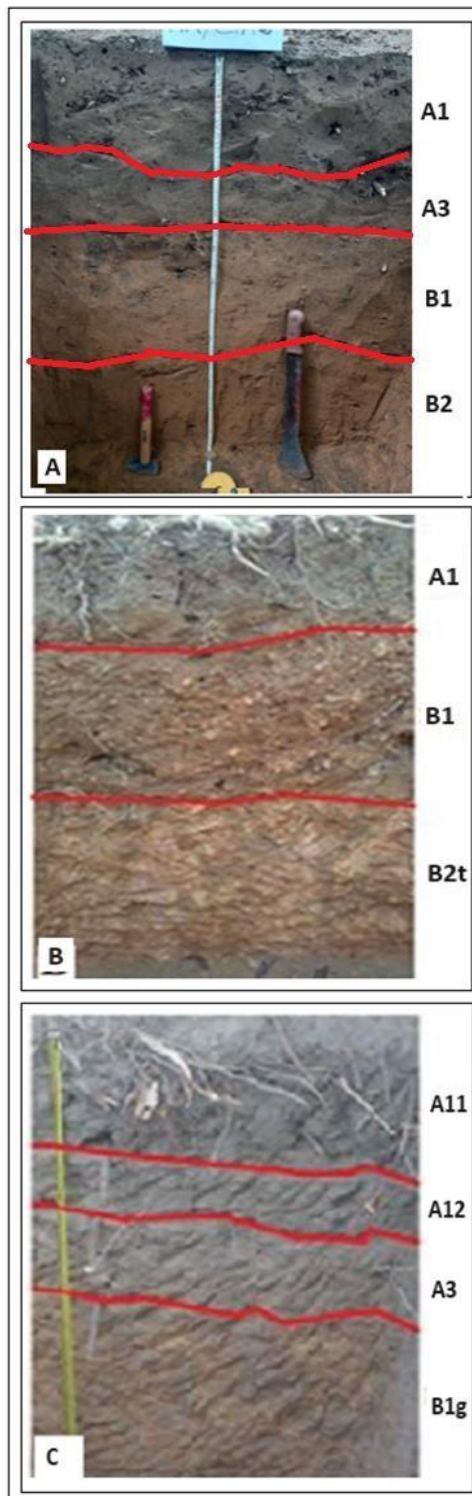
## 2.3 Statistical processing of data

The normality of the distributions of the samples and the homogeneity of their variances were verified by the Shapiro-Wilk and Levène tests respectively. When the variable from which the sample is drawn follows a normal distribution and the variances are homogeneous, an ANOVA is performed. Otherwise, the non-parametric Kruskal-Wallis test is applied. The analysis of variance also involved the Student's T TEST, which was used to measure the differences, at landscape level, between the means of the soil variables for the two types of plots studied (healthy plots and diseased plots). All analyses were carried out using R software version 3.6.3.

## 3. RESULTS

### 3.1. Morpho-pedological characteristics of soils

The open soil profiles on all the sites, in both healthy and diseased plots, generally have the same level of profile development (Figure 4). In fact, the soils are all very deep (at least 120 cm) and highly differentiated in terms of horizons. These soils are also characterised by total alteration of the primary minerals. The surface horizons are humus-bearing, generally not very developed (10 to 30 cm) and coloured dark brown (7.5YR 5/6 to 7.5YR 7/2) or reddish brown (5YR 3/3 to 5YR 4/4). Their overall structure is lumpy and their texture is sandy-clayey to the touch. The buried horizons are thicker (over 40 cm) with a wide range of colours (reddish yellow: 7.5YR 6/8 to 7.5YR 7/6; red: 2.5YR 3/6 to 2.5YR 4/6 and reddish brown 5YR 4/3). In this part of the soil, the texture is clayey-sandy or silty-sandy to the touch, when the overall structure is massive with a polyhedral flow.



**Figure 4 :** Some soil profiles

- *A-Deep, well-drained soil with almost no coarse matter in a healthy plot at Simporéfla ;*
- *B-Deep soils, with a B1 horizon loaded with coarse elements and a B2t horizon compacted by Guessanfla clay ;*

- C- Deep soils, with a B1g horizon showing traces of temporary hydromorphy at Guessanfla.

### 3.2. Granulometry

#### ➤ Coarse elements

In the Bouaflé plots, specifically those at Krayaokro and Guessanfla, the soils are characterised by moderately high loads of ferruginous chippings (50 to just over 60 pc) between 20 and 40 cm depth, whereas in the overlying horizon (0-20 cm), these levels are low (< 30 pc) (Table I). The Simporéfla soils, on the other hand, are almost devoid of these coarse elements. Overall, all the soil layers in the healthy plots differ from one another (*Anova* < 0.05). The same is true for all soil layers in infested plots. The opposite observation was made when the soils of the healthy plots were compared with those of the diseased plots in this locality (*TestT* > 0.05).

**Table I : Concretion rates in soils**

Layers	Plots	Concretion rate in pc			ANOVA		TEST-T	
		Guessanfla	Krayaokro	Simporéfla	P	F	df	P
0-20	Healthy	20.83±9.82ab	29,70±4,61b	0,00±0,0 a	0,03	11,84	9,98	0,93
	Patients	23.99±11.31ab	29,48±4,05b	0,00±0,0 a	0,04	10,22		
20-40	Healthy	50.40±23.75ab	66,67±0,04b	0,00±0,0a	0,03	12,84	9,99	0,95
	Patients	63,55±0,00b	59,13±9,66b	0,00±0,0a	0,00	80,87		

#### ➤ Fine elements

Tables II and III show the proportions of the different fractions of sand, silt and clay found in the soil at the sites. In the 0-20 cm layers, the soils are much richer in sand (generally more than 50 pc). Clays (25 to 40 pc) and silts (19 to 31 pc) follow respectively. In the 20-40 cm layers, there is an accumulation of clays, with rates reaching over 38 pc in the healthy plots and 56 pc in the diseased plots. These rates, specifically the rates of clay and sand in the 20-40 cm layers, show significant differences between the soils of the healthy plots on the one hand and the soils of the infested plots on the other (*Test-T* < 0.05). The opposite was true between plots of the same type (*Anova* > 0.05).

**Table II : Test Anova test of soil textures**

Layers (cm)	Plots	Textures (pc)	Floors			ANOVA	
			Guessanfla	Krayaokro	Simporefla	P	F
0-20	Healthy	Clay	24,75±6,71a	25,25±5,30a	15,75±7,42a	0,38	1,34
		Silt	23,62±1,23a	24,75±2,47a	19,00±2,82a	0,16	3,56
		Sand	51,62±7,95a	49,50±7,77a	65,00±4,94a	0,20	2,86
	Patients	Clay	26,88±9,36a	41,00±5,65a	20,50±19,09a	0,37	1,36
		Silt	24,25±3,18a	30,00±0,70a	20,75±20,75a	0,13	4,12
		Sand	48,63±12,90a	28,75±4,59a	59,25±23,68a	0,29	1,92
20-40	Healthy	Clay	34,62±6,89a	31,50±9,19a	38,25±11,66a	0,80	0,22
		Silt	26,75±0,35a	31,00±2,82a	21,50±0,70a	0,12	4,44
		Sand	38,37±7,60a	37,25±6,71a	40,25±13,08a	0,69	0,41
	Patients	Clay	56,00±7,77a	40,75±1,06a	23,75±18,03a	0,14	4,04
		Silt	21,00±14,14a	20,50±0,00a	22,75±3,88a	0,36	1,46
		Sand	22,91±48,79a	38,75±1,06a	53,50±21,92a	0,79	0,25

**Table III : T-TEST of soil textures**

Layers (cm)	Textures	df	P
0-20	Clay	7,45	0,16
	Silt	8,70	0,39
	Sand	7,35	0,15
20-40	Clay	7,06	0,01
	Silt	5,80	0,11
	Sand	6,03	0,02

**3.3. Depth at which the hydromorphic top appears in the profiles**

Across all sites, soils in diseased plots showed three times more evidence of deep hydromorphy than soils in healthy plots (Table IV and V). However, the frequency of occurrence of hydromorphy in the profiles was not significantly different ( $TEST-T > 0.05$ ) (Table V). In contrast, the depths at which hydromorphy appeared were different ( $ANOVA < 0.05$ ), but only in the soils of the diseased plots, where 50 or 55 cm were measured in some places and over 120 cm in others (Table VI).

**Table IV : Frequency of occurrence of hydromorphy in soils between 0 and 120 cm**

Condition of plots	Total number of soil pits	Frequency of occurrence of hydromorphy	Percentage of pits showing hydromorphy
Healthy	9	1	11,11
Patients	9	3	33,33

After transforming the percentages of occurrence of hydromorphy in the plots by the function  $GoF(X)$ ,  $G(x)$  corresponding to the Arcsin function and  $F(x)$  to the square root function, we obtain the following analysis of variance presented in Table V :

**Table V : Average rates of occurrence of hydromorphy in plots**

Healthy plots	Diseased plots	TEST-T	
		P	F
0,11± 0,19	0,33± 0,57	0,60	0,32

**Table VI : Depths of appearance of the hydromorphic roof (PATH) in the first 120 cm of soil**

Plots	PATH			ANOVA		TEST-T	
	Guessanfla	Krayaokro	Simporefla	P	F	df	P
Healthy	> 120±00a	> 120±00a	> 120±00a	0,33	1	8	0,08
Patients	> 120±00a	55±00a	50±10b	0,00	147		

#### 4. DISCUSSION

With regard to the good conditions to be observed in cocoa farming (CNRA, 2015 ; Koko, 2014), the edaphic conditions in terms of the morphology of the soils studied are generally favourable. However, their great depth is counteracted in the infested plots by a shallow depth of appearance, not only, of the moisture roofs (PATH) and horizons highly supplied with coarse elements, but also, by the accumulation of clays in the 20-40 cm layers.

The presence of a temporary hydromorphic horizon at shallow depths is an obstacle to the rooting of hydromorphic-sensitive plants such as cocoa. It occurs when the deep horizons are clayey or have continuous structures (soil compaction). In this case, rainwater drains very slowly and stagnates in the upper layers of the soil, creating excess water. This excess water constitutes a hydric obstacle to the rooting of many crops because of the hypoxic conditions created in the soil (Concaret, 1981).

The high loads of coarse elements made up of rubble or ferromanganic concretions that generally appear in Ferralsols reflect the reworking of the soil. According to Schwartz & Lanfranchi (1990), remodelling generally results from the lateral transport of materials by colluvium, ablation, aeolian contributions, anthropogenic disturbances and biological mixing. These coarse elements favour soil bearing capacity, soil aeration and soil infiltration capacity. On the contrary, their effects on agronomic fertility are unfavourable: in particular, they reduce the soil's water reserve, the use of tillage tools and encourage the leaching of nutrients from the soil (Delaunoy, 2013). In addition, the presence of high loads of coarse elements in the soil can be an inhibiting factor for root penetration into the soil (Boyer, 1982). On this point in particular, a number of converging observations suggest that a limit of around 50 pc in relation to the weight of the soil, i.e. around 75 pc in relation to its volume, is reached at which point it is very difficult for roots to penetrate and develop within this horizon (Boyer, 1982).

The accumulation of clays observed in the 20-40 cm layers of certain soils in diseased plots, with rates reaching 50 pc in places, is the result of leaching from the upper layer. This can lead to poor water drainage in the accumulation layer, resulting in hypoxic conditions. Forestier (1964) believes that these conditions can lead to physiological disorders in plants, notably potassium deficiency associated with toxic doses of magnesium and sodium. These disorders could explain the appearance of swollen-shoot in cocoa plantations.

In short, the coarse elements and shallow hydromorphy create disturbances in the mineral and water nutrition of the cocoa tree, making the plant vulnerable to various physiological disorders such as swollen shoot. This would explain the observations according to which these two edaphic factors recurrently appear as the main degrading conditions in cocoa farming (Yoro, 2004 ; Koko *et al.*, 2006 ; Kacou, 2023).

## 5. CONCLUSION

The soils explored were generally Ferralsols. The main differences observed between the soils of the infested plots and those of the healthy plots, although not always significant, were a higher load of ferruginous concretions and poor internal drainage in the soils of the diseased plots. These constraints, which appear at shallow depths, constitute mechanical obstacles preventing the exploration of a greater volume of soil by plant roots. As a result, cocoa trees are malnourished and vulnerable to all kinds of pathologies, including swollen-shoot. Soil fertilisation could be used to combat this disease more effectively. But before drawing any more comprehensive conclusions, we need to investigate how the chemical properties of the soil also impact on the prevalence of the disease in cocoa farms.

## REFERENCES

- Adu-Ampomah, Y., Ollenu, L.A.A, & Adomako B. (2003). Source of resistance / tolerance to the cococa swollen shoot virus disease. Communication à la 14<sup>e</sup> Conférence internationale sur la recherche cacaoyère. Accra, Ghana, 2003.
- Anthony Fofie, Nsiah, F.E., Ampofo, S.T., & Owusu, G.K. (2003). Control of cocoa swollen shoot disease in a “cordon sanitaire” separating the area of heavy infection in Ghana from the rest of the country. In: Proceeding of the 4th INCOPEP, Accra, Ghana, 12: 15 - 19.
- Boyer J. (1982). Facteurs de Fertilité et utilisation des sols. *In* : Les sols ferrallitiques. Tome X. Initiations-documentations techniques, ORSTOM, 52, Paris (France) : 274-302.
- CNRA. (2005). Bien cultiver le cacaoyer en Côte d’Ivoire. Fiche Technique. Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Côte d’Ivoire, 4 p.
- Concaret J. (1981). Drainage agricole: Théorie et pratique. Chambre régionale d’agriculture de Bourgogne, Dijon (France), 509 p.
- Delaunoy A. (2013). Guide pour la description et l’évaluation de la fertilité des sols. Document technique, Chambre d’agriculture du Tarn et INRA de Montpellier, France, 39 p.
- Dogbé S. Y., Békou K., Mississo E., Wégbé K., Bassimbako K. H., Tsatsu K. D., Gati K., Cilas C. & Muller E. (2006) : Caractérisation des systèmes de cacaoculture et sélection participative des variétés de cacaoyers adaptées à l’environnement de production de la zone du Litimé au Togo. Rapport final du projet FSP-SCCS/Togo, 48p.
- Douka A.M. (2012). Les cultures vivrières de l’autoconsommation à l’économie de marché en pays Gouro (Centre-Ouest de la Côte d’Ivoire), 25-26 p.
- Douka. A-M (1981), le développement des cultures vivrières spéculatives et leur impact sur l’organisation de l’espace. L’exemple du département de Bouaflé. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Paris I (Panthéon. Sorbonne).
- Entwistle P.F. (1958). Mealybugs. A brief review of previous attempts at control. The Ghana farmer, 2 : 1-5.
- Forestier J. (1964). Relations entre l'alimentation du cafeier Robusta et les caracteristiques des sols. *Café Cacao Thé*, 8 (2) : 89-112.

- Freschet G.T., Violle C., Roumet C. & Garnier E. (2018). Interactions entre le sol et la végétation : structure des communautés de plantes et fonctionnement du sol. *In* : Les sols au cœur de la zone critique-écologie. ISTE éditions, Paris (France) : 83-99.
- ICCO (2015). Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLI, No. 2, Cocoa year 2014/15. International Cocoa Organization (ICCO), Westgate House, London, United Kingdom. <http://www.icco.org/statistics/otherstatistical-data.html>. Accessed 01 march 2023.
- Jagoret P. (2011). Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme : Application aux systèmes de culture à base de cacao au Centre Cameroun. Thèse de Doctorat unique, Montpellier supagro, 288 p.
- Kacou B. (2023). Évaluation du potentiel de fertilité du sol d'anciens vergers de caféiers et de cacaoyers dans une perspective de revalorisation au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire (Daloa). Thèse unique de doctorat, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 169 p.
- 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., Yoro R. G., N'Goran K., Assiri A. A. & Assa A. (2006). Identification des caractères morpho-pédologiques liés à la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *In*: Actes de la 15<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère. 9-14 Octobre 2006 San José, Costa Rica, 12 p.
- Leneuf N. & Tempier P. (1969). Données récentes sur la géologie de la Côte-d'Ivoire. Rapp. Inéd. Fac. Sc. Univ. Abidjan, 50p.
- Levêque A. (1972) : Les trois principaux types de toposéquences et les grands traits de la pédogenèse sur socle cristallophyllien du centre du Togo. *Bulletin liaison, Thème B, No 3, Mémoire ORSTOM*, 15-28.
- N'guessan B.V.H. Saley M., Oga Y., Yapi A. & Biémi J. (2017). Caractéristiques de la sécheresse hydrologique dans la région de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), 74p.
- N'guessan C.A., Abo K., Fondio L., Chiroleu F., Lebeau A., Poussier S., Wicker E. & Koné D. (2012). So Near and Yet so Far: The Specific Case of *Ralstoniasolanacearum* Populations from Côte d'Ivoire in Africa. *Bacteriology*, 102 : 733-740.
- Ollennu, L. A. A., J.d'A. Hughes, & G. K. Owusu. (1996). Mild strain cross-protection of cocoa against cocoa swollen shoot badnavirus. *Tropical Science* 36: 116-128.
- Ollennu, L.A.A., G.K. Owusu, & Thresh. J.M. (1989). The control of cocoa swollen shoot disease in Ghana. *Cocoa Growers' Bulletin* 42: 26-36.
- Schwartz D & Lanfranchi R. (1990). Origine et évolution des savanes intermayombiennes (R.P. du Congo), apports de la pédologie et de la bio-géochimie isotopique. *In*: Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique. ORSTOM, Paris (France), 314-325.
- 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.
- Yoro G. (2004). Reconnaissance des sols favorables aux cacaoyers. Cours de formation des producteurs de cacao et des agents ANADER détachés auprès de STCP. Convention CNRA-STCP. Document interne du CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 24 p.

## **Résumé : Etude des facteurs édaphiques sous cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) infectés par le swollen shoot dans la Région de la Marahoué au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire**

Le centre-ouest de la Côte d'Ivoire, principale zone de la production nationale du cacao connaît une production fortement menacée par la maladie du swollen shoot. La présente recherche vient explorer la voie édaphique dans la recherche de solution contre cette maladie, surtout que le sol, support naturel du cacaoyer, n'a été que très rarement objet d'étude portant sur la thématique du swollen shoot du cacaoyer. L'étude a été réalisée dans la région de la Marahoué, l'une des principales zones endémiques, sur un nombre total de six plantations réparties entre les départements de Bouaflé et de Kononfla. Dans chaque plantation, deux parcelles utiles de 100 m × 100 m chacune ont été délimitées, la première se situant dans la partie saine de la cacaoyère et la seconde, dans la partie infectée. A l'intérieur de chaque parcelle utile, un inventaire des espèces réservoirs du virus du swollen shoot ainsi qu'une étude pédologique ont été réalisés. L'enquête floristique a révélé logiquement une plus forte concentration dans les parcelles malades des plantes d'ombrage reconnues comme hôtes du virus responsable de la maladie. L'étude pédologique a montré que les sols des deux zones d'étude sont en général des Ferralsols (Eutric). Sur les trois sites de Bouaflé, lorsque les sols sont caractérisés entre 0 et 40 cm de profondeur par des taux relativement favorables (élevés) de P, N et Ca, couplés à une CEC et une somme des cations échangeables favorables (élevées), puis à un ratio K/S favorables (élevé) également, le swollen shoot est inexistant dans les cacaoyères. Par contre, avec un ratio C/N plus ou moins défavorable ( $\geq 13$ ) dans les sols et une accumulation du zinc vers la surface (entre 0 et 20 cm), mais aussi une accumulation des limons ou des sables entre 20 et 40 cm, la maladie se déclare. A Kononfla, la présence de la maladie dans les cacaoyères est avérée liée principalement à des teneurs élevées d'éléments grossiers dans les couches 0-20 cm des sols, puis de limon, de Mn et de Zn dans les couches 20-40 cm des sols. L'étude aura donc montré que la compaction du sol à faible profondeur par les limons et une charge élevée de cette partie du sol en éléments grossiers sont corrélées positivement à la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères. D'autre part, les résultats montrent que les sols en parcelles saines ont des états d'équilibre cationique plus intéressants. Au final, les contraintes agronomiques affichées par les sols en parcelles infestées et les bonnes dispositions présentées par les sols en parcelles saines ont conduit à poser un diagnostic précis de la présence de la maladie du swollen shoot dans les cacaoyères. Elle se déclare lorsque les conditions de nutrition minérale et hydrique dans le sol sont dégradées. La plante ne pouvant alors se nourrir correctement, est affaiblie. On pourrait donc lutter plus efficacement contre cette pathologie par une gestion durable de la fertilité du sol, notamment la pratique de l'agroforesterie et l'apport de fertilisants au sol.

**Mots clés : swollen shoot, sol, cacaoyers, Marahoué, Côte d'Ivoire.**

## **Summary : Study of edaphic factors under cocoa trees (*Theobroma cacao* L.) infected by swollen shoot in the Marahoué Region (Central-Western Côte d'Ivoire)**

West-central Côte d'Ivoire, the country's main cocoa-growing area, is under serious threat from swollen-shoot disease. The present research explores the edaphic pathway in the search for a solution to curb the advance of this disease, especially as the soil, the natural support of the cocoa tree, has very rarely been the subject of study on the theme of cocoa swollen-shoot. The study was carried out in the Marahoué region, one of the main endemic areas, on a total of six plantations divided between the Bouaflé and Kononfla departments. In each plantation, two useful plots of 100\*100 m each were delimited, the first in the healthy part of the cocoa plantation and the second in the infested part. Within each useful plot, an inventory of the host flora of the swollen-shoot virus and a soil survey were carried out. The floristic survey logically revealed a higher concentration in diseased plots of shade plants recognized as hosts of the virus responsible for the disease. The soil survey showed that the soils in both study areas are generally Ferralsols (Eutric). On the three Bouaflé sites, when the soils are characterized between 0 and 40 cm depth by relatively favorable (high) levels of P, N and Ca, coupled with a favorable (high) CEC and sum of exchangeable cations, followed by a favorable (high) K/S ratio, swollen-shoot is non-existent in the cocoa plantations. On the other hand, with a more or less unfavorable C/N ratio ( $\geq 13$ ) in the soils, coupled with zinc accumulation towards the surface (between 0 and 20 cm), but also an accumulation of silts or sands between 20 and 40 cm, the disease breaks out. In Kononfla, the presence of the disease in cocoa farms is linked to high levels of coarse elements in the 0-20 cm soil layers, followed by silt, Mn and Zn in the 20-40 cm soil layers. The study therefore showed that shallow soil compaction by silt and a high coarse element load in this part of the soil are positively correlated with the presence of swollen-shoot disease in cocoa farms. On the other hand, the results show that soils in healthy plots have more interesting states of cationic equilibrium. In the end, the agronomic constraints displayed by soils in infested plots and the good dispositions shown by soils in healthy plots lead to a precise diagnosis of the presence of swollen-shoot disease in cocoa farms: it occurs when mineral and water nutrition conditions in the soil are degraded. The plant is then unable to feed itself properly, and becomes weakened. This pathology could therefore be combated more effectively through sustainable soil fertility management, in particular agroforestry and soil fertilization.

**Key words : swollen shoot, soil, cocoa trees, Marahoué, Côte d'Ivoire.**