



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2022-2023

N° D'ORDRE : 077

CANDIDAT

Nom : KOFFI

Prénom : Antoine

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Agro-Pédologie

**Caractérisation agro-pédologique et cartographie de
l'aptitude culturelle des sols de nouvelles zones de
production hévéicole en Côte d'Ivoire : cas des
départements de Man, Toumodi et Prikro**

JURY

- Président** : M. KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Directeur** : M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Co-Directeur** : M. OBOUAYEBA Samuel, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)
- Rapporteur** : M. KONATE Zoumana, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Examineur** : M. ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Examineur** : M. KOFFI Kouablan Edmond, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)

Soutenue publiquement
le : 29/07/2023



**UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE
UFR AGROFORESTERIE**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2022-2023

N° D'ORDRE : 077

CANDIDAT

Nom : KOFFI

Prénom : Antoine

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Agro-Pédologie

**Caractérisation agro-pédologique et cartographie de
l'aptitude culturale des sols de nouvelles zones de
production hévéicole en Côte d'Ivoire : cas des
départements de Man, Toumodi et Prikro**

JURY

- Président** : M. KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Directeur** : M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Co-Directeur** : M. OBOUAYEBA Samuel, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)
- Rapporteur** : M. KONATE Zoumana, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Examineur** : M. ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE (UJLoG)
- Examineur** : M. KOFFI Kouablan Edmond, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)

**Soutenue publiquement
le : 29/07/2023**

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	vi
AVANT-PROPOS.....	vii
REMERCIEMENTS	viii
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xvi
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE	6
1.1. Caractérisation des sols	7
1.1.1. Définition et principes.....	7
1.1.2. Importance de la caractérisation des sols	8
1.1.3. Différents types de caractérisation.....	8
1.1.3.1. Caractérisation morpho-physique des sols	8
1.1.3.2. Caractérisation chimique des sols.....	9
1.1.3.3. Caractérisation biologique des sols	9
1.1.4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de Côte d'Ivoire.....	10
1.1.5. Cartographie des sols.....	11
1.2. Culture de l'hévéa.....	11
1.2.1. Historique et origine de l'hévéa	11
1.2.2. Contexte pédologique de l'hévéaculture	12
1.2.3. Zones hévéicoles traditionnelles en Côte d'Ivoire	13
1.2.4. Nouvelles zones hévéicoles en Côte d'Ivoire	13
1.2.5. Importance de l'hévéaculture.....	14
1.2.5.1. Importance socio-économique de l'hévéaculture	14
1.2.5.2. Importance environnementale de la culture de l'hévéa	15
1.2.5.3. Impact de l'hévéaculture sur les sols	16
1.2.6. Description de l'hévéa.....	17
1.2.6.1. Classification botanique de l'hévéa	17
1.2.6.2. Morphologie de l'hévéa	18

1.2.6.3. Cycle morphogénétique de l'hévéa.....	19
1.2.7. Exigences édaphiques.....	21
1.2.7.1. Sol d'hévéaculture	21
1.2.7.1.1. Caractéristiques physiques du sol	21
1.2.7.1.2. Texture du sol	21
1.2.7.1.3. Eléments grossiers	22
1.2.7.1.4. Hydromorphie.....	22
1.2.7.1.5. Caractéristiques chimiques du sol.....	22
1.2.8. Exigences climatiques	23
1.2.8.1. Pluviométrie	23
1.2.8.2. Température.....	23
1.2.8.3. Hygrométrie et ensoleillement	23
1.2.8.4. Vent.....	24
1.2.9. Itinéraire technique de la culture d'hévéa.....	24
1.2.9.1. Choix et préparation du terrain.....	24
1.2.9.2. Dispositif de plantation et densité des arbres	24
1.2.9.3. Fertilisation en hévéaculture	25
1.2.10. Facteurs limitants de la croissance végétative	25
1.2.10.1. Facteurs climatiques.....	25
1.2.10.2. Facteurs liés aux conditions d'établissement et d'entretien de la plantation	26
1.2.10.3. Facteurs liés à la récolte du latex des hévéas	26
1.2.10.4. Facteurs liés aux maladies, parasites et ravageurs	27
1.2.11. Technologies de récolte de latex	28
1.2.11.1. Système de saignée	28
1.2.11.2. Stimulation hormonale de la production de caoutchouc	29
1.3. Milieux d'étude	29
1.3.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	29
1.3.1.1. Localité de Man	29
1.3.1.2. Localité de Toumodi	29
1.3.1.3. Localité de Prikro.....	30
1.3.2. Climat de la zone d'étude	32
1.3.2.1. Climat de Man	32
1.3.2.2. Climat de Toumodi	32

1.3.2.3. Climat de Prikro.....	32
1.3.3. Végétation de la zone d'étude.....	34
1.3.3.1. Végétation de Man.....	34
1.3.3.2. Végétation de Toumodi.....	34
1.3.3.3. Végétation de Prikro	34
1.3.4. Contexte géomorphologique.....	34
1.3.4.1. Géologie et relief de Man.....	34
1.3.4.2. Géologie et relief de Toumodi.....	35
1.3.4.3. Géologie et relief de Prikro	35
1.3.5. Contexte hydrographique et hydrométrique	35
1.3.5.1. Hydrographie et hydrométrie de Man.....	35
1.3.5.2. Hydrographie et hydrométrie de Toumodi.....	36
1.3.5.3. Hydrographie et hydrométrie de Prikro	36
1.3.6. Contexte pédologique.....	36
1.3.6.1 Sols de la région de Man.....	36
1.3.6.2. Sols de la région de Toumodi.....	37
1.3.6.3. Sols de la région de Prikro	37
1.3.7. Milieu humain de la zone d'étude.....	37
1.3.7.1. Population de Man	37
1.3.7.2. Population de Toumodi.....	38
1.3.7.3. Population de Prikro	38
1.3.8. Activité socio-économique	38
1.3.8.1. Activité socio-économique de Man	38
1.3.8.2. Activité socio-économique de Toumodi	39
1.3.8.3. Activité socio-économique de Prikro.....	39
DEUXIEME PARTIE	40
2.1. Matériel	41
2.1.1. Matériel végétal.....	41
2.1.2. Matériel de terrain	42
2.1.3. Matériel de laboratoire	42
2.2. Méthodes	43
2.2.1. Choix des zones, des sites d'étude et enquête de terrain.....	43

2.2.2. Description du dispositif mis en place	43
2.2.3. Collecte des données	44
2.2.3.1. Données de sols	44
2.2.3.1.1. Propriétés morpho-physiques et classes des sols.....	44
2.2.3.1.2. Propriétés chimiques des sols	50
2.2.3.2. Données agronomiques	53
2.2.3.2.1. Mesure du taux de mortalité.....	53
2.2.3.2.2. Croissance isodiamétrique des arbres	53
2.2.3.2.3. Relevé d'encoche sèche	54
2.2.3.2.4. Production de caoutchouc	55
2.2.3.2.5. Micro diagnostic latex.....	56
2.2.4. Traitements des données.....	60
2.2.4.1. Comparaison des sols étudiés.....	60
2.2.4.2. Détermination du meilleur précédent cultural.....	61
2.2.4.3. Elaboration des cartes d'aptitudes culturales des sols	61
TROISIEME PARTIE.....	63
3.1. RESULTATS	64
3.1.1. Etat du développement et contrainte de l'hévéaculture dans les zones d'étude selon l'enquête	64
3.1.1.1. Etat du développement de l'hévéaculture	64
3.1.1.2. Contrainte au développement hévéicole	64
3.1.2. Caractéristiques morpho-physiques des sols des zones d'étude.....	66
3.1.2.1. Caractéristiques morphologiques des sols.....	66
3.1.2.2. Caractéristiques physiques	69
3.1.2.2.1. Granulométrie des sols.....	69
3.1.2.2.2. Teneurs en éléments grossiers des sols	72
3.1.2.2.3. Densité apparente des sols.....	73
3.1.2.2.4. Capacité de stockage en eau des sols	74
3.1.2.2.5. Réserve utile en eau des sols	75
3.1.3. Répartition des principaux caractères morpho-physiques des sols le long des toposéquences.....	75
3.1.4. Caractéristiques chimiques des sols	76
3.1.5. Identification des sols rencontrés dans les nouvelles zones hévéicoles	80

3.1.6. Carte des aptitudes culturales des sols des zones d'étude	85
3.1.7. Effet des propriétés des sols sur le comportement agronomique de l'hévéa	91
3.1.7.1. Effet de la profondeur	91
3.1.7.1. Effet de la texture.....	94
3.1.8. Effet de la densité de plantation	97
3.1.9. Effet des paramètres environnementaux.....	100
3.1.8. Relations entre paramètres agro-physiologiques, environnementaux et pédologiques..	
.....	106
3.2. DISCUSSION	109
3.2.1. Contexte pédologique de la zone dominé par les ferralsols et les cambisols	109
3.2.2. Zone à aptitude hévéicole variable selon les principales classes de sols rencontrées et la position topographique des sols	115
3.2.3. Production hévéicole corrélée aux précédents culturaux des sols	122
CONCLUSION	126
RECOMMANDATIONS	127
PERSPECTIVES.....	128
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	129

DEDICACE

A ma famille, principalement mon père et ma mère, pour leur compréhension, soutien et patience.

AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été possible grâce au financement du Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricole (FIRCA), dans le cadre du projet « **Caractérisation agro-pédo-climatique des nouvelles zones de production hévéicoles** » sous le contrat n° 690 FIRCA / CNRA / HEVEA / RE / 2012. Ce travail a été également possible grâce à l'appui scientifique du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) en collaboration avec le Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD) et l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (IN-PHB).

L'objectif global du projet est d'augmenter la production nationale de caoutchouc naturel par l'extension de l'hévéaculture aux zones marginales. Le projet a été exécuté au sein du Laboratoire d'Agronomie-Physiologie du Programme Hévéa du CNRA de Bimbresso, dirigé par Dr OBOUAYEBA Samuel, sous la coordination de Madame BOKO Chantal.

REMERCIEMENTS

Préparer une thèse est un travail d'équipe qui demande patience, tolérance et qui procure de nombreuses joies et amitiés. C'est une richesse tant sur le plan intellectuel qu'humain.

Aussi, voudrais-je signifier toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui, d'une façon ou d'une autre, ont permis ou contribué à la réalisation de cette étude.

Tout d'abord, je tiens à remercier Madame TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Professeur titulaire et Ex Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, qui a autorisé mon inscription en thèse au sein de ladite Université. Aussi, mes remerciements vont à l'endroit de Madame KROU épouse ADOHI Adjo Viviane, Professeur Titulaire et actuelle Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, qui après avoir repris les rênes de l'Université n'a pas lésiné sur les moyens afin de continuer spontanément les travaux légués par l'ex présidente et en me permettant ainsi de soutenir ma thèse de doctorat au sein de l'Université.

Je tiens particulièrement à témoigner mon infinie gratitude au Docteur SORO Dogniméton, Maître de Conférences, Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé, Chargé de la Pédagogie, de la Vie universitaire, de la Recherche et de l'Innovation, Directeur de cette Thèse. Patron, dès le début, puis, pendant ces années de travail, vous m'avez guidé dans toutes les étapes de cette thèse, tout en dirigeant mes pas vers ce monde merveilleux des Sciences du sol. Vous avez toujours été disponible malgré vos différentes charges administratives. Pour autant, je ne saurais trouver les mots justes pour vous exprimer ma gratitude pour la confiance que vous m'avez constamment accordée et le chemin que m'avez permis de parcourir grâce à vos critiques constructives, votre rigueur dans le travail et la constante sollicitude dont vous avez toujours fait preuve.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur KONE Issiaka, Professeur Titulaire et Vice-Président de l'Université Jean Lorougnon Guédé, Chargé de la Programmation, de la Planification et des Relations Extérieures pour ses encouragements et sa disponibilité.

J'associe à ces remerciements, Docteurs TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences et Directrice de l'UFR Agroforesterie de l'Université Jean Lorougnon Guédé et AYOLIE Kouablan, Maître de Conférences et Directeur du Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole, pour leurs disponibilités chaque fois que j'ai eu à les solliciter pour des questions administratives.

Mes remerciements spéciaux vont à l'endroit de l'infatigable Docteur OBOUAYEBA Samuel, Directeur de Recherche, lauréat du Prix de meilleur chercheur mondial sur l'hévéa, édition 2019 et du Prix de la meilleure action de valorisation de la recherche et de l'innovation, édition 2022 et Co-directeur scientifique de cette thèse qui, par son exemple de probité scientifique, n'a cessé de me guider. Ses qualités personnelles et professionnelles resteront pour moi une immense source d'enrichissement à tous les points de vue. Ce grand maître a toute mon estime, mon entière admiration et ma reconnaissance pour tout ce qu'il a fait et continue de faire pour moi.

Aussi, voudrais-je tout particulièrement remercier tous les membres de mon jury de thèse, éminentes personnalités du monde scientifique, qui ont jugé et accepté ce travail. Je remercie Monsieur KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire, d'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens sincèrement à remercier le Docteur ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé, le Docteur KOFFI Kouablan Edmond, Directeur de Recherche au Centre National de Recherche Agronomique, d'avoir accepté d'être les examinateurs et de participer au jury de ma thèse.

Ma reconnaissance s'adresse également au Docteur KONATE Zoumana, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir accepté d'être le rapporteur et de participer à mon jury de thèse.

Que Docteur DIOMANDE Métangbo, Maître-Assistant à l'Université Péléforo Gon Coulibaly trouve ici, l'expression de ma gratitude pour avoir contribué à l'identification du sujet de thèse et à l'amélioration de ce présent manuscrit.

Aux enseignants-chercheurs, chercheurs, et au personnel d'appui technique de l'Université Jean Lorougnon Guédé, je témoigne ici toute ma reconnaissance.

Le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) a servi de cadre d'études et nous a ainsi permis d'effectuer nos manipulations au sein du Laboratoire d'Agronomie-Physiologie du Programme Hévéa à Bimbresso.

Que Docteur SANGARE Abdourahamane, Directeur Général du CNRA, trouve ici l'expression de ma gratitude pour m'avoir accueilli dans ladite structure. J'associe à ces remerciements Docteur KONAN Jean Louis, Directeur de la Recherche et de l'Innovation (DRI) du CNRA pour m'avoir permis de réaliser mon stage au sein de l'institution.

Je remercie Docteur TRAORE Issiaka, Directeur de la Station de Recherche CNRA de Bimbresso, pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires à la réalisation de ces travaux.

Ma reconnaissance va aussi et tout particulièrement à Docteur ELABO Angéline Epse KONGOHO, Chef du Programme Hévéa pour ses remarques judicieuses et ses conseils.

Je remercie les chercheurs de la Station de Recherche de Bimbresso, pour leurs assistances et encouragements au cours de mes travaux. Ce sont : Docteurs KONAN Djézou, OKOMA Muriel et ESSEHI Jean Lopez pour m'avoir servi de guide et de modèle par leur assiduité, rigueur et amour du travail bien fait qu'ils m'ont appris durant mon parcours de thèse. Aussi, je n'oublie pas les Docteurs YAO Alban, OTRO Vawa Serge, LEHI Malady Iréné, MORO Affia Perpétue, N'GUETTA Adélaïde, JOSEPH Kouamé Kouassi James, KOUAKOU N'Guessan Kan Pulchérie et YEO Lassina pour leurs conseils et l'exemplarité qu'ils m'ont montré dans le travail.

A mes camarades thésards : KONAN Kan Ulrich, ZELE Bogui Marc Fabien, ESMEL Jean Martial, KOUAKOU Hervé Michel, TOURE Ambeyin et YEO Djakaridja, j'adresse toutes mes reconnaissances pour leurs soutiens fraternels.

Je témoigne toutes mes gratitude à tout le personnel de la station de Bimbresso et particulièrement à N'DRI Yao Benoît, KABORE Ferdinand, WOUSSOU Kra Fabrice, BOLE Lydie, KOUADIO N'Dri Evariste et AYERO Rodrigue.

Ma reconnaissance va également à l'endroit de mes amis : OUAGUE Nabil Hyssa, GNAGNE Vianney, KOUAKOU Wilson, DIE Kagnonblé Hermann et KOUASSI Aka Mohamed pour leurs encouragements et leurs soutiens lors de mes travaux de thèse.

Je tiens à remercier enfin tous les membres de ma famille pour m'avoir soutenu durant mon cursus universitaire, notamment mes oncles KOFFI Alain, KOFFI Paul, ETTIEN Alphonse, ETTIEN Casimir, KOUADOU Rodolphe et TOURE Adama, je vous suis reconnaissant à jamais. Merci très chers parents et surtout à ma fille Chérie KOFFI Aya Eunice et à sa mère Mademoiselle GORE Lou Tinan.

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

SIGLES

ANRPC	: Association of Natural Rubber Producing Countries
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CHP	: Compagnie Hévéicole de Prikro
CPCS	: Commission de Pédologie et de Classification des sols
FDH	: Fonds de Développement Hévéa
GLM	: Modèle Linéaire Général
GPS	: Global Positioning System
GT	: Gondang Tapen (clone d'hévéa)
INPHB	: Institut National Polytechnique Houphouët Boigny
JBG	: Jardin à Bois de Greffes
MDL	: Micro Diagnostic Latex
MDP	: Mécanisme de Développement Propre
NPK	: Azote Phosphore Potassium
PB	: Prang Besar (région de Malaisie où ont été créés les clones PB dont PB 260, PB 235, PB 217)
PIB	: Produit Intérieur Brut
RGPH	: Recensement General de la Population et de l'Habitat
RRIM	: Rubber Research Institute of Malaysia
SMI	: Société des Mines d'Ity
UPGC	: Université Péléforo Gon Coulibaly
WRB	: World Reference Base for soil (Base de Références Mondiale pour les ressources en Sols)

ACRONYMES

AFNOR	: Association Française de Normalisation
ANADER	: Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
ANOVA	: Analyse Of Variance (Analyse de variance)
APROMAC	: Association des Professionnels du Caoutchouc naturel de Côte d'Ivoire
BNETD	: Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
CEDEAO	: Communauté Economique des États de l'Afrique de l'Ouest

CIRAD	: Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
ESA	: Ecole Supérieure d'Agronomie
FAO	: Food and Agriculture Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FIRCA	: Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricole
IRCA	: Institut de Recherche sur le Caoutchouc en Afrique
MINAGRA	: Ministère de l'Agriculture
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé

ABREVIATIONS

Accroi	: Accroissement
Année Créat	: Année de création
AssCult	: Culture associée
BV	: Bas de Versant
C	: Carbone
Circf Moy	: Circonférence moyenne enregistrée au cours de l'année
CSE	: Capacité de Stockage en eau du Sol
CT	: Coefficient de Transformation
Da	: Densité Apparente
DensitéPlt	: Densité de plantation
DO	: Densité Optique
DTNB	: Acide dinitro-2,2'-dithio-5,5'-dibenzoïque
EG	: Élément Grossier du sol
ES	: Encoche Sèche
Ext.Sec	: Extrait sec
HV	: Haut de Versant
kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹	: Kilogramme par hectare et par année
LEM (%)	: Pourcentage de longueur d'encoche malade
m.a	: Matière Active
mmol.l ⁻¹	: Millimoles par litre

MO	: Matière organique
MoyAccrsmt	: Moyenne de l'accroissement
Muell. Arg	: Muller Argoviensis
MV	: Mi-Versant
Nbre plant mort	: Nombre de plant mort,
Nbre total de plant	: Nombre total de plant
Pf	: Poids frais
pH	: Potentiel Hydrogène
Pi	: Phosphore inorganique
Produc	: Production
RSH	: Groupement thiol
RU	: Reserve Utile
S	: Somme des Bases Echangeable
Sacc	: saccharose
TCA	: Acide trichloracétique
Text	: Texture
TNB	: Acide thio-nitro benzoïque
Topo	: Toposéquence
Tx Mortalité	: Taux de mortalité
UC	: Unité Cartographique
V	: Taux de saturation

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Principales caractéristiques des clones d'hévéa étudiés	41
Tableau II : Niveaux critiques d'interprétation des valeurs de quelques éléments chimiques .	52
Tableau III : Echelle de notation des longueurs d'encoches sèches.....	54
Tableau IV : Valeurs de référence des quatre paramètres physiologiques du Micro Diagnostic Latex (MDL).....	60
Tableau V : Critères d'appréciation des sols pour l'hévéaculture	62
Tableau VI : Nombre de planteurs d'hévéa et superficies plantées dans la zone d'étude.....	64
Tableau VII : Caractéristiques morphologiques des sols des zones d'étude	68
Tableau VIII : Compositions granulométriques des sols.....	71
Tableau IX: Proportion des éléments chimiques dans les sols des localités d'étude	79
Tableau X : Production moyenne de caoutchouc en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités.....	92
Tableau XI : Taux de longueur d'encoche malade et d'encoche sèche en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités	93
Tableau XII : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités	94
Tableau XIII : Accroissement moyen annuel des arbres d'hévéa en fonction de la texture du sol	95
Tableau XIV : Production des arbres d'hévéa en fonction de la texture du sol.....	95
Tableau XV: Sensibilité à l'encoche sèche des des arbres d'hévéa en fonction de la texture du sol	96
Tableau XVI : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la texture du sol	97
Tableau XVII : Production moyenne de caoutchouc en fonction de la densité de plantation..	99
Tableau XVIII : Taux de longueur d'encoche malade et d'encoche sèche en fonction de la densité de plantation des arbres.....	99
Tableau XIX : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la densité	100
Tableau XX : Coefficients de corrélation entre les paramètres agro-physiologiques, les paramètres environnementaux et les axes de l'ACP	101
Tableau XXI : Production moyenne de caoutchouc en fonction du précédent cultural	105
Tableau XXII : Taux de longueur d'encoche malade et d'encoche sèche en fonction de la du précédent cultural	105

Tableau XXIII : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction du précédent cultural	106
Tableau XXIV : Matrice de corrélation entre paramètres agro-physiologiques, environnementaux et pédologiques	108

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de l'hévéa, <i>Hevea brasiliensis</i>	19
Figure 2 : Représentation schématique des quatre stades du cycle morphogénétique de chaque unité de croissance de l'hévéa	20
Figure 3 : Carte des zones d'étude	31
Figure 4 : Diagramme ombrothermique des départements d'étude, de 1990 à 2020.....	33
Figure 5 : Différentes phases de mesure <i>In situ</i> de la densité apparente par la méthode au sable	46
Figure 6 : Prélèvement de sol à la carrière	48
Figure 7 : Prélèvement du latex sur un pied d'hévéa en saignée descendante	57
Figure 8 : Processus de constitution du sérum-TCA.....	58
Figure 9 : Aspects des paysages observés dans la zone d'étude ; a : Plantation après feu de brousse ; b : Sol présentant des cuirasses ; c : Sol compact d : Plantation d'hévéa réussie	65
Figure 10 : Distribution de la charge en éléments grossiers des sols de la zone d'étude	72
Figure 11 : Densité apparente des sols des localités d'étude	73
Figure 12 : Capacité de stockage en eau des sols des localités d'étude	74
Figure 13 : Réserve utile en eau des sols des localités d'étude.....	75
Figure 14 : Représentation des positions topographiques et des principaux caractères morpho-pédologiques	76
Figure 15 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Man.....	81
Figure 16 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Toumodi.....	83
Figure 17 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Prikro	84
Figure 18 : Carte des aptitudes culturales des sols à l'hévéa du département de Man.....	86
Figure 19 : Carte des aptitudes culturales des sols à l'hévéa du département de Toumodi	88
Figure 20 : Carte des aptitudes culturales des sols à l'hévéa du département de Prikro	90
Figure 21 : Influence de la profondeur du sol sur l'accroissement en fonction des localités A : plantation immature, B : plantation mature	91
Figure 22 : Evolution de la circonférence moyenne des plants en fonction de la densité.....	98
Figure 23 : Diagramme de l'ACP basé sur les relations agro-physiologiques et les paramètres du biotope.....	102
Figure 24 : Taux de mortalité des plants en fonction du biotope et de la localité	103
Figure 25 : Accroissement moyen annuel des plants immatures en fonction du biotope et de la localité.....	104

LISTE DES ANNEXES

ANNEXES	xx
Annexe 1 : Fiche d'enquête	xxi
Annexe 2 : unités cartographiques et des potentialités agronomiques	xxiv
PUBLICATIONS	a

INTRODUCTION

Le développement de la Côte d'Ivoire repose sur l'agriculture qui contribue à elle seule à près de 27 % du Produit Intérieur Brut (Banque mondiale, 2021). Elle emploie les 2/3 de la population active et fournit avec le secteur agro-industriel plus de 40 % des recettes d'exportation (Kouadio, 2016). Jusqu'à une époque récente, l'agriculture constituait avec le binôme café-cacao, le pilier de l'économie ivoirienne (Ducroquet *et al.*, 2017). Ces deux cultures ont longtemps soutenu la croissance économique, en générant des milliers d'emplois et des recettes considérables à l'Etat. Depuis les années 1980, l'on a assisté à un essoufflement de ces spéculations, dû à l'instabilité des prix d'achat sur le plan international. Pour réduire ces effets sur l'économie, l'Etat de Côte d'Ivoire s'est orienté vers une politique de diversification de ses cultures d'exportation (Keli, 2003), comme l'hévéaculture et l'élaéculture qui, depuis quelques années, occupent une place prépondérante dans l'économie du pays (Keli, 2003).

L'hévéaculture a été introduite en Côte d'Ivoire vers les années 1950 par des opérateurs privés (Canh, 1999). Elle restera un monopole des entreprises agro-industrielles jusqu'en 1978 avant de connaître une phase de vulgarisation qui suscitera l'adhésion des populations au cours des années 1980. En effet, en plus de la production, l'exploitation de l'arbre a favorisé la création de divers emplois sur la chaîne de valeur du caoutchouc. Cette culture revêt un intérêt économique très important car apporte des ressources financières à l'Etat et est aussi un facteur de réduction du taux de pauvreté en milieu rural (Toguila *et al.*, 2016).

Grâce aux devises et aux nombreuses possibilités d'utilisation qu'il génère, le caoutchouc naturel occupe une place importante dans l'économie mondiale. La quantité de caoutchouc produite en 2022, au niveau mondial, est estimée à 14,6 millions de tonnes (ANRPC, 2023). Quarante-huit pourcent (48 %) de cette production proviennent de l'Asie et huit pourcent (8 %) de l'Afrique. La Côte d'Ivoire est le premier pays producteur de caoutchouc en Afrique et le troisième au niveau mondial derrière l'Indonésie et la Thaïlande, avec une production de 1 387 000 tonnes de caoutchouc en 2022 (APROMAC, 2023), pour un chiffre d'affaires annuel de plus de 495 milliards de franc CFA (Kouassi, 2018).

L'hévéaculture ivoirienne couvre aujourd'hui une superficie de 600 000 hectares dont 482 141,19 hectares en saignée (APROMAC, 2023). Depuis son introduction, la production ivoirienne de caoutchouc naturel n'a cessé de croître. Ainsi, de 100 tonnes en 1960, la Côte d'Ivoire a produit près de 100 000 tonnes en 2000, 200 000 tonnes en 2007 et 310 000 tonnes en 2011 (Ruf, 2012). Cette production est passée à 480 000 tonnes en 2016 à 1 100 000 tonnes en 2021 dépassant donc la barre symbolique de 1 000 000 de tonnes que le pays envisageait atteindre qu'en 2025 (APROMAC, 2023).

Le principal déterminant de ce boom du caoutchouc naturel ivoirien est lié aux statuts pédologiques et climatiques favorables des zones pionnières (le sud du pays) de la culture de l'hévéa. En effet, le sud du pays est soumis à un climat équatorial de transition, caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 1710 mm, bien répartie sur toute l'année (Brou, 2010). Cette situation constitue une condition importante pour le maintien de la réserve en eau du sol et la recharge de la nappe souterraine (Banton & Bangoy, 1997 ; Aké *et al.*, 2018). Par ailleurs, la profondeur des sols dans ces zones est supérieure à 1,5 mètres, ce qui permet un développement des racines pivotantes et améliore les possibilités d'approvisionnement en eau de la plante en saison sèche (Essehi, 2019). En outre, ces sols sont riches en phosphore et en matière organique et le pH oscille entre 5,5 et 6 (Ettien *et al.*, 2022). Les progrès réalisés au niveau de l'amélioration génétique, de l'agronomie et des technologies de récolte du latex, viennent ensuite favoriser le développement de l'hévéaculture. L'engouement des populations à la création de nouveaux vergers qui concourt à l'extension de l'hévéaculture à de nouvelles zones de production, participe aussi à l'augmentation de la production de caoutchouc ivoirien (Obouayeba, 2005 ; Elabo *et al.*, 2022).

Malgré ces avancées, des contraintes subsistent et doivent être levées pour atteindre les nouveaux objectifs fixés par les acteurs de la filière. Ceux-ci prévoient une superficie de 800 000 hectares dont environ 560 000 en saignée, pour une production de caoutchouc estimée à 2 000 000 tonnes à l'horizon 2025. La saturation foncière en zones forestières, les pressions parasitaires, le vieillissement du verger et le faible niveau d'adoption des itinéraires techniques préconisés par la recherche, pourraient contrarier cet objectif.

Ainsi, l'augmentation des aires plantées avec du matériel de plantation performant, adapté aux conditions pédoclimatiques du milieu et dans les limites des superficies cultivables disponibles s'avèrent nécessaire. En effet, les cultures de rente (hévéa, palmier à huile, cocotier, etc.) pérennes, pour la plupart et les cultures vivrières se disputent activement les terres cultivables (Yoro & Godo, 1983 ; Brou, 2010). Face à cette situation, les acteurs de la filière dont l'Association des Professionnels du Caoutchouc naturel de Côte d'Ivoire (APROMAC) encouragent et recommandent la création des plantations d'hévéa dans les zones dites marginales. Selon Omont (1982), Compagnon (1986) et Elabo *et al.* (2022), pour cultiver convenablement l'hévéa, il faut éviter de descendre en dessous de 1500 mm de pluie par an. Cette isohyète a servi de référence pour partager la Côte d'Ivoire en zones favorables (zones traditionnelles) et défavorables (zones marginales). Ainsi, de nombreux petits agriculteurs développent actuellement des plantations d'hévéa dans des régions du centre, de l'est et de l'ouest du pays. Cependant, les informations sur les caractéristiques pédoclimatiques de ces

zones semblent insuffisantes pour une bonne planification de la culture d'hévéa dans ces localités. En effet, le besoin d'expansion de l'hévéaculture en Côte d'Ivoire ne saurait être satisfait réaliser sans la prise en compte des aspects scientifiques et techniques à savoir la connaissance des sols et leur interaction avec l'environnement, la mise en place de systèmes agricoles adéquats adaptés aux sols et l'amélioration des pratiques traditionnelles qui déterminent la pratique d'une agriculture durable et efficace (N'Guessan *et al.*, 2015).

Ainsi, le rôle du pédologue est primordial dans cette approche importante et multidisciplinaire. En effet, la pratique d'une agriculture durable implique la connaissance du peuplement végétal cultivé et la qualité du sol qui constituent la base de toute production agricole (Koné, 2007 ; Soro *et al.*, 2011). Conscient de ce fait, l'étude des sols en Côte d'Ivoire a très vite commencé avec l'équipe de pédologie de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM).

Les travaux de Yoro (1982) et Yao-Kouamé (2008) indiquent que la majorité des sols de contact forêt-savane sont soumis aux processus de remaniement et d'induration. Les sols contiennent donc suffisamment d'éléments grossiers et leur profondeur est limitée par la cuirasse, par endroit, qui constitue des obstacles au développement des racines et réduisent les réserves en eau du sol (Assié *et al.*, 2012 ; Nestor *et al.*, 2013). Ils peuvent, ainsi, freiner le développement de l'hévéa qui a un système racinaire à la fois pivotant et traçant. Pour l'hévéaculture, il faut rechercher des sols profonds contenant moins de 50 % d'éléments grossiers.

Face aux grands enjeux du développement durable, la connaissance et la maîtrise des caractères physiques et chimiques des sols des nouvelles zones hévéicoles apparaissent nécessaire pour la durabilité de cette culture dans ce nouvel environnement. C'est dans cette optique que la présente étude s'est appuyée sur l'hypothèse générale de la présence de sols aptes à la culture de l'hévéa dans ces nouvelles zones de production. Plus spécifiquement, il est supposé que :

- les nouvelles zones d'extension hévéicole comportent des sols favorables au développement durable de l'hévéa ;
- le comportement agronomique et physiologique des hévéas varie d'un sol à un autre.

L'objectif général de cette étude est de caractériser les paramètres agro-pédologiques de nouvelles zones d'extension de la culture d'hévéa en Côte d'Ivoire pour l'amélioration de la production nationale. De manière spécifique, il s'agit de :

- déterminer le potentiel des sols vis-à-vis de la culture de l'hévéa à Man, Toumodi et Prikro ;

- identifier les types de sol et leurs répartitions selon leurs aptitudes à l'hévéaculture, sur la base de leurs propriétés physico-chimiques ;
- évaluer le comportement agronomique et physiologique de l'hévéa dans ces trois nouvelles zones hévéicoles.

Outre l'introduction et la conclusion suivie de recommandations et de perspectives, la première partie est consacrée aux généralités relatives aux caractérisations des sols, la culture de l'hévéa et le milieu d'étude ; la deuxième traite du matériel et des méthodes ; la troisième est relative aux résultats et à la discussion.

PREMIERE PARTIE

Généralités

1.1. Caractérisation des sols

1.1.1. Définition et principes

La caractérisation pédologique est définie comme étant le fait de mettre en relief, avec précision, les caractères pédologiques distincts d'un sol (Yoro, 2001). La caractérisation du sol est une opération délicate, souvent fort longue à réaliser. Cela implique un ensemble très différent de technologies qui ne peuvent pas être mises en œuvre simultanément et sont souvent mises en œuvre par différentes personnes.

Il faut tout d'abord opérer une caractérisation très précise du lieu où est observé le sol, définir son environnement par des données climatiques, la végétation qu'il supporte, la nature de la roche-mère, la géomorphologie qui commande, dans une certaine mesure, le drainage, l'abondance des roches, l'érosion.

Dans un deuxième temps, il faut décrire soigneusement le sol horizon par horizon et donner les caractéristiques essentielles qui sont la couleur, la texture, la structure, la porosité, la consistance, la cohésion, l'enracinement, etc.

La description du sol effectuée sur le terrain, doit être complétée par des déterminations variées au laboratoire. Des mesures physiques permettent de donner des valeurs chiffrées aux appréciations du terrain en ce qui concerne la texture et la structure. On précise le comportement du sol vis-à-vis de l'eau. Le complexe absorbant est étudié à son tour (capacité d'échange, bases échangeables, degré de saturation). Les propriétés ioniques telles que la réactivité et le potentiel redox font l'objet de mesure. Le dosage des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes, des sels, contribue également à la compréhension des sols par la mise en œuvre des techniques physiques modernes.

Mais, comme le sol est également un milieu vivant, sa caractérisation biologique fait apparaître une richesse considérable à la fois dans le domaine de la microflore (bactéries, champignons, etc.), microfaune (protozoaires, nématodes) ou faune (acariens, termites, fourmis, etc.).

La caractérisation des sols est donc une opération longue et complexe. Une conclusion sur chaque horizon et sur chaque sol ne peut donc intervenir immédiatement. Les formulations qui ont pu être faites sur le terrain doivent être complétées et confirmées par des analyses au laboratoire.

1.1.2. Importance de la caractérisation des sols

La plupart du temps, la caractérisation permet de déterminer la qualité des sols avant la mise en œuvre de projets susceptibles d'affecter les sols, les plantes ou autres éléments en libérant des polluants ou des matériaux dans l'environnement (Yoro, 2001). Dans le domaine agricole, pratiquer une agriculture durable, nécessite une compréhension de la relation entre les populations de plantes cultivées et la qualité du sol, car ces deux facteurs déterminent l'efficacité et la durabilité du système de culture. Cependant, dans les régions tropicales humides, la mise en valeur des terres rencontre des difficultés liées à des pratiques agricoles inadéquates aux caractéristiques des sols (Mbonigaba *et al.*, 2009 ; Nangah *et al.*, 2012). Par conséquent, la connaissance et la maîtrise des propriétés physiques et chimiques des sols des terres agricoles est une condition préalable à une bonne pratique agricole. La caractérisation d'un sol doit être réalisée par un professionnel du domaine sol.

1.1.3. Différents types de caractérisation

Le sol constitue un milieu naturel pour la croissance des plantes. Il peut être différencié en horizons. Les différences morphologiques, chimiques et biologiques dues à la variation du matériau de base et des conditions climatiques permettent d'étudier ou de caractériser le sol sous différents angles.

1.1.3.1. Caractérisation morpho-physique des sols

Du point de vue de ses caractéristiques physiques, le sol peut être considéré comme un système poreux à trois phases : solide, liquide, gazeuse. Certaines des caractéristiques de ce système sont permanentes ; c'est le cas de la constitution physique du matériau : granulométrie, morphologie et espèce minéralogique des particules élémentaires (Henin, 1976). De façon très globale, un matériau déterminé peut être caractérisé une fois pour toutes par sa texture, qui traduit l'influence sur son comportement des différents constituants et des interactions qui se manifestent entre eux (Citeau *et al.*, 2008). D'autres éléments de description sont plus contingents : la structure, bien qu'elle dépende de la texture, varie en fonction de l'intervention de facteurs climatiques (pluie, gel, sécheresse), biologiques (racines des végétaux, micro-organismes et macroorganismes du sol) et mécaniques (agriculture, génie civil, etc.). Les propriétés physiques dépendent naturellement des proportions d'éléments constituants, mais aussi, de la façon dont ses éléments sont associés entre eux pour former des unités structurales. Il résulte de ces considérations que la notion de caractérisation physique des sols prend plus en compte la texture et la structure du sol. A ces propriétés, il faut ajouter les mesures physiques

suivantes : la densité apparente, la densité réelle, l'infiltration, la perméabilité, la porosité, la compacité.

1.1.3.2. Caractérisation chimique des sols

Le sol est un complexe chimique dans le système qui comprend également des réactions diverses. En d'autres termes, en fonction de certains facteurs environnementaux, le sol peut se comporter comme un agent oxydant ou un agent réducteur contre certaines éléments chimiques (Duchaufour, 1997). Cette fonctionnalité qu'a le sol permet d'étudier ses paramètres chimiques.

L'analyse chimique des sols est utilisée par les pédologues pour préciser les bases de la classification des sols, mais également pour caractériser un ensemble de propriétés qui agissent directement ou indirectement sur la croissance des plantes (Baize *et al.*, 2014).

Le principal intérêt de l'analyse des sols est de donner, par un test sur un échantillon prélevé à un moment quelconque de l'année, avec ou sans culture, des renseignements fondamentaux sur la nature du milieu qui doit servir à l'alimentation des plantes.

La difficulté réside dans le choix des techniques analytiques et dans le fait que chaque résultat d'analyse doit faire l'objet d'une interprétation en fonction de la méthode utilisée, du type de culture, du type de sol, du climat, etc. La caractérisation initiale permet d'établir la qualité des sols avant la réalisation d'un projet agricole ou industriel susceptible de l'affecter par le rejet de contaminants ou de matières dans l'environnement (Baize *et al.*, 2014). Elle permet aussi d'éviter certaines dépenses dans le cas de la fertilisation par exemple. Il est donc impératif que les agriculteurs aient une connaissance de base non seulement sur leur sol, mais ceux-ci doivent aussi parvenir à mettre en relation la qualité du sol et la culture à mettre en place. Cela leur permettra de faire le choix du terrain et de savoir comment introduire des améliorations à des sols pauvres ou à fertilité modérée, en vue de permettre une bonne croissance et un bon développement de la plante cultivée (N'Guessan *et al.*, 2015).

1.1.3.3. Caractérisation biologique des sols

La caractérisation biologique des sols fait référence à l'étude de la diversité et à l'activité des organismes vivants qui participent au fonctionnement du sol (Thoumazeau *et al.*, 2019). En effet, la présence de racines, d'animaux et de micro-organismes dans le sol est en interaction avec ses propriétés physiques et chimiques (structure, dynamique MO, solution du sol...). Cette présence d'êtres vivants est synonyme d'activité biologique. Celle-ci est en interaction avec d'une part sa composition physique, sa dynamique (transformation des minéraux,

enrichissement en MO et porosité), la stabilité de sa structure et d'autre part avec la composition chimique du sol (minéralisation). La caractérisation peut inclure l'évaluation de la biomasse microbienne, de la respiration du sol, de la teneur en matière organique, ainsi que de la diversité et de la densité des communautés microbiennes. En mesurant la diversité et l'activité des organismes vivants dans le sol, la caractérisation biologique peut fournir des informations importantes sur la santé du sol et sur sa capacité à soutenir les plantes et les cultures. Une bonne santé biologique du sol est essentielle pour maintenir la qualité du sol et la fertilité à long terme, ainsi que pour réduire les impacts environnementaux des pratiques agricoles.

1.1.4. Caractéristiques physico-chimiques des sols de Côte d'Ivoire

Le sol constitue une interface entre la roche, l'atmosphère et l'hydrosphère (Alloway, 1995). Il est formé à partir des roches et comprend des constituants secondaires minéraux ou organiques qui sont dotés de propriétés spécifiques (Alloway, 1995). En effet, le sol provient de la roche mère qui, au départ, affleure en surface. Les propriétés du sol peuvent varier en fonction de la pente ou du type de matériau parental (Girard *et al.*, 2005).

Les recherches pédologiques en Côte d'Ivoire ont commencé dès l'indépendance. Les premiers travaux ont été ceux de Perraud (1967), Dago (1970), Assa (1976), Yoro (1982), Camara (1989), etc., qui ont œuvré à l'essor de la pédologie dans le pays, tant à l'Université, que dans des structures comme ORSTOM, BEDPA, AVB, etc. Boyer, (1982) et Humbel (1974, 1976) ont décrit la fertilité des sols depuis la zone forestière de la Côte d'Ivoire jusqu'à la zone de savane au nord. Ils ont également réalisé des travaux sur la compacité et la variation de la porosité des sols ferrallitiques. De ces travaux, il ressort qu'une grande majorité des sols présentent les propriétés suivantes :

- une acidité comprise entre 4,5 et 6,5 sur une grande partie des sols du pays ;
- une teneur en matière organique variant de 3-6 % dans la basse Côte d'Ivoire jusqu'à 2-3 % dans le reste du pays.
- une capacité d'échange des cations toujours inférieure à 10 mé/100g de terre ;
- un taux de saturation en base généralement faible à moyen, compris entre 20-70 % ;
- une altération très poussée des minéraux aboutissant à la libération du manganèse, du fer et quelque fois de l'aluminium.

On retient donc que les sols ferrallitiques de la Côte d'Ivoire ont une fertilité chimique médiocre à moyenne, avec une acidité élevée et un risque élevé de carence en phosphore, en azote et en soufre. La teneur en aluminium peut être une contrainte au développement des cultures (Camara, 1989). Dans la zone forestière, le phosphore s'avère être un élément limitant

pour les cultures annuelles, alors que c'est l'azote qui joue ce rôle dans la zone de savane (Gigou, 1992).

Du point de vue morphologique, les sols sont plus profonds (de 1 à 4 m) en zone de forêt que dans le reste du pays où la profondeur est inférieure à 3m.

1.15. Cartographie des sols

La cartographie des sols est une méthode qui permet de représenter graphiquement les différentes unités de sol présentes sur un territoire donné (McBratney *et al.*, 2003). Cette méthode consiste en la création de cartes des sols qui présentent les caractéristiques des sols telles que leur nature, leur texture, leur couleur, leur pH, leur profondeur, leur composition minérale et organique, leur aptitude à la culture, etc.

La cartographie des sols est réalisée à partir de données collectées sur le terrain, telles que des échantillons de sol, des observations directes, des mesures de terrain, des relevés topographiques, etc. Ces données sont ensuite traitées et analysées pour identifier les différentes unités de sol présentes sur le territoire étudié.

La cartographie des sols peut être utilisée pour la planification de l'utilisation des terres et la gestion des ressources naturelles, elle peut être utilisée pour identifier les zones les plus propices à certaines cultures, pour planifier l'aménagement du territoire ou encore pour évaluer les impacts environnementaux des activités humaines. Aussi, la cartographie des sols peut être utilisée pour évaluer la fertilité des sols et pour la prévention des risques naturels.

1.2. Culture de l'hévéa

1.2.1. Historique et origine de l'hévéa

L'hévéa est originaire du bassin amazonien, précisément du Brésil. Les civilisations précolombiennes d'Amérique du nord connaissaient le caoutchouc. Sur ce continent, le caoutchouc était utilisé pour fabriquer des ballons pour les jeux d'adresse rituelle (Dusotoit, 2009). Des siècles plus tard, le savant français Charles de la Condamine, après son voyage en 1736 en Amérique, a fait découvrir le caoutchouc aux Français. Il en fit la description scientifique et envoya un échantillon à l'académie des sciences avec un mémoire explicatif. Cent ans après la découverte de la Condamine, Charles Goodyear découvrit qu'en chauffant un mélange de caoutchouc et de soufre, on stabilise définitivement les qualités élastiques du caoutchouc : c'est la vulcanisation. Ce procédé a permis le développement de la pneumatique. Cependant, le produit reste inaccessible du fait de son coût élevé qui en limite sa consommation,

et fait de Manaus une capitale très riche, car le monopole était détenu par le Brésil. Dans le but de briser ce monopole, Wickham, planteur britannique installé au Brésil en 1876, recueillit 70 000 graines d'hévéa le long de la rive gauche du Tapajos, qu'il achemine dans le sud-est asiatique (Michels, 2005 ; Penot, 2016). Selon ces auteurs, seulement 4% de ces graines ont germé et 22 plants arrivèrent en bon état à Singapour. Ces 22 plants sont à l'origine de la presque totalité des plantations d'hévéa dans le monde. L'hévéa fit son apparition en Afrique au XIX siècle. Le Ghana fut le premier pays africain où l'hévéa a été introduit en 1893. Ensuite ont suivi la Guinée et le Congo, entre 1897 et 1898. En Côte d'Ivoire, la première plantation fut créée par Malcrost en 1953 à Pakidié, dans la région de Dabou, avec 100 ha de "seedlings" (Ruf, 2012). Dès sa création en 1956, l'Institut de Recherche sur le Caoutchouc (IRCA) a œuvré pour le développement de cette culture dans le pays. A cet effet, l'hévéaculture en Côte d'Ivoire a connu trois grandes périodes dans son évolution. La première période a débuté en 1953 où se sont installées les plantations industrielles sous la supervision de l'Etat, dans les régions du sud-est et du sud-ouest (Ruf, 2012). Au cours de cette période, de grands ensembles agro-industriels (SAPH, CCP, SOGB) furent installés à Dabou, Bongo et Béréby. La deuxième période part de 1978 avec l'installation des parcelles villageoises sous la direction de la SAPH. Les projets villageois avaient pour but de vulgariser la culture de l'hévéa dans le monde rural et de diversifier les sources de revenu des paysans (Konan *et al.*, 2016). Les projets étaient localisés autour des ensembles agro-industriels et leurs agents assuraient l'encadrement de ceux-ci. La troisième grande période est celle des années 1990, où l'Etat s'est désengagé définitivement de la filière en privatisant ses ensembles agro-industriels, ce qui a mis alors un frein à l'évolution des projets villageois amorcés vers la fin des années 1970. Actuellement, de nouveaux projets de création de plantations, avec l'acquisition de plants subventionnés par l'APROMAC via le FDH, sont lancés pour accroître les superficies occupées par l'hévéa en Côte d'Ivoire (Essehi, 2019).

1.2.2. Contexte pédologique de l'hévéaculture

Dans les aptitudes des sols à la culture d'hévéa, interviennent la topographie, la profondeur et les qualités physiques et chimiques des sols (Gnagne *et al.*, 2002 ; Ono *et al.*, 2021).

La topographie ne gêne pas le développement de la culture. Cependant, il faut tenir compte des conditions de récolte du latex qui nécessitent des transports fréquents et importants. Le terrain le plus favorable est celui qui est dépourvu de pentes, sous réserve d'un bon drainage du sol. Toutefois, l'altitude doit être inférieure à 600 m (Obouayeba *et al.*, 2006).

La profondeur du sol est un facteur important, étant donné le système racinaire traçant et pivotant de la plante. Le développement du pivot permet un bon ancrage et donne à la plante la possibilité, pendant la saison sèche, de s'approvisionner en eau dans les couches profondes. Les profondeurs les plus favorables à l'hévéa sont celles supérieures à 1 m. Toutefois, une profondeur de l'ordre de 1 m est acceptable et même bonne, si les caractères physiques du profil sont convenables (Compagnon, 1986).

La composition granulométrique qui intervient dans la structure du sol et dans sa capacité de rétention en eau, est considérée par des spécialistes des sols comme la caractéristique physique la plus importante et un des éléments essentiels de la fertilité. On estime généralement que le taux minimum d'argile dans le sol doit être supérieur à 20 % sur environ 1 mètre de profondeur du sol (Compagnon, 1986).

La richesse du sol en éléments nutritifs nécessaires au développement des arbres et à leur production est certes importante, mais on ne peut la séparer des qualités physiques déjà mentionnées. Une certaine pauvreté en éléments minéraux n'est pas forcément un obstacle. En ce qui concerne le pH, l'hévéa manifeste une certaine préférence pour les sols acides, dont le pH est compris entre 4,5 et 5,5 (Ono *et al.*, 2021). L'hévéa est, sans conteste, une plante capable d'une grande adaptabilité, dans la mesure où ses exigences se manifestent beaucoup plus vis-à-vis de l'eau que de la fertilité du sol.

1.2.3. Zones hévéicoles traditionnelles en Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire est un pays d'Afrique de l'ouest avec un relief peu marqué dans l'ensemble et un climat de type équatorial humide, caractérisé par des précipitations abondantes dans le sud et le centre (El Zein *et al.*, 2011). Ces facteurs environnementaux lui ont permis d'introduire l'hévéa lors de son expansion, au 20^e siècle. Les premières plantations ont été créées en 1953 dans la zone forestière du pays. Cette zone représente l'aire traditionnelle de culture de l'hévéa en Côte d'Ivoire. Elle est limitée dans sa partie supérieure par l'isohyète 1500 mm avec des caractéristiques pédoclimatiques favorables au développement de l'hévéa (Kéli *et al.*, 1993 ; Obouayeba *et al.*, 2006). Certaines zones défavorables dites marginales sur la base de la pluviométrie peuvent s'ouvrir à la culture de l'hévéa grâce à un choix judicieux du site de culture, du matériel végétal et des itinéraires techniques (Gnagne *et al.*, 2016).

1.2.4. Nouvelles zones hévéicoles en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, la culture de l'hévéa qui était essentiellement pratiquée dans le sud depuis son introduction, a été étendue à d'autres aires. En effet, afin d'élargir les aires de culture

de l'hévéa et de répondre à la demande en nouvelles terres culturales, des champs de comportement ont été installés par la recherche à Odienné, Touba, Danané, Toulepleu (Guiglo), Soubré, Gagnoa, Issia, Toumodi, Arrah, Niapidou (Sassandra), Adzopé, Agboville et Tiassalé (Déa *et al.*, 1998). Les résultats de ces premiers travaux ont permis de montrer que :

- la croissance des hévéas en zone marginale est relativement faible (≤ 25 %) par rapport à celle obtenue dans la zone traditionnelle. Toutefois, la différence de croissance diminue de 25 % avec l'âge (Omont, 1982) ;
- la longueur de la période de sécheresse et le déficit hydrique affectent plus la croissance que la pluviométrie totale et les sols (Gnagne *et al.*, 1998) ;
- la combinaison des critères pédoclimatiques, comme la quantité de pluie annuelle, sa répartition, le déficit hydrique et la qualité des sols, peut influencer favorablement la croissance des clones d'hévéa (Gnagne *et al.*, 1998).

Par ailleurs, la connaissance de tous les paramètres agropédoclimatiques dans ces nouvelles zones permettra aux décideurs et aux nombreux opérateurs du secteur, de disposer d'un outil d'aide à la décision qui servira de guide pour la pratique d'une hévéaculture raisonnée, gage de succès et de rentabilité.

1.2.5. Importance de l'hévéaculture

1.2.5.1. Importance socio-économique de l'hévéaculture

L'hévéaculture est aujourd'hui très développée dans le monde, car elle représente la seule source de caoutchouc naturel commercialement exploitée. De ce fait, cette culture revêt un fort impact socio-économique mondial (ANRPC, 2023). De 11,5 millions de tonnes en 2013, la production mondiale de caoutchouc naturel est passée à 14,6 millions de tonnes (Chantuma & Thasanasakul, 2018). La grande partie de cette production est assurée par le continent Asiatique avec une proportion de plus de 88 %. Le reste de la production est réparti entre l'Afrique (8 %) et l'Amérique latine (4 %) (ANRPC, 2023).

Quant à la Côte d'Ivoire, sa production qui était de 604 000 tonnes en 2017, est passée à 1 100 000 tonnes en 2021 (APROMAC, 2023). Cette production fait de la Côte d'Ivoire le 3^{ème} producteur sur le plan mondial et le 1^{er} en Afrique. Le caoutchouc ivoirien est aujourd'hui le 4^{ème} produit d'exportation du pays après le cacao, le pétrole et le palmier à huile (APROMAC, 2023). Il génère d'importantes recettes aux producteurs, estimées à plus de 495 milliards de Francs CFA par an ; ce qui représente des gains financiers substantiels et réguliers sur une longue période de vie de la plantation d'environ 30 ans (APROMAC, 2023). C'est donc un

précieux moyen de lutte contre la pauvreté en milieu rural, par la création d'emplois (pépinieriste, greffeur, gestionnaire de jardin à bois de greffes, saigneur, régisseur de plantation et agent technique de plantation) et de richesse pour les planteurs.

De ce qui précède, l'hévéaculture revêt un intérêt économique considérable qui suscite un engouement sans cesse croissant chez de nombreuses populations en Côte d'Ivoire.

La pratique des cultures vivrières en intercalaire des hévéas permet l'approvisionnement en produits vivriers, en profitant des potentialités du milieu encore peu exploitées par les jeunes hévéas (Kéli, 1988 ; Kéli *et al.*, 1990). De plus, les excédents éventuels de récolte sont commercialisés, permettant ainsi aux hévéaculteurs de dégager des revenus non négligeables avant l'entrée en production des hévéas (Obouayeba, 1992 ; Penot & Ollivier, 2009 ; Kouadio, 2021).

En effet, le caoutchouc naturel produit par l'hévéa, intervient dans un grand nombre d'articles dont les pneumatiques qui utilisent 70 % de la production mondiale de caoutchouc naturel. Aussi, le caoutchouc naturel est recherché pour ses propriétés spécifiques qui le rendent irremplaçable pour certaines applications industrielles (Dussotoit, 2009). En dehors du caoutchouc, l'hévéa fournit également des produits secondaires. Ainsi, le bois d'hévéa peut être utilisé comme bois de chauffe ou comme bois d'œuvre (Agnimel, 2009 ; Ahoba, 2011). Les tourteaux des graines peuvent également servir à l'alimentation des animaux (Ocho, 1999 ; Okoma *et al.*, 2020). L'huile de l'amande peut être utilisée pour la fabrication de vernis de peinture et de savon etc (Okoma *et al.*, 2020).

Pour maintenir sa place de leader en Afrique, l'Etat ivoirien, s'est dotée d'un plan directeur de développement de l'hévéaculture qui prévoit de produire 2 000 000 tonnes de caoutchouc sec à l'horizon 2025.

1.2.5.2. Importance environnementale de la culture de l'hévéa

L'hévéa est, en effet la seule plante cultivée inscrite dans le Mécanisme de Développement Propre (MDP), issu du protocole de Kyoto et donc éligible au même titre que les forêts, pour sa valeur « carbone », la fertilité des sols et la lutte anti-érosive (Penot & Ollivier, 2009). Les études de Obouayeba (1992), Gilot *et al.*, (1993), Keli *et al.*, (1993), Rodrigo *et al.*, (2011) et Obouayeba *et al.*, (2016) ont montré le rôle bénéfique de l'hévéa sur l'environnement. Selon ces auteurs, la culture de l'hévéa améliore les propriétés physiques, hydrodynamiques, chimiques et biologiques des sols dégradés, à cause du chevelu racinaire très abondant et du recyclage de la matière organique foliaire. Elle reconstitue également le couvert forestier dès la 5^{ème} année de culture et participe à l'augmentation de la pluviométrie

(Houphouët *et al.*, 2017). L'hévéa génère un écosystème de forêt secondaire susceptible de freiner la dégradation du milieu, même sur un sol pauvre de savane à *Imperata cylindrica*, grâce à l'importante production de biomasse végétative après la période de défoliation. L'hévéa est aussi une culture qui permet de lutter efficacement contre les gaz à effet de serre, par sa forte capacité de séquestration du carbone atmosphérique (Coulibaly *et al.*, 2022).

1.2.5.3. Impact de l'hévéaculture sur les sols

La qualité du sol est importante pour maintenir et augmenter les rendements. Le maintien de la fertilité du sol, facteur principal d'une agriculture durable, dépend en partie du maintien de la biodiversité (Brussaard *et al.*, 2007). Les plantations forestières sont soit décriées, soit vantées pour leurs impacts environnementaux, sans pour autant que les arguments invoqués par les promoteurs ou les détracteurs ne soient solidement étayés par des travaux scientifiques (Epron *et al.*, 2011). Mieux définir les impacts de l'agriculture sur les services écosystémiques du sol est particulièrement crucial dans les zones tropicales où les cultures pérennes sont en rapide expansion au détriment possible de zones écologiquement fragiles et pauvres. L'hévéa puise la majorité des éléments minéraux nécessaires à sa croissance dans les premiers 50 cm du sol et demande des sols profonds en raison de l'importance de son pivot (Penot & Ollivier, 2009). Après la conversion de terres arables ou le renouvellement de la plantation, la qualité du sol peut diminuer pendant la phase immature de l'hévéa (Thoumazeau *et al.*, 2019). Elle s'améliore pendant la phase de maturité, se rapprochant de la qualité du sol des forêts, comme le montre les plantations en Thaïlande (Gay *et al.*, 2021), où les pertes de matière organique du sol se sont produites principalement lors du renouvellement de la plantation. En Thaïlande, comme dans la plupart des pays producteurs d'hévéa, une partie ou la totalité de la biomasse des arbres de l'ancienne plantation est exportée avant d'en créer une nouvelle. Dans certains pays, les troncs et les grosses branches sont utilisés comme bois d'œuvre, mais dans d'autres, les résidus sont simplement brûlés. Les résultats préliminaires d'un projet en Côte d'Ivoire ont montré que le fait de laisser une partie ou la totalité de la biomasse des arbres dans les interlignes a un effet positif sur la qualité du sol et la croissance des arbres, 18 mois seulement après l'exploitation de l'ancienne plantation (Gay *et al.*, 2021). Ces pratiques améliorées qui augmentent également les stocks de carbone dans le sol, contribuant ainsi à l'atténuation. D'autres études ont montré que le maintien de la flore naturelle dans les plantations d'hévéa réduisait l'acidité du sol et améliorait la santé du sol, les stocks de carbone et le statut des nutriments du sol (Abraham & Joseph 2015 ; Jessy, 2021). Les arbres croissent rapidement pendant la phase immature, avec une forte demande en nutriments et une

réponse positive à la fertilisation ou à la fertilité du sol (Perron *et al.*, 2021). Pendant la phase mature, la croissance des arbres et les besoins en nutriments sont faibles (Chotiphan *et al.*, 2019). L'hévéa ne nécessite pas de grandes quantités d'engrais pendant la phase de maturité et presque pas de pesticides (Penot *et al.*, 2021), ce qui se compare favorablement aux bilans d'émissions de GES de nombreuses autres cultures. La culture de l'hévéa améliore les propriétés physiques, hydrodynamiques, chimiques et biologiques des sols dégradés, grâce à son chevelu racinaire très abondant. D'après Chaudhuri *et al.* (2013), il n'y a pas de différence significative entre un sol sous forêt et un sol sous hévéa. La porosité structurale sous forêt est améliorée par la chevelure radiale des racines. Il en est également pour les plantations d'hévéas âgées (20 à 30 ans) où les couches superficielles du sol se traduisent par une bonne rétention d'eau. Ce qui rend le phénomène de ruissellement nul (Kéli, *et al.*, 1991). Ainsi, selon Obouayeba *et al.* (2016), les propriétés physiques du sol sous hévéa sont bonnes, en comparaison au sol sous forêt.

1.2.6. Description de l'hévéa

1.2.6.1. Classification botanique de l'hévéa

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*) ou l'arbre à caoutchouc, appartient à la famille des Euphorbiaceae, au groupe des Angiospermes Dicotylédones et à l'ordre des Euphorbiales. Il appartient au genre *Hevea* qui comprend dix espèces que sont : *Hevea benthamiana* ; *Hevea camargoana* ; *Hevea acamporum* ; *Hevea guinensis* ; *Hevea microphylla* ; *Hevea nitida* ; *Hevea pauciflora* ; *Hevea rigidifolia* ; *Hevea spruceana* ; *Hevea brasiliensis* (George & Kuruvilla, 2000). L'espèce *Hevea brasiliensis*, originaire d'Amazonie au Brésil, est la plus cultivée au monde, pour son latex de rendement supérieur à toutes les autres espèces végétales à latex connues (Thierry, 2005). Elle s'est révélée apte à être cultivée et exploitée industriellement (Traoré, 2014). Selon Schultes (1990), la position systématique de *Hevea brasiliensis* est la suivante :

Règne	: Végétal
Sous-règne	: Tracheabiontes
Embranchement	: Angiospermes
Division	: Magnoliophytes
Classe	: Dicotylédones
Sous- classe	: Rosidées

Ordre	: Euphorbiales
Famille	: Euphorbiaceae
Genre	: <i>Hevea</i>
Espèce	: <i>Hevea brasiliensis</i>

1.2.6.2. Morphologie de l'hévéa

L'hévéa est un grand arbre de forêt, avec une hauteur moyenne de 20 m, à tronc droit et cylindrique, avec une écorce de couleur vert grisâtre. La circonférence d'un arbre de plus de 30 ans peut varier fréquemment entre 1 et 3 m, mais sur des sols bien drainés, la rencontre d'arbres de 5 m de circonférence n'est pas rare (Essehi, 2019). Dans la majorité des cas, les hévéas des plantations sont des arbres greffés qui n'atteignent pas un développement important que ceux de la forêt amazonienne, qui peuvent aller jusqu'à 50 mètres de hauteur (Compagnon, 1986). L'hévéa peut vivre jusqu'à cent ans, malgré sa sensibilité à la casse due au vent, mais en plantation, sa durée de vie économique varie entre 30 et 35 ans (Obouayeba, 2005).

En outre, le système racinaire de l'hévéa est à la fois pivotant et traçant (Figure 1 A). L'ensemble du pivot et des racines latérales assurent à l'arbre un solide ancrage dans le sol. Le pivot peut également contribuer à l'alimentation hydrominérale de la plante pendant les périodes sèches. C'est par les racines latérales, avec leurs nombreuses ramifications se terminant par un chevelu de multiples radicelles que l'hévéa assure, pour la plus grande part, sa nutrition hydrique et minérale. La tige principale (tronc), est la partie de l'arbre où le latex est récolté (Figure 1 B). Elle présente donc un grand intérêt.

La tige est tronconique et s'accroît en circonférence et en hauteur en même temps que la formation d'unités de croissance. Elle est de couleur vert-grisâtre et le bois est homogène, tendre et facilement cassable (Dussotoit, 2009). A partir de 4 ans, l'hévéa perd ses feuilles et les renouvelle chaque année.

Les feuilles, se forment par étage à la partie supérieure de chaque unité de croissance, et elles sont composées généralement de trois folioles disposées à l'extrémité d'un long pétiole (Figure 1 C). D'une façon générale, les divers caractères de la feuille dans son ensemble et de ses composants (foliole, pétiolule, pétiole), et leurs variations intraspécifiques peuvent être utilisés pour l'identification des clones dans le jeune âge et notamment dans les jardins de multiplication de bois de greffes.

Les fleurs sont de couleur jaune clair, groupées en inflorescences qui sont en forme de grappes (Figure 1 D). Les fruits sont des capsules à trois lobes comportant trois graines

oléagineuses et de dimension variant de 2 à 2,5 cm (Figure 1 E). Ils arrivent à maturité 5 mois environ après la floraison et les graines qu'ils renferment sont expulsées après éclatement des loges.

Les graines sont d'une forme généralement ronde à oblongue (Figure 1 F). Le tégument est coriace, sa partie externe est lisse et brillante quand la graine est fraîche. Il présente des dessins brun foncé qui se détachent nettement sur un fond blanchâtre ou brun clair. Les ornements, la coloration, la forme et les dimensions de la graine, sont variables suivant les clones (Gnagne *et al.*, 2016). Les graines sont oléagineuses et ont une faculté germinative limitée (Zhang, 2018).

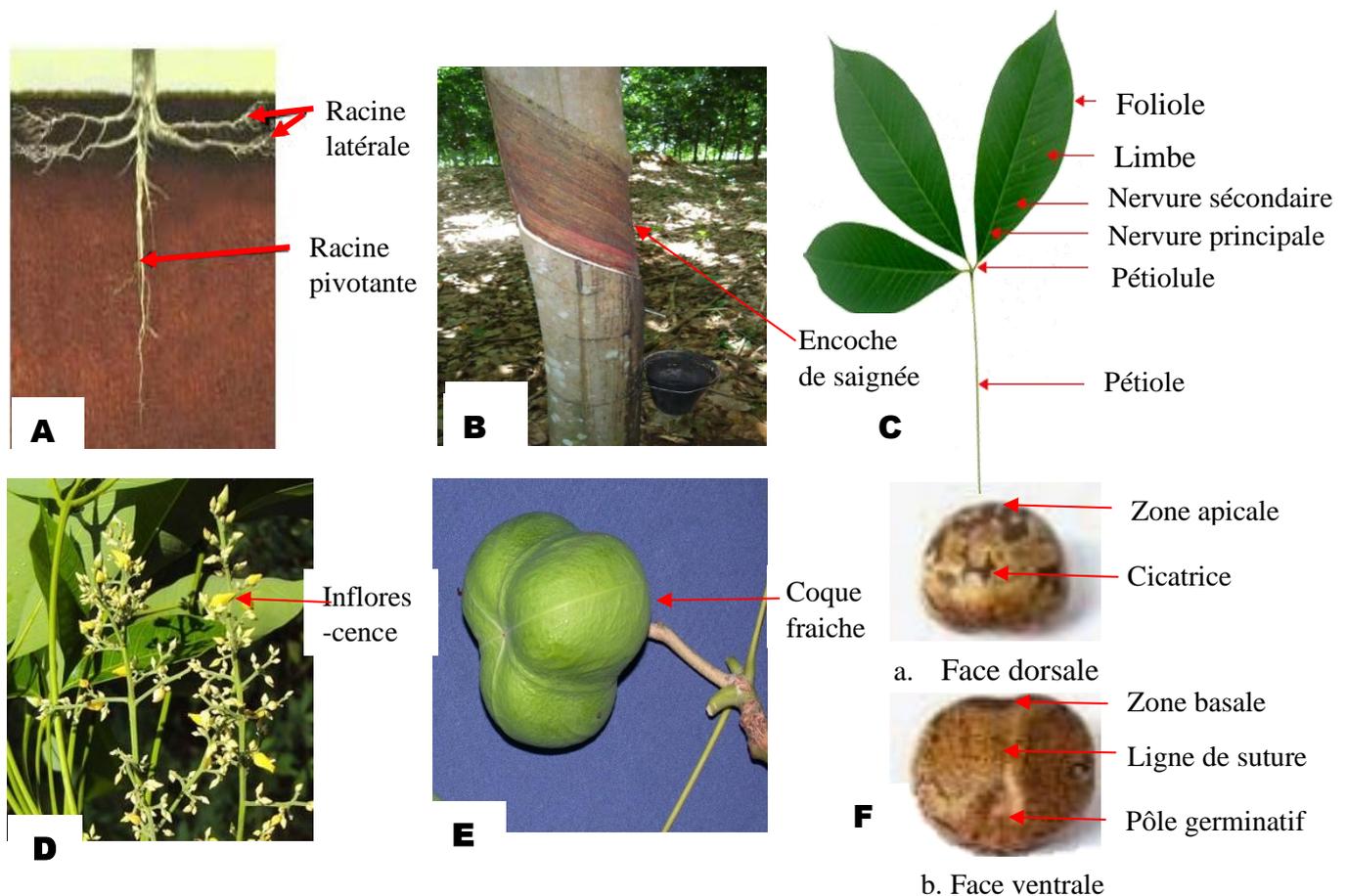


Figure 1 : Présentation de l'hévéa, *Hevea brasiliensis*

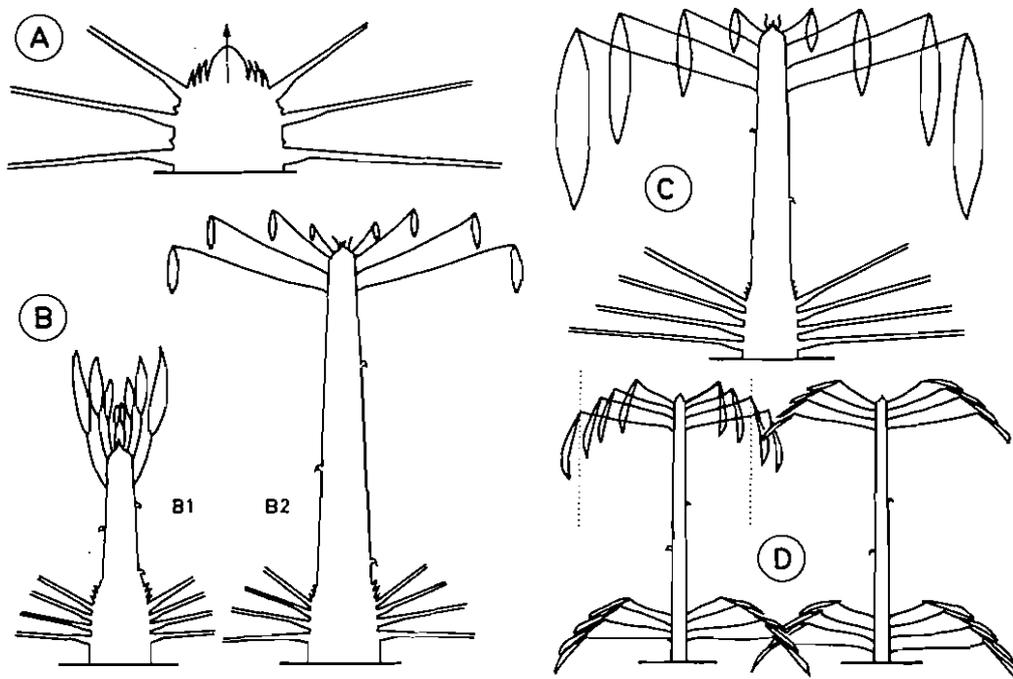
A : Racine d'hévéa ; B : Tronc d'hévéa en saignée ; C : Feuille de l'hévéa ; D : Inflorescence de l'hévéa ; E : Fruit de l'hévéa ; F : Graines de l'hévéa

1.2.6.3. Cycle morphogénétique de l'hévéa

Le cycle morphogénétique qui aboutit à la formation de chaque unité de croissance peut être décomposé en quatre stades bien définis (Halle & Martin, 1968) qui sont :

- Stade A : Débourement (Figure 2 A). Les feuilles écailles préformées dans le bourgeon terminal s'ouvrent et la nouvelle unité de croissance apparaît. Ce stade dure en moyenne neuf (09) jours.
- Stade B : Croissance (Figure 2 B1 et B2). Les entre-nœuds séparant les écailles s'allongent rapidement. Les feuilles assimilatrices apparaissent d'abord mauve-rougeâtre (anthocyaniques) avec un limbe de dimension très réduite dressé verticalement (B1) puis les limbes se renversent vers le sol (B2) et la teinte rouge s'atténue. Le stade de croissance dure 11 jours en moyenne.
- Stade C : Maturation foliaire (Figure 2C). La surface des limbes s'accroît considérablement en même temps que les feuilles perdent leur anthocyane et deviennent vert-clair, mais restent flasques. Les limbes subissent un accroissement rapide. Ce stade dure en moyenne dix jours. Aux stades B et C, les feuilles sont très vulnérables à certaines maladies.
- Stade D : Dormance (Figure 2 D). On considère comme le début de ce stade le moment où les limbes prennent de la raideur et commencent à se redresser. Ce stade peut durer une douzaine de jours, mais peut aussi durer beaucoup plus longtemps suivant les conditions du milieu.

Ces 4 stades sont repérables à l'œil nu et remarquablement utiles sur le terrain.



Source : Halle & Martin (1968)

Figure 2 : Représentation schématique des quatre stades du cycle morphogénétique de chaque unité de croissance de l'hévéa
 A : Débourement ; B : Croissance ; C : Maturation foliaire ; D : Dormance

1.2.7. Exigences édaphiques

1.2.7.1. Sol d'hévéaculture

L'hévéa se développe aisément sur des sols profonds avec une bonne rétention en eau. Il profite de ces sols, bien drainés et aérés pour le développement de son système racinaire. En effet, 80 % des racines (racines de diamètre ≤ 2 mm) se trouvent dans les 30 premiers centimètres du sol (Essehi, 2019). Le développement de la racine pivotante en profondeur est un facteur favorable du fait qu'il permet un bon ancrage de l'arbre et améliore la possibilité d'approvisionnement en eau de la plante en saison sèche. Les sols ayant une profondeur supérieure à 1 m, sont les plus favorables à l'hévéa (en plantation). Toutefois, une profondeur de l'ordre de 1 m est acceptable et même bonne si les caractéristiques physiques du sol, entre autres la texture, la structure, la porosité du sol, sont convenables (Essehi, 2019).

1.2.7.1.1. Caractéristiques physiques du sol

La composition granulométrique qui intervient dans la structure du sol et dans sa capacité de rétention en eau, est considérée par des spécialistes des sols comme la caractéristique physique la plus importante et un des éléments essentiels de la fertilité. Du fait de l'importance et de l'architecture de son système racinaire, une texture légère, la présence d'éléments grossiers, le cuirassement et l'hydromorphie sont les caractéristiques physiques du sol qui sont susceptibles d'être défavorables à la mise en place d'une plantation d'hévéa. Cependant, la composition granulométrique qui intervient dans la structure du sol et dans sa capacité de rétention en eau, est la caractéristique physique la plus importante et un des éléments essentiels de la fertilité en hévéaculture (Penot, 2001).

1.2.7.1.2. Texture du sol

Un sol argileux, comprenant plus de 55 % d'argile sur toute sa profondeur, offre des conditions de croissance très favorables à l'hévéa, sous réserve que sa structure soit bien aérée (Compagnon, 1986). Dans les régions sujettes à de fortes saisons sèches, le sol doit être argileux (40 à 50 % d'argile) pour répondre aux exigences de l'hévéa (Penot, 2001). Une texture sableuse (15 à 25 % d'argile) correspond à des conditions limites, voire médiocres, pour des saisons sèches n'excédant pas un à deux mois (Penot, 2001). Elle est à proscrire si le sol n'a pas une bonne profondeur, assurant un ancrage suffisant de l'arbre (Compagnon, 1986).

1.2.7.1.3. Eléments grossiers

Cette fraction grossière du sol est constituée par les éléments dont la taille est supérieure à 2 mm. Ces éléments grossiers sont de nature minéralogique diverse. Ce sont, soit des minéraux ou débris de roche résistants à l'altération, soit des formations pédologiques indurées (Boa, 1987). Les éléments grossiers, abondamment présents dans un sol, pourraient constituer une contrainte physique et hydrique de mise en valeur agricole (Boa, 1988 ; Kouassi *et al.*, 2010). En Côte d'Ivoire, les éléments grossiers sont l'un des principaux problèmes posés par les sols formés sur le socle ancien. L'hévéa peut tolérer, dans une certaine mesure, des sols gravillonnaires dans les 30 premiers centimètres où se rencontrent normalement 80 % des racelles. Toutefois, le pourcentage des éléments grossiers dans l'horizon gravillonnaire ne doit pas dépasser les 50 % (Keli *et al.*, 1993).

1.2.7.1.4. Hydromorphie

Les sols dits hydromorphes, sont des sols dont les caractères sont dus à une évolution dominée par l'effet d'un excès d'eau par suite d'un engorgement temporaire de surface, de profondeur ou par suite de la présence de la remontée d'une nappe phréatique. Cette présence d'eau est liée à des conditions topographiques basses et planes. Dans le profil du sol, elle se manifeste par la présence de taches grises (réduction) et de taches rouilles (oxydation). L'asphyxie des racines est l'un des facteurs les plus défavorables à la croissance de l'hévéa (Compagnon, 1986). D'après les observations faites sur la plantation d'hévéa de Firestone de Cavally au Libéria, Keli *et al.* (2005) ont conclu que l'hévéa pouvait supporter l'hydromorphie en profondeur, à condition que l'horizon hydromorphe soit au-delà de 1 m de profondeur.

1.2.7.1.5. Caractéristiques chimiques du sol

La richesse du sol en éléments minéraux nécessaires au développement des arbres d'hévéa et à leur production est certes importante, mais de bonnes conditions physiques sont, par ailleurs, les plus importantes et appréciées par la plante (Essehi, 2019). Une pauvreté en éléments minéraux du sol n'est pas forcément un obstacle à une exploitation rationnelle, si les qualités physiques et le pouvoir fixateur du sol pour certains éléments rendent valables les apports d'engrais. Au départ, l'hévéa n'est pas très exigeant, mais les conséquences des déficiences minérales se manifestent à la longue. Il est donc important d'être en mesure d'effectuer, au moment opportun, les apports d'éléments minéraux appropriés. En ce qui concerne le pH, l'hévéa s'adapte mieux aux sols à pH légèrement acides, avec des valeurs variantes entre 4,5 et 5,5.

1.2.8. Exigences climatiques

1.2.8.1. Pluviométrie

La pluviométrie constitue un facteur très important à considérer en hévéaculture. En effet, elle conditionne d'une part la végétation de l'arbre et d'autre part, la production de caoutchouc ainsi que l'exploitation proprement dite des arbres. D'une manière générale, l'hévéa exige un minimum de 1 500 mm d'eau par an, avec une bonne répartition au cours de l'année. L'hévéa ne peut tolérer un déficit hydrique relatif de 3 mois consécutifs. Un mois est considéré comme sec pour l'hévéa, s'il tombe moins de 100 mm d'eau et très sec, pour moins de 50 mm d'eau (Gnagne *et al.*, 2016).

Ainsi, dans une certaine limite, la saison sèche qui se situe au moment du renouvellement du cycle végétatif, pourrait ne pas être une cause de réduction de production, si sa durée n'excède pas 3 à 4 mois. Aussi, il y a lieu de noter que les saisons sèches peuvent avoir une incidence favorable en empêchant ou en limitant le développement de certaines maladies très préjudiciables à l'hévéa (Vawa *et al.*, 2021).

1.2.8.2. Température

L'hévéa prospère en climat équatorial ou tropical humide. Une température moyenne annuelle de 25°C est convenable à la croissance de l'hévéa. Des périodes assez longues de températures journalières inférieures à 20°C ont inévitablement des effets limitant la croissance de l'hévéa (Compagnon, 1986). Ces effets se trouvent souvent associés à certains facteurs limitants tels que des périodes sèches prolongées, ou amplifiés par d'autres telles que des conditions physiques de sols médiocres. En ce qui concerne la production de caoutchouc, la température fait partie de la conjoncture climatique qui conditionne l'écoulement du latex au moment de la saignée (Obouayeba, 2005).

1.2.8.3. Hygrométrie et ensoleillement

Le maintien d'une hygrométrie élevée, la formation de brouillards matinaux avec dépôts de rosées, sont des facteurs qui sont de nature à atténuer les effets de la sécheresse, notamment, en contribuant à l'amélioration du bilan hydrique des arbres pendant les premières heures de la journée, au moment où l'on exécute la saignée. Par ailleurs, les durées de l'insolation de l'ordre de 1 500 à 2 000 heures par an, qui sont notées en basse Côte d'Ivoire, sont considérées, à l'état actuel, comme satisfaisantes pour l'hévéaculture. Ainsi, la production baisse après plusieurs jours sans ensoleillement. Une bonne croissance des hévéas nécessite une bonne insolation.

Mais, en cas de déficit hydrique, une trop forte insolation peut provoquer des brûlures sur les plus jeunes feuilles et les jeunes plants (Kadir *et al.*, 2022).

1.2.8.4. Vent

Les vents permanents peuvent réduire le rendement de l'hévéa. Le vent est un facteur défavorable par la casse des arbres qu'il provoque. L'hévéa est plus ou moins sensible à la casse due au vent suivant son caractère génétique (Dick *et al.*, 2014). Parmi de nombreux clones sélectionnés pour leur productivité, un petit nombre a révélé une meilleure résistance à la casse due au vent et est utilisé de préférence, par exemple les clones GT 1, IRCA 41, PB 217, etc. (Sékongo, 2002). Il est aussi conseillé d'utiliser des brises vent ou d'orienter les lignes des plantations dans le sens du vent.

1.2.9. Itinéraire technique de la culture d'hévéa

1.2.9.1. Choix et préparation du terrain

Le choix des parcelles pour l'établissement des plantations d'hévéa doit tenir compte des conditions définies ci-avant. Ces conditions constituent des facteurs déterminants de réussite d'une plantation hévéicole. Ainsi, dans le but de faciliter l'enracinement et de favoriser un bon développement des arbres, il est important d'opter pour les terrains plats ou de faible pente (< 10 %) avec des sols meubles et profonds, de texture à tendance argileuse (Essehi, 2019). Cependant, l'hévéa peut être planté aussi, sur des terrains accidentés.

La préparation du terrain se fait en fonction de la végétation existante et du précédent cultural (forêt, recru forestier, jachères, savane, culture pérenne ou annuelle). Elle peut se faire mécaniquement quand il s'agit d'une forêt ou, manuellement lorsqu'il s'agit d'une jachère peu boisée. L'extirpation des souches et leur destruction sont nécessaires pour réduire les foyers de contamination pour les maladies de racines affectant les plants d'hévéa (Ballo, 2019).

Après la préparation du terrain et notamment le labour, il est nécessaire de protéger le sol ainsi dénudé par le semis de plantes de couverture (maïs, arachide, etc.).

1.2.9.2. Dispositif de plantation et densité des arbres

Le choix du dispositif de plantation et de la densité d'arbres correspondant est un des paramètres conditionnant le niveau de production et les résultats économiques (Ballo, 2019). Le dispositif idéal de plantation est celui qui permet au système racinaire et à la couronne de se développer harmonieusement. Pratiquement, les interlignes ne doivent pas être inférieurs à 6 m. Un grand écartement réduit les pertes dues aux maladies de racines. La densité de plantation

régulièrement pratiquée est de 500 à 667 arbres par hectare (Ballo, 2019) quels que soient le clone d'hévéa et les facteurs environnementaux. Cette densité est supposée donner le maximum d'espace requis pour l'épanouissement des arbres matures, conditions nécessaires aux meilleurs niveaux de production individuelle des arbres (Compagnon, 1986). Le dispositif de plantation et la densité des arbres peuvent influencer la croissance des arbres (hauteur, circonférence, épaisseur d'écorce), le coût de l'entretien et de la saignée, la production, la résistance aux maladies, la casse au vent et la conservation du sol (Ballo, 2019).

1.2.9.3. Fertilisation en hévéaculture

En matière de fertilisation, les préconisations doivent davantage tenir compte de l'expérience générale et de la connaissance du sol de la zone considérée et, le cas échéant, du type de plante de couverture utilisée (Kéli *et al.*, 1997). Les études ont montré d'importantes différences dans la réponse de l'arbre à la fertilisation en fonction de la nature du sol et de l'élément apporté (Rekha *et al.*, 2002 ; Allé *et al.*, 2015 ; Jeyanny, 2022).

Les nombreux essais de fertilisation minérale dans toutes les zones hévéicoles, sur jeunes cultures et cultures adultes, ont mis en évidence les effets positifs de la fertilisation sur les jeunes cultures (Omont, 1982 ; Essehi, 2019). En absence d'apports d'engrais, on observe des retards de croissance ou des baisses de production de caoutchouc importantes (Allé, 2016). On note aussi que la fertilisation n'a pas d'effet apparent à court et à moyen terme sur la plantation et n'est pas rentable en application systématique ; Parfois, des apports inconsidérés de certains engrais chimiques provoquent une baisse de production en créant ou en accentuant des déséquilibres entre les éléments minéraux (Compagnon, 1986 ; Allé, 2016). Ces observations conduisent à adopter une politique de fertilisation raisonnée ou sur « recommandation ». La connaissance des besoins nutritifs de la plante et de leur évolution dans la plupart des cas, le suivi de la croissance végétative, de la production de caoutchouc et des teneurs des feuilles en éléments minéraux suffisent pour avoir une idée assez précise de l'état nutritionnel des arbres (Omont, 1982).

1.2.10. Facteurs limitants de la croissance végétative

1.2.10.1. Facteurs climatiques

Le principal facteur est la disponibilité et la régularité des précipitations, dont l'influence peut moduler les propriétés physiques du sol, notamment sa capacité de rétention. Des hauteurs moyennes d'eau de 1500 à 2500 mm par an, sont généralement adaptées pour répondre aux besoins de l'hévéa. Il n'est pas possible de préciser un seuil en dessous duquel une pluviométrie

annuelle entraînerait un désavantage économique important (Ndoutoumou *et al.*, 2016). Il dépend de la répartition des précipitations, de l'importance de la saison sèche et de la rétention en eau du sol. En l'absence d'eau, les difficultés liées au sol se posent et la croissance végétative des hévéas est retardée. Sur une base mensuelle, les mois avec moins de 100 mm de précipitation sont secs pour l'hévéa ; moins de 50 mm est considéré comme très sec et donc, toute croissance est entravée (Maeght, 2014 ; Ndoutoumou *et al.*, 2016 ; Paul *et al.*, 2018). De même, la baisse de la valeur moyenne de la température ralentit considérablement cette croissance. Les effets de cette température plus basse sont souvent combinés à d'autres facteurs préjudiciables à la croissance, telle que des périodes sèches situées à des latitudes élevées ou dans des zones à sols pauvres.

1.2.10.2. Facteurs liés aux conditions d'établissement et d'entretien de la plantation

Parmi les facteurs qui dépendent des conditions de plantation, comme pour toute plante, il y a un certain niveau de fertilité du sol et de densité de plantation (Ballo, 2019). L'éclairage a un effet et cela est particulièrement évident chez les jeunes hévéas en croissance à l'ombre. Les différences de luminosité d'une zone à l'autre sont susceptibles d'affecter la croissance des plantes. Cependant, faute d'avoir étudié isolément cet éclairage, on ne connaît pas ses effets quantitatifs (Penot & Ollivier, 2009). Un facteur très important mais non étudié est l'effet du porte-greffe sur la croissance du greffon (Compagnon, 1986). Cependant, lorsque les graines proviennent d'un clone donné, la parenté qui existe entre les individus issus du clone aura, en moyenne, un effet plus ou moins favorable sur la croissance de l'arbre greffé. Indépendamment de cet effet global, il y a toujours une certaine variabilité dans la croissance des arbres dans n'importe quel champ clonal.

1.2.10.3. Facteurs liés à la récolte du latex des hévéas

L'entrée en production des hévéas a une influence très marquée sur la croissance des arbres. Lors de l'entrée en production, le taux d'accroissement annuel de circonférence, qui peut se situer aux alentours de 7 à 10 cm pour les clones moins vigoureux à vigoureux, pourra chuter sous l'effet de la saignée aux niveaux de 2 à 5 cm par an, voire encore moins (Obouayeba, 2005). La diminution du taux de croissance dépend du niveau d'intensification de la technologie de récolte du latex appliquée (Traoré, 2014) et probablement du clone sans rapport évident avec la vigueur manifestée par celui-ci (Obouayeba, 2005). Aussi, les taux de croissance seraient plus faibles à mesure que la production augmente et que la mise en saignée est précoce (Obouayeba, 2005). Cela peut en effet être le cas si l'on compare des systèmes qui augmentent

l'intensité de la saignée sur un clone donné. Cependant, pour une même intensité de saignée et des niveaux de production comparables, des différences significatives peuvent apparaître selon les clones. En effet, les clones les plus vigoureux, orientant principalement leur métabolisme vers la synthèse de biomasse primaire, seraient donc les plus sensibles aux déviations importantes des assimilats par rapport à la synthèse de biomasse secondaire (Compagnon, 1986). Le rendement de conversion des photosynthétats en latex paraît, en conséquence, plus important que celui de conversion des photosynthétats en potentiel de croissance végétative. Il s'en suit qu'une faible compétition entre croissance végétative et production de latex est particulièrement intéressante et recherchée chez l'hévéa, dans la mesure où, au plan intraclonal, la longueur de l'encoche de saignée, fonction de la circonférence et donc de la croissance, est l'un des paramètres importants du rendement.

1.2.10.4. Facteurs liés aux maladies, parasites et ravageurs

L'hévéa est confronté à de nombreuses maladies et attaques de ravageurs. Certains agents pathogènes sont responsables des maladies de racines. La maladie la plus importante est incontestablement le pourridié des racines, abusivement appelé « Fomès », qui est causé par un champignon du sol. Ce champignon est lignivore et s'attaque préférentiellement au pivot ou racine principale de l'hévéa dont il provoque le pourrissement pour sa nutrition, entraînant ainsi, la mort du plant. L'agent causal du pourridié des racines est *Leptoporus* ou *Rigidoporus* ou *Fomes lignosus*.

En Côte d'Ivoire, cette maladie des racines ou « pourridié » des racines, causée par le genre *Fomes*, se présente sous deux formes : la pourriture blanche causée par *Leptoporus lignosus* ou *Fomes lignosus* et la pourriture brune causée par *Leptoporus noxius* ou *Fomes noxius*. Elle peut détruire 10 à 30 voire 50 % du peuplement d'hévéa (Compagnon, 1986 ; Okoma *et al.*, 2011). La gravité éventuelle de la maladie dépend des conditions climatiques qui sont plus ou moins favorables à l'agent causal. Lorsqu'elle est susceptible de sévir gravement, des méthodes de lutte préventive et curative sont indispensables.

D'autres agents pathogènes s'attaquent aux jeunes feuilles et provoquent des défoliations prématurées plus ou moins intenses, parfois de façon répétée, sur tout le peuplement d'arbres. La maladie de chute des feuilles causée par *Corynespora cassiicola* est actuellement l'une des plus graves maladies des feuilles (Wahounou *et al.*, 2013 ; Ribeiro, 2019). Elle se caractérise par des lésions rondes, translucides, à bordures irrégulières visibles entre les nervures des feuilles. En plus de ces caractéristiques, des nécroses des nervures principales et secondaires apparaissent, prenant parfois une forme d'arête de poisson. Les

dégâts se traduisent par un retard de croissance des arbres, des défoliations répétées pouvant entraîner une perte d'environ 30 % de production, le dessèchement de pétioles et de branches, parfois la mort de l'arbre (Wahounou *et al.*, 2013). Les symptômes peuvent apparaître sur les jeunes plants dès les premiers étages foliaires mais, sont importants sur les hévéas de six à dix ans et s'atténuent avec l'âge de l'hévéa (Wahounou *et al.*, 2013).

Par ailleurs, des plantes de la famille des Loranthaceae parasitent l'hévéa en introduisant à l'intérieur du bois de l'hévéa des suçoirs qui absorbent sa sève brute. Les rameaux ainsi parasités connaissent un arrêt de croissance (Compagnon, 1986 ; Okoma *et al.*, 2011). En outre, les dégâts causés par les insectes, petits rongeurs, grands et moyens mammifères, sont le plus souvent très localisés, temporaires et de peu de gravité (Compagnon, 1986). Ces dégâts peuvent être des destructions des jeunes arbres dues au passage de gros mammifères tels que les cervidés, suidés ou gros rongeurs, qui mangent et arrachent l'écorce des jeunes arbres, mais aussi saccagent des plantations. Les tissus tendres des hévéas peuvent être attaqués par des insectes de tous ordres. En effet, certains insectes provoquent la défoliation ou sectionnent les tiges des plantes. D'autres, notamment les insectes térébrants communément appelés « borers », attaquent quasi systématiquement le bois des arbres.

1.2.11. Technologies de récolte de latex

L'hévéa est essentiellement cultivé pour son latex riche en caoutchouc. Le caoutchouc est un métabolite secondaire synthétisé dans les cellules spécialisées appelées laticifères, l'usine à caoutchouc (Jacob *et al.*, 1995). La récolte de latex de l'hévéa débute lorsque les arbres sont âgés de 6 ans et ont une circonférence de 50 centimètres à 1 mètre du sol (Obouayeba *et al.*, 2002 et Obouayeba, 2005). La production de caoutchouc dépend de facteurs physiologiques et biochimiques qui varient d'un clone à un autre. Cependant, elle peut être influencée par le système de récolte de latex qui comprend deux composantes principales qui sont le système de saignée et la stratégie de stimulation hormonale de la production de caoutchouc (Obouayeba *et al.*, 2009).

1.2.11.1. Système de saignée

La saignée est une opération qui consiste à faire une incision dans l'écorce de l'arbre (Obouayeba *et al.*, 2009 ; Obouayeba *et al.*, 2016). Ce qui entraîne la section d'un certain nombre de manteaux laticifères, et assure l'écoulement du latex vers l'extérieur (Jacob *et al.*, 1995 ; Adou, 2019). Cette opération est répétée tout au long de l'année à une fréquence de deux, trois, quatre, cinq ou six jours soit respectivement d2, d3, d4, d5 et d6 ou « d » signifie jour en

anglais 'day'. L'incision peut être faite en spirale entière, en demi-spirale ou en quart de spirale (S, S/2, S/4). La saignée peut être descendante ou remontante selon la direction de l'exploitation de l'écorce. Lorsque la saignée est faite en ravivant l'encoche de saignée du haut vers le bas, on parle de saignée descendante. Dans le cas contraire, la saignée est dite remontante ou inversée. La saignée inversée est pratiquée à partir de la dixième année d'exploitation (Soumahin, 2010). Dorénavant, elle peut être réalisée à partir de la 6^e année de récolte du latex (Kouakou *et al.*, 2021 ; Moro *et al.*, 2022)

1.2.11.2. Stimulation hormonale de la production de caoutchouc

En vue d'intensifier le système de récolte de latex de l'hévéa, on a souvent recours à la stimulation. Elle se traduit par un apport d'énergie exogène (éthylène contenu dans l'éthéphon) pour permettre de produire davantage de caoutchouc (Adou, 2019). Elle nécessite la connaissance du type d'activité métabolique du clone pour adapter l'apport d'énergie complémentaire. Les agents stimulants peuvent être des substances chimiques ou hormonales. L'Ethéphon, générateur d'éthylène est de nos jours, le principal agent stimulant utilisé à travers le monde par les hévéaculteurs (Traoré, 2014).

1.3. Milieux d'étude

1.3.1. Situation géographique de la zone d'étude

1.3.1.1. Localité de Man

La localité de Man est située à l'ouest de la Côte d'Ivoire (Figure 3a), dans la région du Tonpki, zone comprise entre les latitudes 7°36 et 8°15 nord et les longitudes 7°07 et 8°19 ouest (Eponon *et al.*, 2017). Elle est limitée au nord par le département de Touba, au sud par le département de Duékoué, à l'ouest par la Guinée et le département de Danané et à l'est par les départements de Vavoua et Séguéla (Banque mondiale, 2021). Man est situé à 580 km d'Abidjan (capitale économique) et à 300 km de Yamoussoukro (capitale politique).

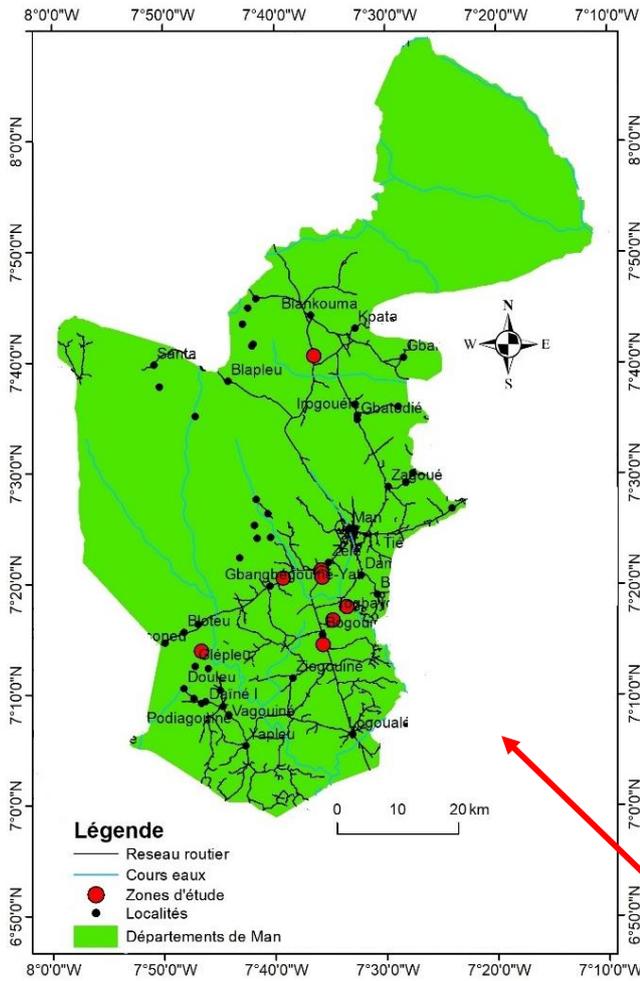
1.3.1.2. Localité de Toumodi

La Localité de Toumodi est située au centre-sud de la Côte d'Ivoire (Figure 3b), et délimité par les coordonnées 6°00 et 6°30 de latitude nord et 4°30 et 5°00 de longitude ouest (René & Roland, 2019). Elle couvre une superficie d'environ 2837 km² et est située dans la pointe sud de la région appelée traditionnellement le « V Baoulé » et relève de la région du Béliér dont le chef-lieu est Yamoussoukro. Toumodi est limité au nord par les départements de

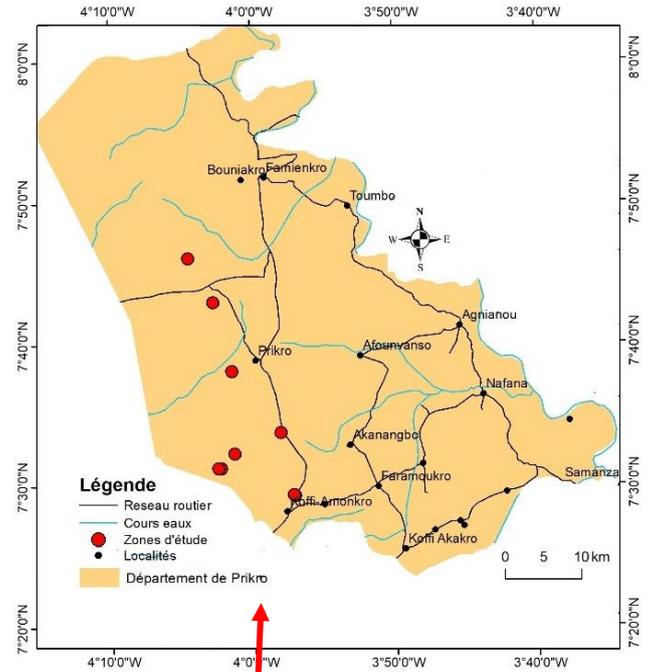
Yamoussoukro et Attiégouakro, au sud par la localité de Taabo, à l'est par les départements de Dimbokro et de Bongouanou, à l'ouest, par les départements de Djékanou et d'Oumé (Banque mondiale, 2021). Toumodi est situé à 198 Km d'Abidjan capitale économique et à 34 km de Yamoussoukro, capitale politique et administrative de la Côte d'Ivoire.

1.3.1.3. Localité de Prikro

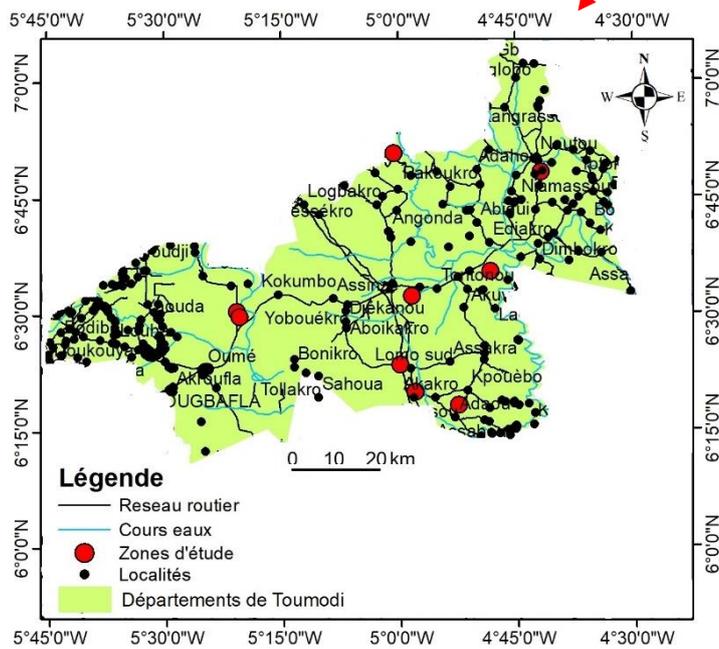
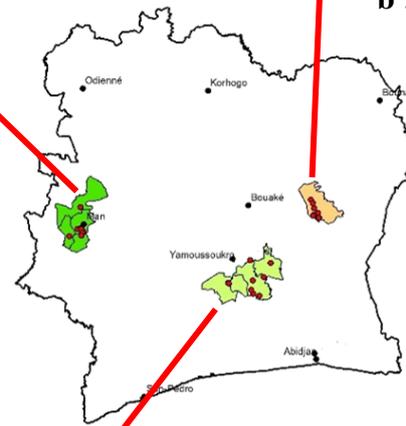
La localité de Prikro appartient à la région de l'Iffou au centre-est de la Côte d'Ivoire (Figure 3c), entre 7°40' et 7°41' de latitude nord et 4°9' et 4°10' de longitude ouest. Elle couvre une superficie de 2400 km² et est limitée au nord par la localité de Dabakala, au sud par celle de Daoukro, à l'est par la localité de Sandégué et à l'ouest par celle de M'Bahiakro (Koffie-Bikpo, 2016). Cette zone est à cheval entre les bassins versants du N'Zi et de l'Agnéby (Niamke *et al.*, 2008). Prikro est situé à 313 Km de la capitale économique, Abidjan et de 247 Km de la capitale politique Yamoussoukro.



a : Localité de Man



b : Localité de Toumodi



c : Localité de Prikro

Figure 3 : Carte des zones d'étude

1.3.2. Climat de la zone d'étude

1.3.2.1. Climat de Man

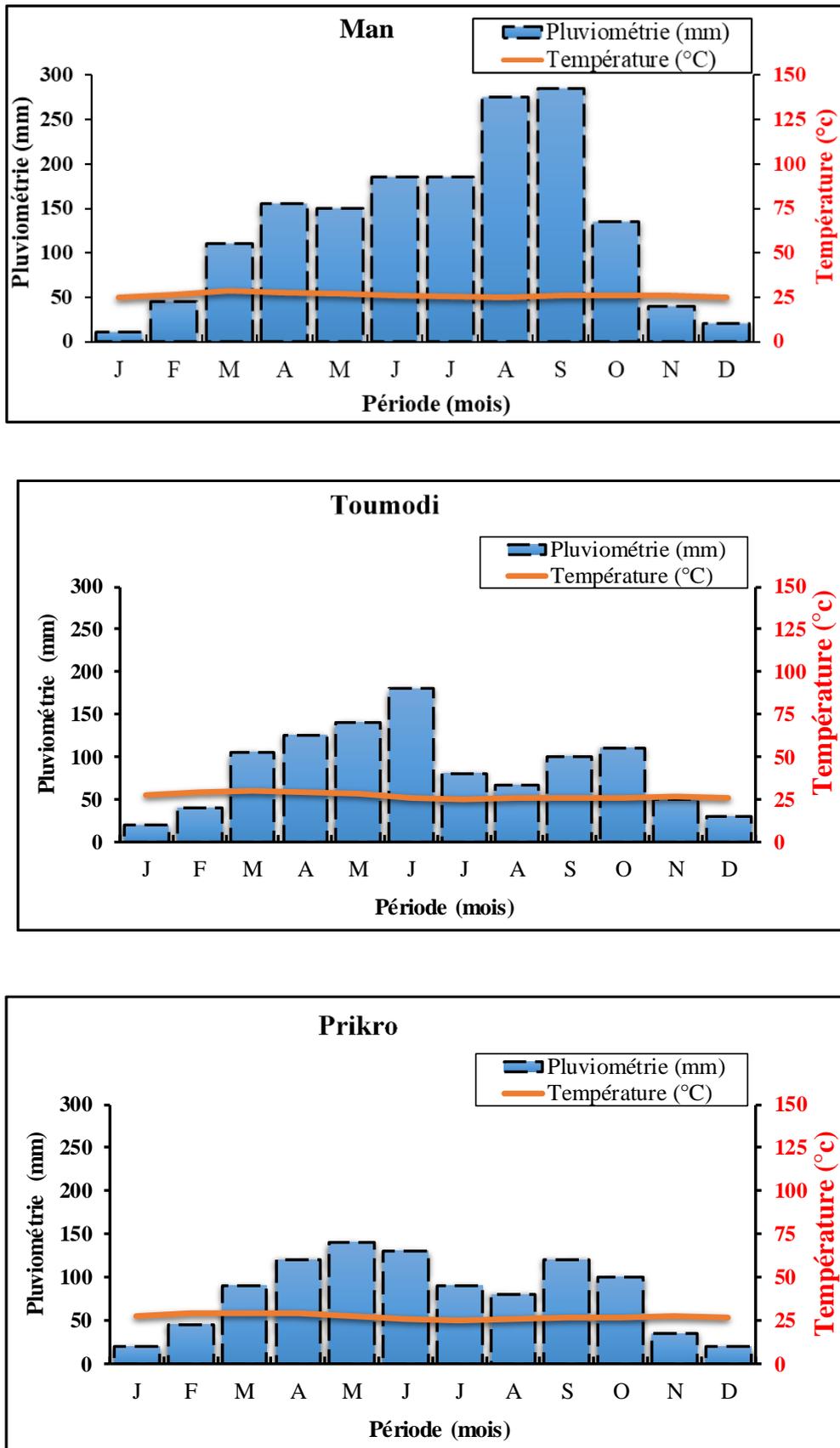
Le climat de Man est de type tropical humide ou climat de montagne avec une longue saison pluvieuse de huit (8) mois allant de mars à octobre. La température diminue avec l'altitude (jusqu'à 8 °C en janvier) (Soro *et al.*, 2021). Selon les données de précipitations et de températures de 1990 à 2020, la variabilité de la pluviométrie représentée sous forme de diagramme, traduit la répartition des hauteurs de pluie au cours de ces années et présente un régime unimodal. Les mois d'août et septembre constituent les pics de la saison des pluies. Les précipitations moyennes atteignent 1580 mm.an⁻¹ (Figure 4). Les températures varient entre 24 et 32°C, avec cependant des températures plus basses en montagne (Banque mondiale, 2021).

1.3.2.2. Climat de Toumodi

La région de Toumodi baigne dans le climat équatorial de transition ou climat baouléen (Oro *et al.*, 2020). Le climat de Toumodi est caractérisé par une grande saison des pluies, de mars à juillet, une petite saison sèche, de juillet à août, une petite saison des pluies, de septembre à octobre et finalement une grande saison sèche, de mi-novembre à mi-mars, caractérisée par la présence, en décembre et janvier, de l'harmattan, un vent froid et sec venant du Sahara, qui abaisse considérablement l'humidité (CNRA, 2021). La pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 1 120 mm sur ces trente dernières années, avec une température moyenne de 26°C (Figure 4).

1.3.2.3. Climat de Prikro

Le climat de Prikro est de type subéquatorial ou climat baouléen (Kangah, 2019). Il est chaud et humide avec une alternance de 4 saisons dont deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. Selon les données de précipitations et de températures de 1990 à 2020 (CNRA, 2021), une grande saison de pluie est observée de mars à juin suivie d'une petite saison sèche de juillet à août et une petite saison pluvieuse de novembre à octobre et enfin une grande saison sèche de novembre à février avec toutefois quelques précipitations isolées (Figure 4). La température moyenne annuelle est de 26°C. Le régime climatique est caractérisé par des précipitations moyennes mensuelles variant entre 11 et 198 mm. La hauteur pluviométrique moyenne interannuelle calculée sur les trente dernières années 1990-2020 est de 1050 mm (Figure 4).



(Source : CNRA, 2021)

Figure 4 : Diagramme ombrothermique des départements d'étude, de 1990 à 2020

1.3.3. Végétation de la zone d'étude

1.3.3.1. Végétation de Man

La végétation de Man est composée à plus de 80 % de forêt humide dans les parties sud et centre-ouest (Camara, 2019). Selon la Banque mondiale (2021), cette forêt laisse, aujourd'hui, place à des jachères à *Chromolaena odorata* et à des plantations de caféier (*Coffea sp.*), de cacaoyer (*Theobroma cacao*) et d'hévéa (*Hevea brasiliensis*).

1.3.3.2. Végétation de Toumodi

La région de Toumodi est dominée par une végétation de savane boisée, avec une forte densité d'arbustes surplombés parfois par des grands arbres comme les fromagers : *Ceiba pentandra* (Center *et al.*, 2021). La distribution générale de cette végétation, à l'échelle du versant, obéit au schéma suivant : forêt galerie dans le bas-fond, bordée par une savane herbeuse plus ou moins boisée sur le versant, îlot forestier au sommet (Avit *et al.*, 1999).

1.3.3.3. Végétation de Prikro

Située en zone de transition entre la savane et la forêt, la localité de Prikro bénéficie de deux types de végétation, la savane herbeuse, à l'ouest et la forêt dégradée à l'est, au nord et au sud. La dégradation de la forêt de cette zone est due en partie aux effets de l'homme. Les actions conjuguées des feux de brousse, des cultures itinérantes et l'exploitation abusive de la forêt sont les principales causes de la dégradation des forêts. Les quelques forêts rencontrées renferment des essences telles que l'Iroko, le Koto, le Linguet, le Samba et le Fromager (Anatole *et al.*, 2018). Cependant, le développement de l'hévéaculture contribue pour ainsi dire, à la reconstitution du couvert végétal.

1.3.4. Contexte géomorphologique

1.3.4.1. Géologie et relief de Man

La dorsale de Man est un des rares témoins du vieux socle précambrien. Cette dorsale a été formée à l'orogénèse Libérienne. Puis il y a eu l'orogénèse éburnéenne qui a affecté le socle. Le soubassement rocheux comprend deux grandes générations de roches, à savoir les roches cristallines (granitoïdes) et les roches phylliteuses (structure feuilletée), plus ou moins métamorphisées (gneiss, migmatites, granites et charnockites) datant de l'orogénèse Libérienne (Bahan *et al.*, 2012 ; Camara, 2019).

Le relief de Man est marqué par des montagnes qui occupent le 1/3 de la superficie du département. Ces montagnes s'élèvent parfois à plus de 1000 m dans la partie ouest, nord-ouest et centre. Il existe également d'immenses plaines et de nombreux bas-fonds dans la partie sud (Avit *et al.*, 1999).

1.3.4.2. Géologie et relief de Toumodi

La ville de Toumodi appartient au domaine Baoulé-Mossi du craton ouest-africain, constitué de roches birimiennes, principalement des volcanites (tholéitiques et calcoalcalines), des granitoïdes, des volcano-sédiments et sédiments (Nangah, 2013). Ceux-ci sont constitués de granite, schistes, granodiorite (Yao-Kouamé, 2007).

Le relief de cette région est dominé par des collines dont les plus importantes dépassent 400 m d'altitude (Avit *et al.*, 1999). L'ensemble de ces collines, de par leur position cartographique, appartient à la chaîne dénommée « sillon Fêttèkro-Toumodi-Hiré » (Yacé, 1982).

1.3.4.3. Géologie et relief de Prikro

Prikro appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine baoulé-mossi. Le substratum géologique rencontré est constitué de roches ignées, métamorphiques et volcano-sédimentaires (Kadio *et al.*, 2010). Le volcano-sédimentaire comprend des méta-sédiments composés majoritairement de grès et de schistes intrigués par plusieurs générations de granitoïdes. Le volcano-sédimentaire est recouvert de métavulcanites qui sont constitués d'amphibolites, de méta-andésite, de rhyolites, de *méta*-basaltes, de métagabbro et de métadolérite.

Le relief de la zone d'étude est monotone et constitué d'un plateau légèrement incliné de direction nord-sud, avec une altitude moyenne d'environ 150 m. Les collines de la chaîne Baoulé correspondent aux faciès volcano-sédimentaires, principalement les roches vertes.

1.3.5. Contexte hydrographique et hydrométrique

1.3.5.1. Hydrographie et hydrométrie de Man

La localité de Man est irriguée par trois grands fleuves à savoir, le fleuve Sassandra à l'est, avec de nombreux affluents, le fleuve Cavally à l'ouest et ses affluents, et le fleuve Bafing au nord. Les principaux affluents du Sassandra sont le Boa, le FéréDougouba, le Bafing, le Kouin, le Guémon et le N'zo. Ceux du Cavally sont le Mémé et le N'zo (CNRA, 2021). Ces

différents cours d'eau ont des intérêts économiques et sociaux pour les populations locales. Les besoins en eaux des activités agropastorales et les autres usages à des fins domestiques sont également concernés (ANADER, 2014 ; CNRA, 2017).

1.3.5.2. Hydrographie et hydrométrie de Toumodi

La localité de Toumodi est traversée par les fleuves Bandama à l'ouest et N'zi à l'est, ainsi que par des rivières saisonnières. Le réseau hydrographique secondaire est constitué de la rivière Kan et de plusieurs de ses affluents. Ces fleuves connaissent une période de crue (juin-juillet et octobre-novembre) et une période d'étiage (décembre à mars), correspondant, respectivement, à la saison des pluies et à la saison sèche (Lévêque *et al.*, 1983). Le débit moyen annuel du Bandama est de $263 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le débit mensuel moyen extrême du fleuve N'zi est de $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au mois d'octobre (Ahoussi *et al.*, 2012).

1.3.5.3. Hydrographie et hydrométrie de Prikro

Prikro est drainé par le seul fleuve Comoé. Il existe également de petits cours d'eau saisonniers. La Comoé est un cours d'eau peu abondant et très irrégulier (Lévêque *et al.*, 1983). La nappe phréatique est insuffisante dans la zone, ce qui rend difficile la fourniture d'eau potable aux populations, particulièrement, en période de saison sèche. Le débit moyen mensuel observé en mars (minimum d'étiage) atteint $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit plus de 350 fois moins que le débit moyen du mois de septembre ($467 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ce qui témoigne de son irrégularité saisonnière très importante (Lévêque *et al.*, 1983).

1.3.6. Contexte pédologique

1.3.6.1 Sols de la région de Man

Les sols les plus dominants de la localité de Man sont de type ferrallitique moyennement désaturé (Ferralsol dystric). Il existe aussi des sols développés sur des roches basiques (potentiellement riches), des sols hydromorphes (bas-fonds) et des sols riches en minerais (Yoro, 2001 ; Camara, 2019). Les sols de ces localités sont peu profonds à très profonds avec des horizons humifères moyennement développés. Cet horizon contient dans certains cas, des éléments grossiers. Les sols moyennement profonds avec des gravillons à moins de 50 centimètres sont plus fréquents (Camara, 2019). Ils sont de texture sablo-argileuse dans les horizons de surface et de texture argileuse en profondeur (Bahan, 2016 ; Camara, 2019). Le niveau de fertilité chimique des sols de la région est en général moyen. Les sols cultivables

associés à un modelé à pente faiblement variable sont favorables à toute mise en valeur agricole. Leur aptitude culturale est généralement bonne, en dehors de toute contrainte physique (cuirasse et blocs rocheux).

1.3.6.2. Sols de la région de Toumodi

A Toumodi, les sols sont formés à partir des principaux types de roches observés dans le pays (granite, schiste, roches vertes). Assez variés, ils sont classés dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés (Ferralsols dystric), les sols hydromorphes (Gleysols), les sols bruns tropicaux (Cambisols), etc. Ils sont riches en éléments grossiers, qui apparaissent par endroits dans les horizons superficiels à moins de 50 centimètres (Yao-kouamé, 2007). Ces sols semblent favorables à une diversité de cultures, aussi bien vivrières qu'industrielles (Yao-kouamé, 2007).

1.3.6.3. Sols de la région de Prikro

Les sols rencontrés à Prikro sont généralement des sols ferrallitiques (Ferralsols) relevant de l'altération des schistes ou des granites. Les Cambisols (sols bruns) y sont aussi rencontrés. Les sols ferrallitiques de cette zone sont faiblement désaturés (Perraud, 1971). Ils sont riches en éléments grossiers, qui apparaissent par endroit, dans les horizons superficiels. A côté des sols ferralsols et des Cambisols, il existe des sols hydromorphes (Gleysol) qui se rencontrent le long des cours d'eau et dans les zones de dépression (Perraud, 1971). Les sols de cette région, par leur pluralité, permettent la diversification des cultures.

1.3.7. Milieu humain de la zone d'étude

1.3.7.1. Population de Man

Les peuples autochtones de la localité de Man, sont les Yacouba. Les allochtones Malinkés, Krou et Akan sont très présents dans ce département. Au cours de ces dix dernières années, la crise politico-militaire aidant, beaucoup d'autres peuples allogènes tels que les Loby, les Dagary, les Mossis ont commencé à s'installer de façon illégale dans les forêts classées de la région (SODEFOR, 2014). Man est l'une des plus grandes villes de Côte d'Ivoire et la plus grande ville de l'ouest de la Côte d'Ivoire, avec 241 969 habitants et la densité de la population s'établit à 91,1 hbts.km⁻² (RGPH, 2021).

1.3.7.2. Population de Toumodi

Toumodi est l'un des plus grands carrefours de la Côte d'Ivoire. Cette situation fait de cette localité un lieu de brassage ethnique par excellence. La population majoritaire est constituée des autochtones Baoulé, à laquelle s'ajoutent des allochtones, venus des autres régions du pays, principalement du nord. Des allogènes Maliens, Burkinabés, Guinéens, Nigériens, Sénégalais et Nigériens font aussi partie de la beauté du brassage interethnique de cette région. La population de la localité de Toumodi est estimée à plus 142 696 habitants (51 hbts.km⁻²) (RGPH, 2021).

1.3.7.3. Population de Prikro

La localité de Prikro a été fondée à la suite de plusieurs courants migratoires. Les populations autochtones sont les Anoh ou Andoh et sont regroupées en deux cantons dont le canton Anoh (chef-lieu Famienkro) et le canton Badrafoué (chef-lieu Anianou). Une forte présence des allochtones Sénoufo et Malinké et des allogènes venus des pays de la CEDEAO, a été observée. La population totale de la localité de Prikro, selon le Recensement General de la Population et de l'Habitat (RGPH, 2021) se chiffre à 73 756 habitants avec une densité de 30,73 habitants au km². Il convient d'indiquer qu'une frange de la population notamment les jeunes, émigrent vers les régions forestières à la recherche de terres arables.

1.3.8. Activité socio-économique

1.3.8.1. Activité socio-économique de Man

La principale source économique de la localité de Man est l'agriculture, basée sur le café et le cacao auxquels l'on ajoute le manioc, le riz et la banane plantain qui sont plus utilisés comme alimentation de base. Il y a l'hévéa qui se met en place progressivement, depuis ces dernières années. Des potentialités énormes existent, entre autres, les ressources minières. Hormis l'or qui est exploité depuis des années à Ity par la Société des Mines d'Ity (SMI), le fer et d'autres gisements du Mont Nimba et du Mont Momy sont encore inexploités. Des unités industrielles d'exploitation de bois sont aussi rencontrées. L'élevage des bovins et caprins se pratique de façon traditionnelle. L'élevage de porcs et de poulets de chair s'y pratique depuis des décennies avec l'encadrement des services compétents, comme l'ANADER. Des sites touristiques tels que la dent de Man, la cascade, la forêt sacrée des singes verts, le pont de lianes, les masques et autres danses du terroir font la beauté économique de la région (Banque mondiale, 2021).

1.3.8.2. Activité socio-économique de Toumodi

L'économie de la localité de Toumodi repose essentiellement sur l'agriculture qui représente 65 % des activités économiques. Les cultures industrielles telle que : le binôme caféier-cacaoyer, l'hévéa et l'anacardier constituent les cultures d'exportation qui y sont produites. L'igname, le manioc, le riz, le maïs, le bananier plantain, l'arachide et les cultures maraîchères sont les cultures vivrières pratiquées dans le département. Outre l'agriculture, le transport, le commerce et l'artisanat y occupent une place de plus en plus importante (Banque mondiale, 2021).

1.3.8.3. Activité socio-économique de Prikro

Prikro est une localité à vocation agricole qui accueille, notamment les cultures d'exportation comme l'anacarde, devenue la principale source de revenus des paysans au détriment du cacao. Aussi, la culture de l'hévéa et du palmier à huile gagne du terrain, surtout l'hévéa avec l'implantation prochaine de la Compagnie Hévécicole de Prikro (CHP) et la société EXAT-agriculture. Les cultures vivrières sont aussi pratiquées et très variées (riz pluvial, maïs, arachide, manioc, igname). L'élevage, quant à lui, est pratiqué de façon traditionnelle et concerne : les bovins, les ovins, les caprins, les porcins et la volaille. L'artisanat n'est pas très développé et ne concerne que le travail des métaux, la couture, la coiffure. Le transport et le commerce y sont aussi représentés dans cette ville (Banque mondiale, 2021).

DEUXIEME PARTIE

Matériel et Méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal de cette étude est composé de sept clones d'hévéa, répartis en trois classes d'activité métabolique : lente, modérée, rapide (Tableau I). Ils sont d'origines géographiques et génétiques diverses et répartis entre les trois classes de croissance végétative. Les clones GT 1 et IRCA 41 ont été utilisés pour la création de nouveaux champs de comportement. Tandis que, les clones IRCA 18, PB 235, PB 260, RRIM 600 et PR 107 étaient déjà préétablis par les producteurs sur les différents sites d'étude. Leur âge a varié entre 5 et 15 ans et étaient pour la plupart déjà en production. Pour permettre des analyses et des comparaisons fiables le clone GT 1 représentatif sur tous les sites a été utilisé.

Tableau I : Principales caractéristiques des clones d'hévéa étudiés

Classe métabolique	Clones	Origine	Caractéristiques	Production (Kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Active ou rapide	IRCA 18	Institut de Recherche sur le Caoutchouc en Afrique (IRCA), Côte d'Ivoire, croisement génétique : PB5/51 x RRIM605	Vigoureux, haut Producteur, résistant à la casse due au vent, moins sensible à l'encoche sèche	2486-9680
	PB 235	<i>Prang Besar</i> (PB), Malaisie, croisement génétique : PB 5/51 x PB S/78	Vigoureux, haut Producteur, sensible à l'encoche sèche et à la casse due au vent	
	PB260	<i>Prang Besar</i> (PB), Malaisie, croisement génétique : PB 5/51 x PB 49	Vigoureux, haut producteur, sensible à l'encoche sèche, moyennement résistant à la casse due au vent	
	RRIM 600	Rubber Research Institute of Malaysia (RRIM), Malaisie, croisement génétique : TJIR 1 x PB 86	Vigoureux, haut producteur, sensible à l'encoche sèche et à la casse due au vent	
Modérée ou intermédiaire	GT 1	<i>Gondang Tapen (GT)</i> , Indonésie, clone primitif	Vigoureux, clone très stable, moyennement sensible à l'encoche sèche, résistant à la casse due au vent	1060-7446
	PR 107	<i>Proefstation voor</i> 107, Malaisie, Clone primitif créé vers 1923	Vigoureux, moins sensible à l'encoche sèche, haut producteur, résistant à la casse due au vent	1431-9308
Lente	IRCA 41	Institut de Recherche sur le Caoutchouc en Afrique (IRCA), Côte d'Ivoire, croisement génétique : GT 1 x PB 5/51	Vigoureux, moins sensible à l'encoche sèche, haut producteur, résistant à la casse due au vent	

Source : CIRAD, 1997

2.1.2. Matériel de terrain

La collecte des données sur le terrain a nécessité :

- un GPS, pour la prise des coordonnées géographiques des sites et le relevé des coordonnées de l'emplacement des fosses ;
- un clinomètre Méridian, pour mesurer les pentes ;
- une tarière, pour prélever les échantillons de sol ;
- une machette, un ciseau, une pioche, une pelle pour l'ouverture des tranchées et des layons ;
- une plaque métallique percée d'un orifice et des piquets en aluminium, pour la mesure de densité apparente par la méthode au sable (Yoro, 1992) ;
- un piochon, pour le rafraîchissement des horizons ;
- un marteau de géologue, pour la casse des formations rocheuses ;
- carte pédologique de la Côte d'Ivoire, cartes morpho pédologiques et cartes d'unités cartographiques réalisées par le BNETD et l'ORSTOM (Perraud, 1971)
- un couteau du pédologue, pour la délimitation des différents horizons et le prélèvement des échantillons de sol ;
- un ruban mètre, pour déterminer la profondeur du profil et la mesure des épaisseurs des horizons constitutifs des profils ;
- un ruban mètre gradué de 100 m pour la mesure des distances ;
- une bouteille d'eau, pour déterminer au toucher, la texture du sol et la perméabilité ;
- un code Munsell, pour déterminer la couleur des différents horizons de sol ;
- une balance, pour la pesée des différentes fractions de sol prélevées ;
- des sachets plastiques, pour conditionner les échantillons de sols prélevés ;
- un tamis à maille de 2 mm de diamètre, pour la séparation des terres fines et des éléments grossiers ;
- des étiquettes en papier, pour indiquer les références de chaque échantillon prélevé.

2.1.3. Matériel de laboratoire

Au laboratoire, le matériel suivant a été utilisé :

- une pipette de Robinson, pour déterminer la granulométrie des échantillons de sol prélevés. Elle a permis de déterminer la texture du sol en séparant les fractions granulométriques :

les limons grossiers (20 à 50 μm) et fins (2 à 20 μm) ; les argiles (0 -à2 μm), les sables fins (50 à 200 μm) et grossiers (200 à 2000 μm).

- une balance, pour la pesée de la quantité de sol nécessaire pour l'analyse ;
- une canne de verre raccordée à une trompe à eau, pour siphonner les argiles et les limons ;
- un agitateur rotatif, pour agiter les allonges ;
- une étuve, pour sécher l'argile et le limon ;
- une tamiseuse FRITSCH, pour séparer la fraction granulométrique (sables et limons) ;
- un pH-mètre avec électrodes combinées, pour déterminer le pH eau du sol à l'aide de l'eau distillée comme réactif pour la préparation des solutions ;
- un agitateur mécanique, pour homogénéiser les solutions ;
- une balance, pour peser la quantité de sol utile.

2.2. Méthodes

2.2.1. Choix des zones, des sites d'étude et enquête de terrain

Le choix des zones d'étude a été fait essentiellement sur la base des données climatiques (pluviométrie : 1000 à 1600 mm) de 1971 à 2000 (MINAGRI, 2003), de la classe des sols, de la topographie (topographie plus ou moins plane et à pente faible (10 % ou plus)), de l'accessibilité des sites et de l'existence de plantations d'hévéa à différents stades de développement (plantations matures (âge > 6 ans) et immatures (âge < 6 ans)) et à différents précédents culturels. Certaines activités menées (stade de développement, précédent culturels, etc.) à ce stade du travail ont été possibles grâce à une enquête de terrain dont le protocole est résumé sur la fiche présentée en annexe 1.

2.2.2. Description du dispositif mis en place

Sur chaque site, quatre plantations d'hévéa matures et six plantations d'hévéa immatures ont été retenues. Selon les sites, les précédents culturels trouvés étaient divers : forêt et jachère à Man et Prikro, puis jachère et savane à Toumodi. Ces précédents étaient uniformément répartis entre les types de plantations d'hévéa, à savoir :

- pour les sites de Man et Prikro, deux plantations matures à précédent forêt contre deux autres à précédent jachère, puis trois plantations immatures à précédent forêt contre trois autres à précédent jachère ;

- concernant le site de Toumodi, on avait deux plantations matures à précédent jachère contre deux autres à précédent savane, puis trois plantations immatures à précédent jachère contre trois autres à précédent savane.

Tout cet ensemble s'apparente à un bloc de Fisher complètement randomisé.

2.2.3. Collecte des données

Deux types de données ont été collectés pour cette étude : les données de sols et les données agronomiques.

2.2.3.1. Données de sols

Les données de sols regroupent les données morpho-physiques et les données chimiques.

2.2.3.1.1. Propriétés morpho-physiques et classes des sols

Les propriétés morpho-physiques des sols ont été collectées sur le terrain au cours d'une caractérisation morphophysique des sols de chaque parcelle d'étude. Pour ce faire, trois fosses pédologiques de dimension 120 cm de longueur, 80 cm de largeur et 150 cm de profondeur ont été ouvertes le long d'une toposéquence orientée est-ouest à l'effet, non seulement, d'évaluer les principales caractéristiques des sols utiles pour la mise en place durable d'une hévéaculture (Compagnon, 1986 ; Obouayeba, 2005 ; Obouayeba *et al.*, 2016), mais aussi, de déterminer la classe des sols selon la version 2022 de la Base de Référence Mondiale des Ressources en sol (WRB). Au total, 30 parcelles ont été prospectées et donc 90 fosses décrites. A l'emplacement de chaque fosse, les coordonnées géographiques ont été relevées (longitude et latitude).

❖ Propriétés morpho-physiques

Elles sont constituées par la profondeur, la charge en éléments grossiers, la texture, la densité apparente, la capacité de stockage en eau et la réserve utile en eau du sol.

- Profondeur du sol

Des fosses de 150 cm de profondeur en absence d'obstacle ont été ouvertes le long des toposéquences. Cette profondeur a été choisie, car les hévéas préfèrent des sols profonds à cause de leurs racines dont le pivot va en profondeur. Par contre, si un obstacle (induration, hydromorphie) est rencontré, la mesure de la fosse est prise jusqu'au niveau de l'obstacle rencontré.

La texture du sol a été déterminée par la méthode du boudin sur le terrain.

- **Charge en éléments grossiers des sols**

La charge en éléments grossiers des sols a été déterminée au laboratoire. Les échantillons ont été tamisés à l'aide d'un tamis à mailles de 2 mm. Les éléments grossiers ($\varnothing > 2$ mm) constituant le refus ont été lavés à l'eau, afin d'éliminer toute la terre fine adhérente aux éléments grossiers (Baize, 2000), séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures et pesés. La masse du refus a été rapportée à la masse totale de l'échantillon. Le taux d'éléments grossiers a été déterminé par la formule suivante :

$$\text{Taux d'éléments grossiers (\%)} = \frac{\text{masse du refus de tamis}}{\text{masse totale de sol}} \times 100 \quad (1)$$

- **Densité apparente**

La densité apparente (d_a) des sols a été déterminée par la méthode au sable (Yoro, 1992). La méthode au sable consiste à creuser une cavité dans le sol, à l'intérieur d'une plaque métallique fixée parallèlement à la surface du sol par des piquets (Figure 5). La totalité de la terre est recueillie pour en déterminer le poids sec. La cavité est ensuite remplie à l'excès, avec le sable marin préalablement calibré. La surface de la plaque est rasée et l'excédent récupéré dans un sachet. Au laboratoire, le reliquat est pesé, et on détermine ainsi la quantité de sable versée. Cette valeur est la différence entre le poids initial de sable et celui du reliquat. Le sable marin a été au préalable dessalé par trempage dans de l'eau de robinet, séché à l'air libre et tamisé, successivement, à l'aide des tamis à mailles carrées de 2, 1 et 0,8 mm. A l'issue de ce traitement, deux classes dimensionnelles (2-1 mm et 1-0,8 mm) de sable sec et coulant ont été obtenues. C'est la classe la plus abondante (1-0,8 mm), de masse volumique 1,56 g/cm, qui a été utilisée pour les mesures de la densité apparente.

Des paquets de sable de 2 kg ont été constitués pour les mesures sur le terrain. Les mesures ont été réalisées dans les 50 premiers centimètres du sol, parcourus par la majeure partie des racines, au haut de versant, à la mi-versant et au bas de versant. Chaque mesure a été répétée 3 fois par position topographique. La densité apparente a été déterminée selon l'équation :

$$d_a = \frac{M}{V} \quad (2)$$

d_a : densité apparente (g.cm^{-3}), M : masse sèche de l'échantillon (g) et V : volume de l'échantillon prélevé et séché (cm^3).

Le volume (V) de l'échantillon prélevé et séché est déterminé par l'équation suivante :

$$V = (\text{Poids de sable calibré} - \text{Poids de sable restant}) \times 1,56 \quad (3)$$



a. Fixation de la plaque métallique au sol et prélèvement de sol



b. Remplissage à l'excès puis rasage de surface du sol



c. Récupération de l'excédent de sable marin

Figure 5 : Différentes phases de mesure *In situ* de la densité apparente par la méthode au sable

- **Estimation du stock d'eau dans le sol**

L'évaluation du stock d'eau dans le sol sous culture d'hévéa a été faite par la détermination des propriétés hydrodynamiques du sol, notamment les paramètres tels que l'humidité pondérale du sol, la capacité de stockage en eau (CSE) et la réserve utile en eau (RU).

- **Humidité pondérale**

L'humidité pondérale (Hp) des sols a été déterminée par la méthode gravimétrique (Vilain, 1997). Des prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués dans les tranches 0 - 30 et 30 - 60 cm à l'aide de tarières hélicoïdales et d'un plateau de prélèvement de sol (Figure 6). Trois mesures ont été effectuées par parcelle de 0,5 - 1 ha. Le poids frais (P1) de chaque échantillon est déterminé *In situ* avec une balance de précision au 1/100^e. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre au laboratoire. Un sous échantillon de 150 g représentatif est constitué après séchage des échantillons pour être séché à l'étude à 105 °C pendant 48 heures. Les échantillons étuvés sont ensuite pesés pour déterminer leur poids sec (P2). La masse d'eau contenue dans le sol au moment où les échantillons ont été prélevés correspond à la différence entre (P1) et (P2). Cette masse d'eau est ensuite rapportée au poids sec, pour obtenir l'humidité massique ou pondérale (Hp) selon l'équation :

$$Hp = \frac{P1-P2}{P2} \times 100 \quad (4)$$

Avec P1 : poids frais des échantillons *In situ* et P2 : poids sec des échantillons après étuvage.

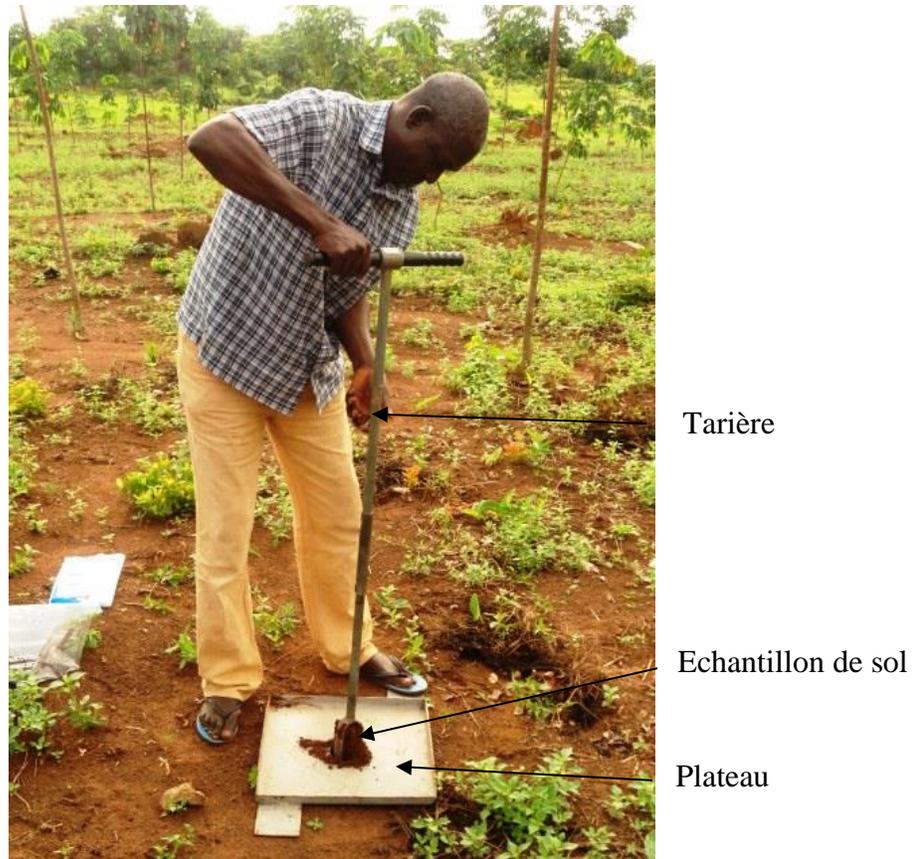


Figure 6 : Prélèvement de sol à la tarière

- Capacité de stockage en eau

La capacité de stockage en eau (CSE) d'un sol est le volume maximal d'eau qu'il retient contre les seules forces de gravité, c'est-à-dire après ressuyage spontané (Baize *et al.*, 1995). Elle correspond à la capacité de rétention, c'est-à-dire un réservoir et non une réserve d'eau. Elle est exprimée par une hauteur d'eau. Cette notion exclue d'une part, les remontées capillaires qui pourraient se produire à partir de nappes ou des horizons profonds et d'autre part, l'action des végétaux. Elle est calculée à partir de la formule établie par Laroche (1997) :

$$CSE = Hv * E \quad (5)$$

Avec :

$$Hv = Hp * da \quad (6)$$

CSE: Capacité de Stockage en Eau (mm) ; Hv : Humidité Volumique (%) ; Hp : Humidité Pondérale (%) ; E : Epaisseur de sol (Cm) ; da : densité apparente.

- **Réserve utile en eau**

La réserve utile en eau (RU) est la quantité maximale d'eau retenue à un instant donné, accessible à la plante. Elle dépend de la texture, de la structure du sol, de la profondeur d'enracinement du végétal et de la charge en éléments grossiers. Elle se différencie de la CSE, en prenant en compte les remontées capillaires. Cette réserve n'est pas fixe, elle évolue au cours du temps, en fonction des arrivées (précipitations), des besoins de la plante et de l'évaporation (Baize *et al.*, 1995). Ce dernier paramètre varie en fonction des caractères physiques propres au sol (exposition, inclinaison, position topographique, couverture végétale, etc.). La RU est la quantité d'eau se situant entre la capacité au champ et le point de flétrissement ; elle représente la moitié de la CSE. Elle a été mesurée sur les 60 premiers centimètres du sol et a été calculée à partir de la formule établie par le GEPPA (1981) :

$$RU = \frac{1}{2} \times CSE \quad (7)$$

RU : réserve utile en eau (mm) ; CSE : capacité de stockage en eau (mm).

❖ **Classe des sols**

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, 2022). Dans un premier temps, une liste de tous les horizons, propriétés et matériaux diagnostiques observés est dressée, puis, dans un second temps, seul le critère 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 diagnostiques 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 qualificatifs supplémentaires. Les premiers correspondent aux caractéristiques typiques du sol résultant du

processus pédogénétique principal. Les seconds différencient les sols selon des caractéristiques du sol résultant de tout processus pédogénétique secondaire ayant affecté de manière significative les caractéristiques primaires du sol telles que les caractéristiques du sol qui ont un effet significatif sur son utilisation. Par convention, les qualificatifs principaux sont listés par ordre d'importance tandis que les qualificatifs supplémentaires n'ont d'autre ordre qu'alphabétique. Ainsi, les qualificatifs principaux sont ajoutés devant le nom du RSG, sans parenthèses et sans virgules ; leur séquence progresse de droite à gauche, de sorte que le qualificatif le plus important se retrouve dans la position la plus proche du nom du RSG. Les qualificatifs supplémentaires sont placés entre parenthèses après le nom du RSG et sont séparés les uns des autres par des virgules ; leur séquence va de gauche à droite, le premier qualificatif selon l'alphabet étant le plus proche du nom du RSG.

2.2.3.1.2. Propriétés chimiques des sols

Au cours de la phase précédente de caractérisation des sols sur le terrain, deux échantillons de sols ont été constitués par fosse, le premier dans la couche de 30 à 60 cm et le deuxième dans la couche de 0 à 30 cm. Ces échantillons ont été transmis au Laboratoire de Végétaux et Sol (LAVESO) de l'Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INPHB) de Yamoussoukro pour analyse. Les propriétés chimiques mesurées sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

❖ pH_{eau}

La mesure du pH a été réalisée au laboratoire, par lecture directe au pH-mètre selon un rapport sol/eau distillée de 1 : 2,5 ; après agitation de la suspension (Anderson & Ingram, 1993 ; AFNOR, 1999).

❖ Matière organique

Les analyses de la matière organique ont pris en compte le carbone organique total et l'azote total. Les sols ont été tamisés puis séchés à température ambiante. Le carbone organique total a été mesuré par voie humide à température de réaction de 120°C (Voko *et al.*, 2013). La matière organique (MO) est calculée selon la relation :

$$MO (\%) = \text{carbone} \times 1,724 \quad (8)$$

L'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl (Mohammad & Flowers, 2004) qui consiste à attaquer à chaud la matière vivante par l'acide sulfurique (H₂SO₄) concentré en présence

de catalyseurs (SO_4K_2 , SO_4Cu , Sélénium). La solution d'extraction est distillée avec un excès de soude et titrée par l'acide sulfurique H_2SO_4 (1 N). Les teneurs en carbone organique ont été déterminées selon la méthode Walkley-Black (2006).

Le rapport C/N, déduit des valeurs du carbone et de l'azote totaux, fournit d'utiles indications sur l'évolution de la matière organique et de l'activité biologique du sol. Selon Keita *et al.*, (2000) et Assa, (2005) le rapport carbone azote (C/N) s'interprète de façon suivante :

❖ **Phosphore**

Le phosphore (P), essentiellement à l'état d'orthophosphates liés au calcium (apatites), est un élément majeur relativement peu abondant dont les teneurs moyennes estimées sont de l'ordre de 0,1 %. En général, le P total et le P assimilable (Pansu et Gautheyrou, 2003) est déterminé. Le P total, comprenant les phosphores organique et inorganique, est déterminé après minéralisation totale par voie humide en attaquant 5 g de sol broyé avec un réactif composé d'acide perchlorique 60 %, d'acide nitrique $d = 1,4$ et d'eau distillée. Le P assimilable correspondant au phosphore biologique le plus disponible (forme labiles organiques et inorganiques et P microbien) est extrait dans le bicarbonate de sodium à pH 8,5 (Voko *et al.*, 2013).

❖ **Capacité d'échange cationique, bases échangeables et taux de saturation**

Les bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) et la CEC (cmol.kg^{-1}) ont été extraites à l'acétate d'ammonium 1 M tamponnée à pH = 7. Le calcium et le magnésium ont été quantifiés par spectrophotométrie d'absorption atomique. Quant au potassium, il a été mesuré à travers une spectrophotométrie à flamme (Eponon *et al.*, 2019). La capacité d'échange cationique (CEC) est déterminée comme le degré ou la possibilité d'un substrat de stocker les éléments nutritifs (Duchaufour, 1977).

Le taux de saturation du complexe absorbant est un précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du sol (Soltner, 1992). Toutefois, il faut se garder d'établir une équivalence automatique entre taux de saturation et niveau trophique. Car le niveau trophique (fertilité) du sol dépend de beaucoup d'autres facteurs tels que : la teneur en argile, la structuration, l'aération, le pH et la profondeur d'enracinement.

Le taux de saturation en base V a été calculé avec la formule suivante :

$$V = \frac{\sum[X]}{CEC} \times 100 \quad (9)$$

Avec [X] : concentration en ion.

Les résultats des analyses chimiques ont été interprétés selon les normes établies par Assa (2005) consignées dans le Tableau II ci-dessous.

Tableau II : Niveaux critiques d'interprétation des valeurs de quelques éléments chimiques

Propriétés chimiques	Valeurs des propriétés chimiques et limitations correspondantes				
pHeau	< 5,0 très faible	5,0 à 5,5 faible	5,5 à 6 optimale	> 7 élevée	-
N total (g.kg ⁻¹)	< 0,5 très faible	0,5 à 1 faible	1 à 1,5 optimale	> 2,5 élevée	-
P ass (g.kg ⁻¹)	< 15 très faible	15 à 25 faible	25 à 50 optimale	> 100 élevée	-
MO	1 à 5 sol dégradé	5 à 7 sol instable	7 à 9 sol moyennement riche en m.o	> 9 sol riche en m.o	-
C org (g.kg ⁻¹)	< 0,5 très faible	0,5 à 1 faible	1 à 1,5 optimale	> 2,5 élevée	-
K (cmol.kg ⁻¹)	< 0,1 très faible	0,1 à 0,15 faible	0,15 à 0,40 optimale	> 15 élevée	-
Ca (cmol.kg ⁻¹)	< 1 très faible	1 à 2,5 faible	2,5 à 3,5 optimale	> 7 élevée	-
Mg (cmol.kg ⁻¹)	< 0,5 t rès faible	0,5 à 1 faible	1 à 1,5 optimale	> 3 élevée	-
Capacité d'échange cationique(CEC) en cmol.kg ⁻¹	< 2 très faible	2 à 3 faible	3 à 8 normale	8 à 15 élevé	> 15 très élevé
Somme des bases échangeables (S) en cmol.kg ⁻¹	< 1,5 très faible	1,5 à 3 faible	3 à 6 moyenne	6 à 12 bonne	> 12 très bonne
Taux de saturation (S x 100)/CEC en %	-	< 50 complexe désaturé	50 à 70 complexe moyennement saturé	> 70 complexe saturé	-

Source : Assa, 2005

2.2.3.2. Données agronomiques

Les données agronomiques mesurées sont celles qui servent habituellement à évaluer la productivité d'une plantation d'hévéa (Obouayeba, 2005 ; Okoma, 2008). Ce sont : le taux de mortalité, l'accroissement isodiamétrique, le taux d'encoche sèche, la production de caoutchouc et les paramètres du micro diagnostic latex (extrait sec, saccharose, phosphore inorganique et le groupement thiols).

2.2.3.2.1. Mesure du taux de mortalité

Les données portant sur le taux de mortalité ont été obtenues par dénombrement suivant deux critères :

- tout plant nécrosé, manquant ou se cassant facilement a été considéré mort ;
- tout plant encore vert a été considéré vivant.

Le taux de mortalité a été calculé suivant la formule ci-après :

$$Tm (\%) = \frac{\text{nbre de plant mort}}{\text{nbre total de plant}} \times 100 \quad (10)$$

Avec : Tm : Taux de mortalité des plants, Nbre de plant mort : Nombre de plant mort, Nbre total de plant : Nombre total de plant sur la parcelle.

2.2.3.2.2. Croissance isodiamétrique des arbres

Sur chaque parcelle expérimentale, les mesures de circonférence des arbres en saignée ont été réalisées à 1,70 m du sol à l'aide d'un mètre ruban, pour apprécier la croissance des arbres au cours de la saignée chaque année (Adou, 2019). Cette hauteur a été choisie pour éviter la zone de saignée des arbres à 1,20 m du sol. Les mesures sur les arbres retenus, ont été faite avant le début de la défoliation annuelle, plus précisément en janvier, pour apprécier l'accroissement des arbres à chaque campagne de saignée ou chaque année. L'accroissement moyen annuel de la circonférence du tronc a été déterminé par la relation suivante :

$$Acc_{moy} = \frac{(Circ_i - Circ_0)}{i} \quad (11)$$

Avec : Acc_{moy} : Accroissement moyen annuel de circonférence (Cm) ; $Circ_i$: Circonférence des arbres en fin d'expérimentation (Cm) ; $Circ_0$: Circonférence des arbres en début d'expérimentation (Cm) ; i : nombre d'année d'expérimentation.

2.2.3.2.3. Relevé d'encoche sèche

Un relevé complet d'encoche sèche a été effectué sur tous les arbres de chaque parcelle expérimentale en saignée, pour déterminer les arbres sains et les arbres malades. La méthode de relevé rapide par estimation visuelle a permis de rendre compte de l'apparition et de l'état d'avancement de l'encoche sèche (Van De Sype, 1984). Les arbres présentant un écoulement normal de latex sur toute la longueur de l'encoche après la saignée ont été considérés comme sains et noté zéro (0). Les autres ont été considérés comme des arbres atteints d'encoche sèche et notés de 1 à 6, suivant la longueur de l'encoche qui ne produit pas de latex (Van De Sype, 1984 ; Okoma, 2008). Les données brutes de relevé d'encoche sèche ont permis de déterminer le taux d'encoche sèche ou la longueur d'encoche malade (LEM) de chaque parcelle expérimentale (Okoma, 2008). Pour chaque arbre saigné, il a été attribué un chiffre compris entre 0 et 6 (Tableau III).

Tableau III : Echelle de notation des longueurs d'encoches sèches

Note	(LEM %)	Signification
0	0	Arbres sains
1	1 à 20	Arbres atteints d'encoche sèche de très faible niveau
2	21 à 40	Arbres atteints d'encoche sèche de faible niveau
3	41 à 60	Arbres atteints d'encoche sèche de niveau moyen
4	61 à 80	Arbres atteints d'encoche sèche de niveau assez élevé
5	81 à 99	Arbres atteints d'encoche sèche de niveau élevé
6	100	Arbres atteints d'encoche sèche totale ou arbres secs

Avec LEM = Longueur d'Encoche Malade

Source : Okoma, 2008

Pour chaque parcelle, le peuplement d'arbres a été déterminé et le pourcentage de longueur totale d'encoche malade (LEM %) a été calculé de la manière suivante :

$$LEM (\%) = 100 \times (0,1n_1 + 0,3n_2 + 0,5n_3 + 0,7n_4 + 0,9n_5 + n_6 + ES) \times N^{-1} \quad (12)$$

Avec : 0 ; 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 et 1 : coefficient exprimant le pourcentage moyen d'encoche malade de la classe considérée (note attribuée) ;

N : Nombre total d'arbres ; n_i : Nombre d'arbres par classe d'encoche sèche ; ES : Nombre d'arbres dont la saignée est déjà arrêtée pour encoche sèche totale.

Également, pour chaque parcelle, le pourcentage d'arbres totalement secs a été déterminé par la relation ci-après :

$$\text{Arbres secs (\%)} = (n_6 + ES) \times N^{-1} \quad (13)$$

Avec : N : Nombre total d'arbres ; n_6 : Nombre d'arbres pour la classe 6 d'encoche sèche ; ES : Nombre d'arbres dont la saignée est déjà arrêtée pour encoche sèche totale.

2.2.3.2.4. Production de caoutchouc

La production a été enregistrée arbre par arbre sur chaque parcelle élémentaire (comportant 20 arbres), toutes les quatre semaines, en tenant compte du nombre de saignée par semaine ramené au mois. La production est ramassée à l'état coagulé. Le caoutchouc frais coagulé dans les conditions naturelles est appelé coagulum ou matière fraîche. Les coagulats ont été pesés individuellement, pour déterminer la masse de matière fraîche (MMFC) produite par chaque arbre. Un coefficient de transformation a permis de déterminer à partir de la masse de matière fraîche, la masse de caoutchouc sec (MMSC) produite sous forme de caoutchouc par arbre. Un échantillon de caoutchouc a été prélevé lors du contrôle de production, pour déterminer le coefficient de transformation (CT). Il a été pesé avant crêpage (masse totale de matière fraîche = MTMFC) et après crêpage (masse totale de matière sèche = MTMSC) par une crêpeuse.

Le crêpage a consisté à éliminer une grande partie de l'eau contenue dans le coagulum en le faisant passer entre deux rouleaux métalliques (crêpeuse) tournant en sens contraire. Le coagulum ainsi écrasé ressort sous forme de feuille plate, beaucoup plus facile à sécher que le coagulum dans son état initial. Seule une portion du coagulum pesée avant (MMFC) et après (MMSC), a été séchée à 80 °C à l'étuve pendant 24h. Le coefficient de transformation est alors défini par la formule :

$$CT = \frac{MMFC}{MMSC} \times \frac{MTMFC}{MTMSC} \quad (14)$$

La détermination du poids sec (PS) est effectuée à partir du poids frais (PF) et du coefficient de transformation (CF) selon la relation suivante :

$$PS = PF \times CT \quad (15)$$

Avec P.S : Poids de caoutchouc sec ; P.F : Poids de matière fraîche ; C.T : Coefficient de transformation.

Un contrôle de production de caoutchouc frais a été effectué par mois sur chaque parcelle expérimentale. Il a consisté à peser le caoutchouc frais produit par la parcelle dans le mois et à enregistrer son poids sur une fiche de contrôle de production élaborée à cet effet. Cette fiche renseigne également sur le nombre d'arbres saignés et sur le nombre de saignée réalisée par mois. Les données brutes du contrôle de production ont été analysées pour déterminer la production moyenne mensuelle de caoutchouc frais en kilogramme et en gramme par arbre par saignée ($\text{g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) de chaque parcelle expérimentale. La production en caoutchouc est exprimée en grammes par arbre par saignée ($\text{g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) et en kilogrammes par hectare par an ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Ces expressions permettent d'avoir la quantité de caoutchouc qu'un arbre produit lors d'une saignée et sur un hectare (ha).

2.2.3.2.5. Micro diagnostic latex

Le Micro-Diagnostic Latex (MDL) a permis de savoir si les arbres ont une meilleure qualité ou non d'écoulement et de régénération et donc, de production de caoutchouc. Ainsi, les paramètres physiologiques, les plus importants du latex (taux d'extrait sec, teneurs en saccharose, en phosphore inorganique et en groupements thiols), ont été analysés une fois par an. Pour ce faire, dans chaque parcelle expérimentale en saignée, un prélèvement de latex (Figure 7) pour analyses a été effectué de façon aléatoire sur 6 arbres de chaque diagonal et sur 6 arbres de 2 cotés. Puis, le latex de chaque diagonal et de chaque côté a été mélangé pour en constituer des échantillons ; soit au total, 24 arbres repartis en 4 échantillons de 6 arbres. Les arbres de bordure n'ont pas été pris en compte.

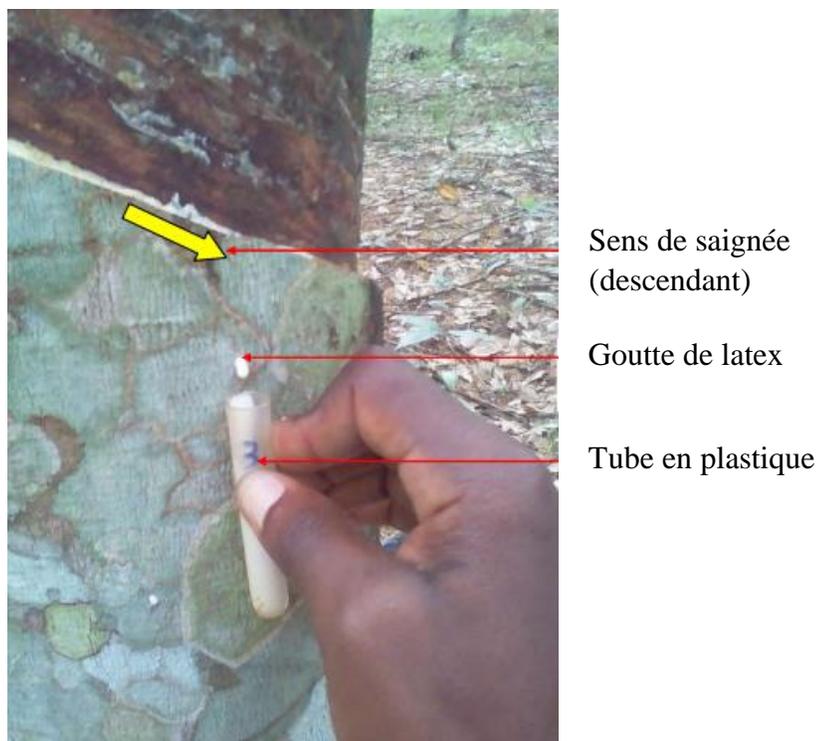


Figure 7 : Prélèvement du latex sur un pied d'hévéa en saignée descendante

❖ **Mesure de l'extrait sec**

La teneur en matière sèche du latex a été déterminée par la méthode mise au point par Jacob *et al.*, (1988). Le principe est le suivant :

Un (1) ml de latex de chaque échantillon est pesé dans un pilulier de 10 ml, avant et après étuvage à 80 °C pendant 24 h. La masse à vide du pilulier (PV) est déterminée et la teneur en matière sèche ou extrait sec (Ex.S) est alors exprimée comme suit:

$$\text{Ex.S (\%)} = \frac{(\text{PS} - \text{PV})}{(\text{PF} - \text{PV})} \times 100 \quad (16)$$

Avec : Ex.S (%) : pourcentage d'extrait sec; PS (g) : masse de matière sèche après étuvage; PV (g) : masse du pilulier à vide; PF (g) : masse de matière fraîche.

- **Echantillonnage et préparation du sérum-TCA**

Du latex a été récolté dans un tube en plastique après piqûre du tronc juste en dessous de l'encoche de saignée très tôt le matin aussi bien pour les arbres saignés que pour les arbres non saignés. Pour chaque arbre sélectionné, environ dix gouttes de latex sont laissées tomber pour éliminer les impuretés, puis le tube de prélèvement est rempli au 2/3. Ainsi, les latex de arbres d'un

même traitement ont été mélangés dans un même tube de 10 ml pour constituer l'échantillon représentatif. Afin d'extraire les constituants du latex, il a été coagulé à l'aide d'une solution d'acide trichloro acétique (TCA) concentrée à 2,5 %. Le dosage des paramètres physiologiques a été réalisé avec le sérum TCA (acide trichloro acétique) obtenu par dilution de 1 ml de latex dans 9 ml de TCA 2,5 %. L'extraction des constituants a consisté à ajouter dans un pilulier de 15 ml, 9 ml de TCA concentré à 2,5 % et 1 ml d'échantillon de latex prélevé (Figures 8A et B). Le latex, une fois coagulé dans la solution de TCA contenue dans le pilulier, a été comprimé à l'aide d'une baguette en verre (Figure 8C). La partie solide a été retirée à l'aide d'une pince et la solution obtenue appelée « sérum-TCA » a été ensuite filtrée sur de la laine de verre (Figure 8D). Cette filtration a permis d'éliminer les impuretés, notamment les particules de caoutchouc restant en suspension. Ce sérum-TCA a été conservé pour le dosage du saccharose, du phosphore et des groupements thiols selon la méthode du micro diagnostic latex de Jacob *et al.*, (1988).



Figure 8 : Processus de constitution du sérum-TCA

A: pipetage du latex prélevé; B: coagulation de latex dans de l'acide trichloroacétique (TCA); C: retrait de latex coagulé; D: filtrage du sérum-TCA à l'aide de la laine de verre

❖ **Saccharose**

Le saccharose (sac) du latex a été dosé par la méthode à l'Anthrone mise au point par Ashwell (1957). En présence d'acide sulfurique concentré, les hexoses se déshydratent pour donner un furfural qui réagit avec l'Anthrone (réactif) en donnant une coloration bleu-vert dont l'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 627 nm. Le fructose qui est l'un des constituants du saccharose se déshydratent facilement, contrairement au glucose (autre élément constitutif du saccharose) dont la réaction nécessite un chauffage.

Ainsi, il a été possible de doser séparément le fructose (sans chauffage) ou l'ensemble des hexoses (fructose et glucose) en chauffant les solutions. La teneur en saccharose du latex a été déterminée à partir du dosage des solutions d'une gamme étalon de saccharose et est exprimée en millimole par litre (mmol.l^{-1}).

❖ **Phosphore inorganique**

La méthode utilisant le molybdate d'ammonium et le vanadate d'ammonium mise au point par Taussky et Shorr, (1953) a permis de doser le phosphore inorganique (Pi). Son principe est le suivant :

En présence de molybdate d'ammonium et de vanadate d'ammonium, le phosphore forme un complexe phospho-vano-molybdique de couleur jaune intense. L'absorbance du produit coloré est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 410 nm.

La teneur en Pi du latex a été déterminée à partir du dosage des solutions d'une gamme d'étalon de potassium dihydrogenophosphate et est exprimée en millimole par litre (mmol.l^{-1}).

❖ **Groupements thiols**

Le dosage des composés thiols (R-SH) a été effectué par la méthode de Boyne & Ellman (1972) utilisant l'acide dinitro-2,2'-dithio-5-5'-dibenzoïque (DTNB). Les composés R-SH réagissent avec cet acide pour donner l'acide thio-nitro-benzoïque (TNB) de couleur jaune dont l'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 410 nm. Le TNB est révélé par le tampon Tris en donnant une coloration jaune dont la densité optique (D.O) est lue à la longueur d'onde de 410 nm. La teneur en groupements thiols du latex a été déterminée à partir du dosage des solutions d'une gamme étalon de glutathion et est exprimée en millimole par litre (mmol.l^{-1}).

L'interprétation des teneurs du micro diagnostic latex obtenues, pour chaque paramètre évalué, a été faite en tenant compte des valeurs de références définies par Jacob *et al.* (1988) et présentées dans le Tableau IV.

Tableau IV : Valeurs de référence des quatre paramètres physiologiques du Micro Diagnostic Latex (MDL)

	Ex.S (%)	Sac (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	R-SH (mmol.l ⁻¹)
Très élevé	> 43	> 12	> 25	> 0,90
Elevé	38 à 43	9 à 12	20 à 25	0,80 à 0,90
Moyen	33 à 38	6 à 9	15 à 20	0,60 à 0,80
Faible	29 à 33	4 à 6	10 à 15	0,50 à 0,60
Très faible	≤ 29	≤ 4	≤ 10	≤ 0,50

Source : Jacob *et al.*, 1988

Ex.S (%) : taux moyen d'extrait sec du latex exprimé en pourcentage ; Sac (mmol.l⁻¹) : teneur moyenne en saccharose du latex exprimée en millimole par litre ; Pi (mmol.l⁻¹) : teneur moyenne en phosphore inorganique du latex exprimée en millimole par litre ; R-SH (mmol.l⁻¹) : teneur moyenne en groupements thiols du latex exprimée en millimole par litre.

2.2.4. Traitements des données

Les différents traitements des données réalisés visaient à comparer les sols des sites relativement à leurs caractéristiques pédologiques comme agronomiques, déterminer le meilleur précédent cultural pour l'hévéaculture et élaborer les cartes d'aptitudes culturales des sols des différents sites.

2.2.4.1. Comparaison des sols étudiés

La comparaison des données collectées a été faite par le biais des analyses statistiques. A cet effet, les données pédologiques et agronomiques ont été saisies et traitées à l'aide du tableur Excel et les représentations graphiques ont été faites à l'aide de ce même logiciel version 2016.

Les données recueillies (granulométriques, chimiques, EG, da, CSE, RU, production, accroissement, phosphore inorganique, saccharose et groupement thiols) ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) pour comparer les valeurs moyennes, après avoir préalablement établi l'homogénéité des variances. Lorsqu'une différence significative est observée, les moyennes

sont alors séparées, en effectuant le test de Student-Newman-Keuls (SNK), au seuil de 5 % pour classer et savoir lesquels des groupes sont différents. Pour les pourcentages (sensibilité à l'encoche sèche ; extrait sec), le test non paramétrique de Kruskal Wallis au seuil de 5 % a été utilisé pour déterminer les différences significatives. Car ces données ne suivaient pas de loi normale de probabilité. Ces tests ont été réalisés à l'aide du logiciel Rstudio version 4.1. Par convention d'écriture, les signes utilisés pour indiquer et apprécier le degré de signification des probabilités sont les suivants : $p < 0,05$ (significatif), $p < 0,01$ (hautement significatif) et $p < 0,001$ (très hautement significatif).

2.2.4.2. Détermination du meilleur précédent cultural

La relation entre les précédents cultureux et les paramètres agronomiques a été déterminée par la corrélation de Pearson, qui permet d'évaluer l'intensité et le sens de la relation linéaire entre deux séries de données provenant de l'échantillonnage de deux variables métriques. Cette relation a été complétée par une Analyse en Composantes Principales (ACP) normées, qui, lorsqu'appliquée à différentes variables, ici, les variables du biotope (forêt, jachère et savane) et agronomiques (production, phosphore inorganique, extrait sec, longueur d'encoche malade, groupement thiols, saccharose et accroissement), permettent de mettre en évidence les différentes interactions qui existent entre ces variables. Elle transforme par combinaison linéaire, les variables initiales en variables synthétiques indépendantes, qui maximisent la variance des échantillons. La variable synthétique dont la variance est la plus élevée est appelée axe 1 ou F1 ; celle qui suit est appelée axe 2 ou F2, etc. Alors, le meilleur précédent cultural est celui qui sera corrélé au plus grand nombre de variables de production. Comme dans le cas précédent, la corrélation de Pearson et l'ACP ont été réalisés à l'aide du logiciel Rstudio version 4.1.

2.2.4.3. Elaboration des cartes d'aptitudes culturelles des sols

Le logiciel ArcGis 4.1 a été utilisé pour réaliser les différentes activités de cette étape du travail.

Pour l'élaboration des cartes d'aptitudes culturelles, la technique d'interpolation de type IDW (pondération par l'inverse de la distance) a été utilisée. Les données pédologiques recueillies au niveau des fosses et afférentes à la profondeur, taux éléments grossiers, densité apparente et stock en eau ont été interpolées sur l'ensemble de chaque zone d'étude pour obtenir des cartes

thématiques. Les classes d'aptitudes des sols de ces cartes thématiques ont été obtenues par codification à partir des seuils présentés dans le tableau V. La carte d'adéquation globale a été obtenue en superposant les sous-cartes d'adéquation ou cartes thématiques. A cet effet, la méthode de superposition pondérée a été utilisée.

Pour vérifier les prédictions faites sur la carte finale d'aptitudes des sols à l'hévéaculture une prospection des sols a été réalisée en utilisant une tarière. A cet effet, 200 points de vérification différents des points ayant servi à réaliser la carte ont été effectués par zone.

Tableau V : Critères d'appréciation des sols pour l'hévéaculture

<i>Critères d'appréciation</i>	<i>Aptitude pour l'hévéaculture des types de sol</i>				
	Bonne	Assez bonne	Passable	Médiocre	Mauvaise
Profondeur utile du sol, limitée par une roche ou cuirasse (cm)	> 110	110 - 80	75 - 60	55 - 30	< 30
Texture (% A+Lf)	30 - 45	55 - 46	29 - 20	19 - 10 où 56-65	< 09 où ≥ 66
Profondeur d'apparition de l'hydromorphie (cm)	> 100	95 - 70	65 - 50	45 - 30	< 25
Pierrosité de surface, (% en R ou Cu affleurantes) dans un rayon de 25 m du profil	< 1,0	1,5 à 2,5	2,6 à 3,5	3,6 à 6,0	> 6,0
Teneur volumique du sol en éléments grossiers ferruginisés, concrétionnés (%)	< 10	11 à 30	31 à 50	51 à 70	> 70
Densité apparente (g.cm ⁻³)	1	1 à 1,5	1,5 à 1,8	1,8 à 2	> 2
Teneur en eau du sol (mm)	200	100 à 200	50 à 100	50 à 25	< 25

Source: (Compagnon, 1986)

TROISIEME PARTIE

Résultats et Discussion

3.1. RESULTATS**3.1.1. Etat du développement et contrainte de l'hévéaculture dans les zones d'étude selon l'enquête****3.1.1.1. Etat du développement de l'hévéaculture**

Malgré les incertitudes relatives à l'aptitude des sols à l'hévéaculture dans les zones d'étude, des initiatives privées ont conduit à la création de plusieurs plantations sur des superficies estimées à environ 3 348 ha avec près de 966 planteurs (Tableau VI). La localité de Toumodi compte la plus grande superficie plantée avec 2530,8 ha pour 165 planteurs. Elle est suivie de la région de Prikro avec 655 ha pour 653 planteurs. La localité de Man compte la plus faible superficie plantée avec 163 ha et 148 planteurs. Aujourd'hui, ces initiatives sont de plus en plus renforcées par les structures officielles d'encadrement qui commencent à s'y installer.

Tableau VI : Nombre de planteurs d'hévéa et superficies plantées dans la zone d'étude

Localités	Nombre de planteurs	Superficie plantée (ha)
Man	148	163
Toumodi	165	2530,8
Prikro	653	655
Total	966	3348,8

3.1.1.2. Contrainte au développement hévéicole

Les principales contraintes relevées par les acteurs sont diverses. En effet, les saisons sèches de plus en plus longues dues à la variabilité climatique avec pour conséquence la réduction de la pluviométrie causent de fréquents feux de brousse dans ces régions et plus principalement à Toumodi où les feux de brousse ont détruit des plantations d'hévéas (Figure 9a). Aussi, d'importants dégâts causés par les termites et autres insectes qui forent l'écorce des arbres en y installant leurs nids ont été observés. Par ailleurs, les sols présentent des aspects de cuirassement (Figure 9b), compact à faible profondeur (Figure 9c) et avec des affleurements de granites. A ces

contraintes naturelles, il faut ajouter le mauvais état des routes et les conflits fonciers qui sont principalement dus aux dégâts de bovidés. La main d'œuvre agricole est également moins disponible, car selon les acteurs interrogés, les jeunes sont de moins en moins intéressés aux travaux champêtres qu'ils trouvent harassant. Toutes ces contraintes se traduisent par de nombreux cas d'échecs de la culture de l'hévéa. Cependant, malgré toutes ces contraintes des plantations d'hévéa réussirent (Figure 9d) existent même si les raisons de ces succès n'ont pas encore été expliquées par la science, vu les critères actuels de marginalité.



Figure 9 : Aspects des paysages observés dans la zone d'étude ; a : Plantation après feu de brousse ; b : Sol présentant des cuirasses ; c : Sol compact d : Plantation d'hévéa réussie

3.1.2. Caractéristiques morpho-physiques des sols des zones d'étude

La caractérisation morphologique du sol montre que les sols des trois nouvelles zones de culture de l'hévéa sont variables du point de vue de la profondeur et de la couleur, et présentent diverses contraintes plus ou moins importantes selon la localité, la position topographique et la profondeur du sol (Tableau VII).

3.1.2.1. Caractéristiques morphologiques des sols

❖ Cas des sols de Man

Dans la localité de Man, les sols sont généralement profonds (≥ 150 cm) à tous les niveaux de la toposéquence. Toutefois, un taux élevé d'éléments grossiers est observé entre 40 et 90 cm de profondeur aux hauts de versants. Les horizons organo-minéraux en surface sont globalement épais d'au moins 20 cm sur toute la toposéquence. Dans cette région montagneuse, les sols présentent généralement des horizons de surfaces organo-minéraux de couleur variable de 10YR 3/2 (brun grisâtre) à 7,5YR 3/2 (brun foncé) selon la position topographique. Le drainage interne y est bon avec une structure polyédrique subangulaire et une forte activité biologique rencontrée principalement dans les horizons de surface. Quant aux horizons B de profondeur, ils ont une coloration variant de jaune rougeâtre (7,5YR 6/8) à brun jaunâtre (10YR 6/4). La consistance varie de meuble (haut et bas de versant) à peu compact (mi-versant) avec parfois assez d'éléments grossiers rencontrés à partir de 40 cm (haut versant) et parfois des tâches d'hydromorphisme (bas-versant). Cependant, aucune contrainte n'a été observée aux mi-versants (Tableau VII).

❖ Cas des sols de Toumodi

A Toumodi, les sols sont moyennement profonds (< 150 cm) à tous les niveaux de la toposéquence, mais principalement au niveau des bas de versants (Figure 10) où des nappes phréatiques ont été observées à faible profondeur (< 100 cm). Par ailleurs, une profondeur d'apparition des éléments grossiers généralement inférieure à 30 cm est observée dans les hauts de versants. Les horizons organo-minéraux de surface sont dans l'ensemble moins épais (< 20 cm) que dans le cas précédent. La couleur des sols varie du brun au brun foncé (10YR4/2 et 7,5YR3/2) du haut au bas de versant. La structure de ces horizons est grumeleuse contre une structure polyédrique subangulaire pour ce qui est des hauts et bas de versants (Tableau VII). En ce qui concerne les horizons B, ils sont peu compacts, humides et poreux avec une présence d'induration

et de compactations à partir de 60 cm de profondeur. Ce qui a conduit à une proportion de contrainte élevée pour la culture de l'hévéa au niveau des mi-versants. Les horizons B avaient en général une structure polyédrique subangulaire. La consistance a varié de peu compact (haut et bas de versant) à compact (mi-versant) avec parfois assez d'éléments grossiers rencontrés à partir de 30 cm (haut versant), de l'hydromorphisme (bas-versant) et parfois des carapaces (mi-versant) rencontrées à 130 cm (Tableau VII).

❖ **Cas des sols de Prikro**

Les sols de Prikro présentent généralement des horizons organo-minéraux de surface épais (≥ 20 cm) et des profondeurs globalement importantes. Concernant les couleurs des horizons A, elles varient du brun foncé (7,5YR3/4 et 2/4) aux hauts et mi de versants au brun (10YR4/2) pour les bas-versants. Ces sols sont en général humides et poreux avec une structure polyédrique subangulaire (Tableau VII). Les horizons organo-minéraux sont très épais et meuble avec une très faible contenance en éléments grossiers (< 10 % d'éléments grossiers) sur toute la toposéquence. Par contre, les horizons B contiennent assez d'éléments grossiers avec parfois des indurations aux mi-versants et des tâches d'hydromorphie aux bas de versants. La structure est également polyédrique subanguleuse avec une consistance allant de peu compact à compact. Les couleurs varient en fonction de la position en allant de brun rougeâtre (2,5YR4/8 et 5YR3/3) aux hauts et mi de versants et du brun jaunâtre (10YR6/4) aux bas de versants. La consistance va de peu compact (haut et bas de versant) à compact (mi-versant) avec parfois assez d'éléments grossiers rencontrés à partir de 50 cm (haut versant), de l'induration (mi-versant) à 130 cm et des tâches d'hydromorphisme (bas-versant) à 120 cm.

Tableau VII : Caractéristiques morphologiques des sols des zones d'étude

		MAN			TOUMODI			PRIKRO		
		Haut-versant	Mi-versant	Bas-versant	Haut-versant	Mi-versant	Bas-versant	Haut-versant	Mi-versant	Bas-versant
Horizon A	Couleur	10YR3/2 (Brun grisâtre)	7,5YR3/4 (Brun foncé)	7,5YR3/2 (Brun foncé)	7,5YR3/4 (Brun foncé)	7,5YR3/2 (Brun foncé)	10YR4/2 (Brun)	7,5YR3/4 (Brun foncé)	7,5YR4/2 (Brun foncé)	10YR4/2 (Brun)
	Structure	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Grumelleuse	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire
	Consistance	Meuble	Peu compact	Meuble	Peu compact	Peu compact	Peu compact	Meuble	Peu compact	Peu compact
	Etat hydrique	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
	Porosité	Très poreux	Poreux	Très poreux	Poreux	Poreux	Poreux	Très poreux	Poreux	Poreux
	Contrainte	Faible taux d'éléments grossiers	Tâche d'hydromorphie	Néant	Faible taux d'éléments grossiers	Faible taux d'éléments grossiers	Taux élevé d'éléments grossiers	Faible taux d'éléments grossiers	Faible taux d'éléments grossiers	Faible taux d'éléments grossiers
Horizon B	Couleur	7,5YR6/8 (Jaune rougeâtre)	10YR6/4 (Brun jaunâtre)	7,5YR5/6 (Brun vif)	10YR5/6 (Brun jaunâtre)	10YR6/6 (Brun jaunâtre)	5YR3/4 (Brun rougeâtre)	2,5YR4/8 (Brun rougeâtre)	5YR3/3 (Brun rougeâtre)	10YR6/4 (Brun jaunâtre)
	Structure	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire	Polyédrique subangulaire
	Consistance	Peu compact	Peu compact	Meuble	Peu compact	Compact	Peu compact	Peu compact	Compact	Peu compact
	Etat hydrique	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
	Porosité	Poreux	Poreux	Très poreux	Poreux	Peu poreux	Poreux	Poreux	Peu poreux	Poreux
	Contrainte	Taux élevé d'éléments grossiers	Tâche d'hydromorphie	Néant	Tâche d'hydromorphie	Carapace	Hydromorphie	Taux élevé d'éléments grossiers	Induration	Hydromorphie

HV : Haut-versant, MV : Mi-Versant, BV : Bas-versant, cm : centimètre

3.1.2.2 Caractéristiques physiques

3.1.2.2.1. Granulométrie des sols

L'étude de la granulométrie des sols de la zone d'étude a montré que la texture varie en fonction de la position topographique et de la localité (Tableau VIII).

❖ Cas des sols de Man

La granulométrie mesurée dans les sols de Man montre une différence significative ($p < 0,05$) entre les toposéquences et la profondeur de sol (Tableaux VIII). En effet, la teneur en argile de ces sols augmente avec la profondeur de sol quelle que soit la toposéquence. La texture est soit sablo-argileuse (10 à 20 % d'argile), soit limono-argilo-sableuse (20 à 40 % d'argile) dès la surface. Les éléments grossiers sont constitués, en majorité, de nodules ferrugineux et de quelques graviers et cailloux de quartz. Leur taux est variable et excède souvent 45 % du poids de la terre sèche principalement dans les hauts de versant. Ces sols sont également caractérisés par la présence d'un horizon latéritique, à moyenne ou grande profondeur, sur lequel repose l'horizon gravillonnaire.

❖ Cas des sols de Toumodi

La granulométrie est significativement affectée par la toposéquence et la profondeur (Tableau VIII). Les faibles valeurs moyennes de l'argile (< 25 %) sont observées dans les horizons supérieurs et principalement dans les mi et hauts de versant. Pareillement, dans ces positions topographiques, le sable grossier y est abondant (40 %). Ces sols sont très gravillonnaires et souvent indurés à moins de 100 cm de profondeur par endroit. La texture est plus sablo-limoneuse (< 25 % d'argile) et quelques fois limono-argileuse (> 25 % d'argile) dès la surface. Les éléments grossiers sont constitués, en majorité, de gravillons ferrugineux et quartzeux. La texture de ces horizons est variable avec une dominance de sable et contenant une forte proportion de sable grossier (20 à 45 %). Ces résultats montrent que les sols de cette localité sont peu développés.

❖ Cas des sols de Prikro

A Prikro, les sols présentent un taux moyen d'éléments grossiers. Les éléments grossiers sont constitués, en majorité, de nodules ferrugineux, de quelques graviers et de bloc de quartz. Leur taux est variable et tourne autour de 25 % du poids de la terre sèche. Les sols sont également profonds avec des indurations par endroits, à moins de 150 cm. La texture est plus argileuse aux

bas de versant (25 à 60 % d'argile) et moins argileuse aux mi et hauts de versant (< 25 % d'argile) dès la surface avec un bon drainage interne. Ces résultats montrent que les sols de cette localité ont une forte teneur en sable mais avec moins de sable grossier. Cela montre un bon développement des sols de cette localité.

La granulométrie (argile, limons fin et grossier, sables fin et grossier) des sols de Prikro révèle que les textures des sols sont majoritairement argilo-sableuses à sablo-argileuses avec une proportion d'argile comprise entre 25 et 45 % selon la localité et la toposéquence.

Tableau VIII : Compositions granulométriques des sols

Localités	Toposéquence	Horizons	Granulométrie (%)					Texture
			Argile	Limons fin	Limons grossier	Sable fin	Sable grossier	
Man	HV	A	13,4±3,6c	3,8±0,5c	8,5±1,3c	26,8±3,6b	47,1±1,3a	Sablo-argileuse
		B	20,9±3,3b	3,5±0,9c	8,3±1,4c	20,8±0,4b	46,6±1,1a	Sablo-argileuse
	MV	A	22,6±3,4b	14,2±0,9a	10,26±0,8b	23,3±2,1b	28,9±1,7b	Limono-argilo-sableuse
		B	33,5±8,2a	7,7±1,2b	8,8±1c	19,7±9,4b	30,2±2,8b	Limono-argilo-sableuse
	BV	A	25,3±3b	5,5±0,9b	19,2±1,1a	32,9±1,5a	17,1±1,3c	Limono-argilo-sableuse
		B	37,3±14,6a	5,4±1,6b	15,7±1,8a	25,1±9,8b	16,1±2,4c	Limono-argileuse
	p-value			0,001	0,001	0,001	0,034	0,001
Toumodi	HV	A	12,8±9,7c	8,9±3,9b	7,4±2,1b	22,7±3,7b	47,5±12,3a	Sablo-limoneuse
		B	21,4±4,6b	5,4±8,9b	6,5±5,6b	20,0±2,3b	46,1±19,5a	Limono-argilo-sableuse
	MV	A	16,2±6,4c	4,8±2,1b	8,6±2,6b	27,8±4,3a	41,4±9,1a	Limono-sableuse
		B	17,5±10,1c	5,4±7,7b	6,7±9,8b	24,8±2,9a	44,9±9a	Limono-sableuse
	BV	A	17,9±6,3c	17,2±3,5a	16,2±2,5a	30,2±3,4a	18±7,2b	Limoneuse
		B	35,9±1a	17,1±1,7a	11,5±1,8a	19,1±1c	16,3±2b	Limono-argileuse
	p-value			0,002	0,034	0,033	0,024	0,012
Prikro	HV	A	14,15±2,2c	17,5±2,6b	16,6±3,4a	24,1±6,2a	27,4±2,4a	Limoneuse
		B	25,1±3,3b	16,5±5,2b	13,2±1,6a	17,6±7,1b	27,4±6,5a	Limoneuse
	MV	A	17,8±3,6c	29,5±7,5a	16,9±4,1a	20,9±6,5a	14,5±3,5b	Limoneuse
		B	26,57±7,2b	28,1±4,3a	15,5±3,2a	17,5±4,5b	12,1±5,5b	Limono-argileuse
	BV	A	29,05±6,3b	17,05±5,7b	10,9±3,1b	16,9±3,2b	25,7±2,1a	Limono-argileuse
		B	56,825±16,1a	6,23±1,1c	6,45±2,3c	9,8±3,6c	20±5,6a	Argileuse
	p-value			0,001	0,011	0,04	0,019	0,013

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Fischer, Lsd.05, & = 0,05). HV : Haut de Versant, MV : Mi-versant, BV : Bas de versant.

3.1.2.2.2. Teneurs en éléments grossiers des sols

L'examen de la teneur en éléments grossiers (EG) des sols indique des différences statistiquement significatives ($p\text{-value} < 0,05$) dans les bas de versants entre les localités d'étude d'une part, et les positions topographiques, d'autre part (Figure 10). Cependant, cette différence est hautement significative ($p\text{-value} < 0,05$) dans les mi et hauts de versants.

Les sols présentent plus d'éléments grossiers (EG) à Toumodi que dans les deux autres localités quel que soit le niveau de la toposéquence. Le plus fort taux d'éléments grossiers (56,1 %) est obtenu en haut de versant à Toumodi et le plus faible taux (20,7 %) au bas de versant à Prikro. A tous les niveaux, les taux d'éléments grossiers sont d'un niveau plus faible à Prikro que dans les deux autres localités, Man et Toumodi.

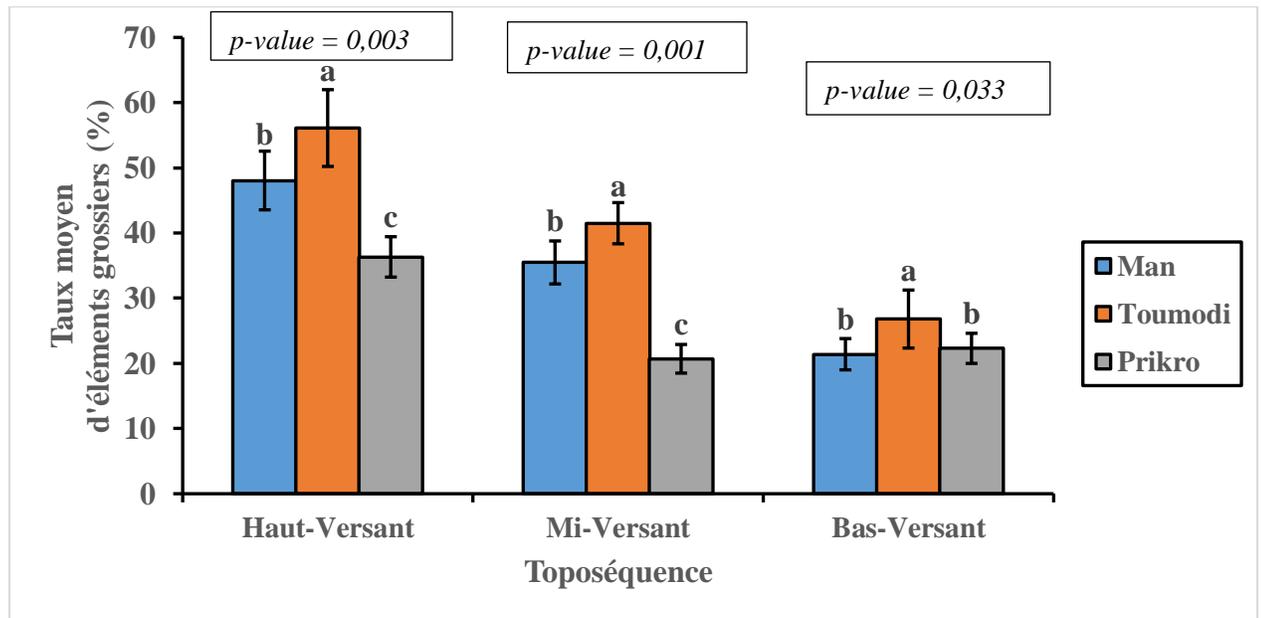


Figure 10 : Distribution de la charge en éléments grossiers des sols de la zone d'étude

Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Fischer, $Lsd.05$, $\alpha = 0,05$).

3.1.2.2.3. Densité apparente des sols

L'analyse de la densité apparente des sols des localités d'étude montre une différence significative ($p\text{-value} < 0,05$) entre les différentes localités d'une part, et les positions topographiques, d'autre part (Figure 11).

La densité apparente moyenne des sols augmente du haut de versant au bas de versant dans toute la zone d'étude. Les sols de Man et prikro ont des densités apparentes (D_a) plus élevées que celles de la localité de Toumodi. Elles varient de $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$ sur les hauts de versant à $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ sur les bas de versants dans les localités de Man et de Prikro. Cependant, elle varie de $0,96$ à $1,37 \text{ g.cm}^{-3}$ respectivement du haut au bas de versant pour la localité de Toumodi. La densité apparente est plus faible ($0,96 \text{ g.cm}^{-3}$) dans les hauts de versants de la localité Toumodi.

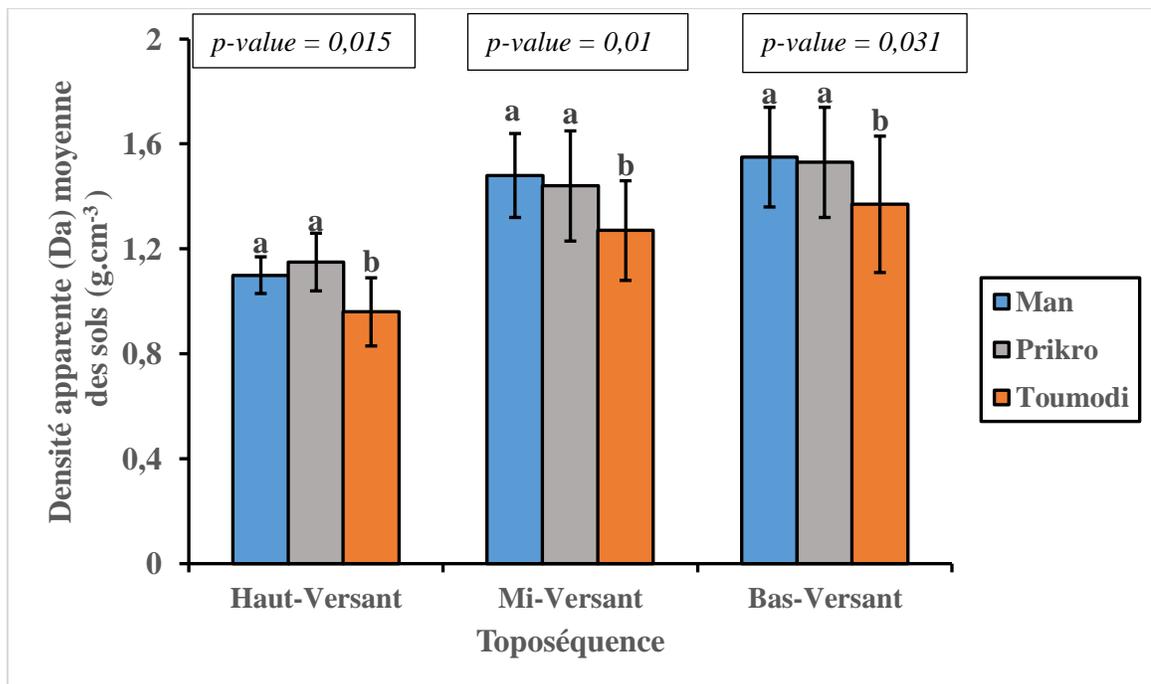


Figure 11 : Densité apparente des sols des localités d'étude
 Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Fischer, $Lsd.05$, & = $0,05$).

3.1.2.2.4. Capacité de stockage en eau des sols

Le test de Newman Keuls a révélé des différences significatives (p -value < 0,05) entre les localités d'étude et les différentes positions topographiques. L'analyse de la figure 12 indique une fluctuation saisonnière de la capacité de stockage en eau (CSE) des sols.

Les plus fortes valeurs de la CSE sont obtenues pendant la saison pluvieuse (avril à octobre) pour toutes les localités. Toutefois, les valeurs moyennes les plus élevées ont été obtenues sur les sites de Man, avec respectivement $207,27 \pm 31,08$ mm au haut de versant, $230,55 \pm 43,02$ mm au mi-versant et $268,34 \pm 43,29$ mm au bas de versant. La CSE varie du haut de versant au bas de versant avec de plus fortes teneurs observées sur les bas de versant. En saison sèche (novembre à mars), les valeurs moyennes de la CSE étaient inférieures à 100 mm sur l'ensemble des sites des différentes localités, avec toujours les plus fortes valeurs observées dans la localité de Man et sur les bas de versant de chaque localité. La plus faible valeur de CSE ($43,7 \pm 2,36$ mm) a été observée à Toumodi en haut de versant.

Ces résultats montrent que les sols de Man ont une bonne capacité de rétention en eau par rapport à ceux de Toumodi et Prikro et les bas de versant retiennent plus d'eau.

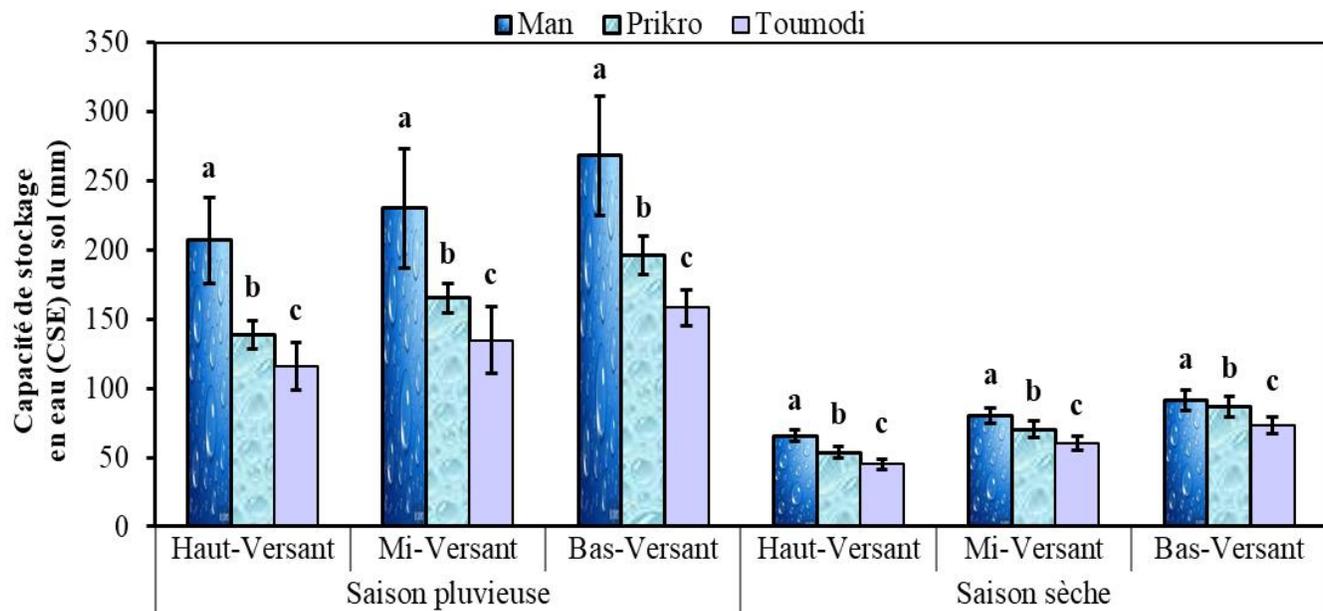


Figure 12 : Capacité de stockage en eau des sols des localités d'étude

Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Fischer, Lsd.05, & = 0,05).

3.1.2.2.5. Réserve utile en eau des sols

Une ANOVA à deux facteurs (position topographique et saison) effectuée a montré un effet significatif ($p\text{-value} < 0,05$) de ces facteurs sur la réserve utile (RU), quelle que soit la zone d'étude (Figure 13). Relativement à la CSE, la RU était plus importante en saison pluvieuse (avril à octobre). La valeur de RU la plus élevée en saison pluvieuse, est obtenue en bas de versant avec une valeur de $134,17 \pm 18,6$ mm à Man et la plus faible valeur est observée à Toumodi avec $57,88 \pm 5,8$ mm. Les valeurs moyennes de RU mesurées en saison sèche (novembre à mars), sont inférieures à 50 mm sur l'ensemble des sites avec toujours les valeurs les plus élevées au bas de versant à Man et les plus faibles à Toumodi en haut de versant.

Il ressort également de ces analyses que les réserves en eau obtenues varient en fonction de la saison et de la position topographique avec de plus fortes RU dans les bas de versant.

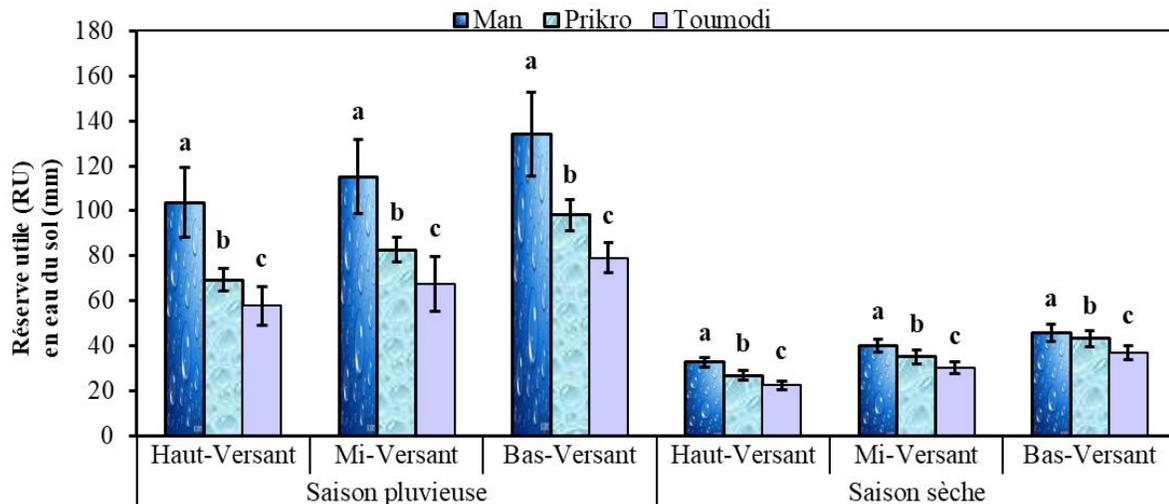


Figure 13 : Réserve utile en eau des sols des localités d'étude

Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Fischer, $Lsd.05$, $\alpha = 0,05$).

3.1.3. Répartition des principaux caractères morpho-physiques des sols le long des toposéquences

Pour établir la répartition des principaux caractères morpho-physiques des sols des différentes localités, l'interprétation de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) s'est limitée aux axes 1 et 2, puisque 96,7 % (Figure 14) de l'information sont réunis sur les axes 1 (74,7 %) et 2 (22 %). La représentation en 2 dimensions reste acceptable pour exposer les relations entre les zones d'étude. L'axe 1, est représenté par les hauts de versant et les bas de versant et l'axe 2

par les mi-versants. Sur l'axe 1, les hauts de versant forment un groupe qui est opposé aux bas de versant. En revanche, les mi-versants constituent un ensemble distinct sur l'axe 2. Ainsi, les indurations à faible profondeur et les taux d'éléments grossiers supérieurs à 50 % sont associées au haut de versant, les textures sableuses et les hydromorphies aux bas de versant.

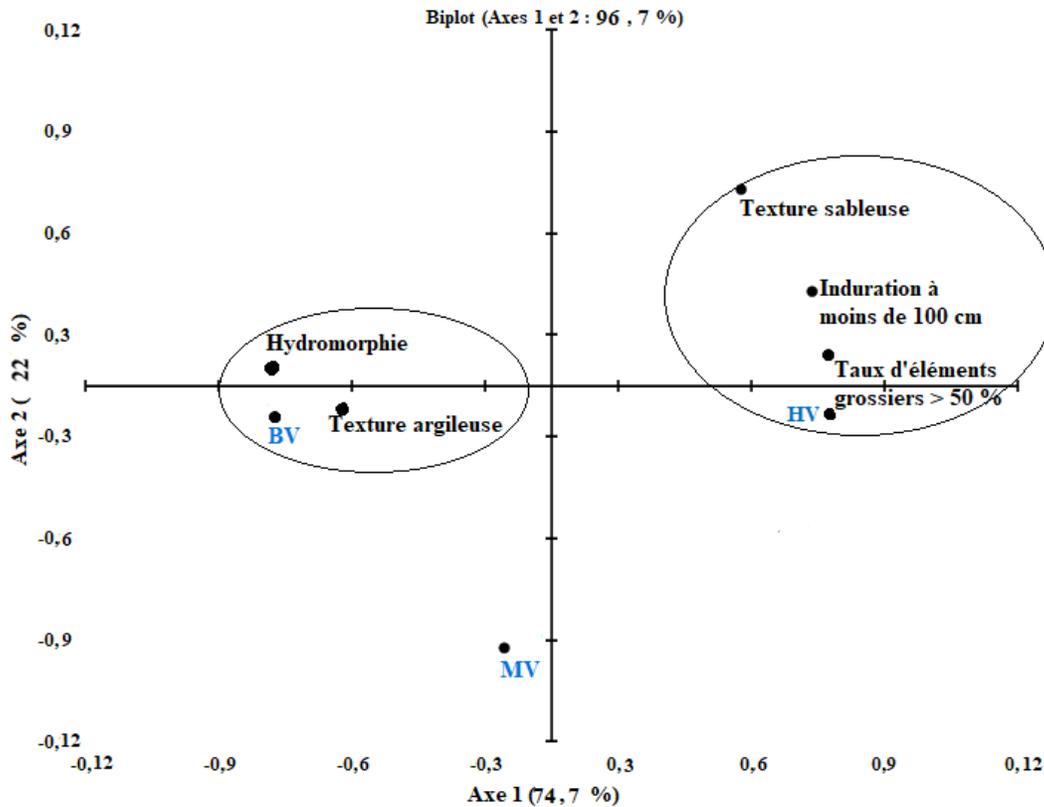


Figure 14 : Représentation des positions topographiques et des principaux caractères morpho-pédologiques

HV : Haut de Versant, MV : Mi-versant et BV : Bas de Versant.

3.1.4. Caractéristiques chimiques des sols

L'analyse des paramètres chimiques des sols a montré des différences significatives entre les localités, les horizons et les positions topographiques (Tableau IX).

❖ Cas des sols de Man

Les sols de Man sont apparus très acides ($\text{pH} \leq 5$) en haut de versant, contrairement aux autres positions topographiques où ils étaient acides ($5,4 \leq \text{pH} \leq 6,2$). Les pH de ces sols sont statistiquement ($p\text{-value} < 0,05$) différents des sols de Toumodi ($5,2 \leq \text{pH} \leq 6,6$) et Pri kro ($5,9 \leq$

pH \leq 6,4) qui sont acides. Cette acidité est plus forte en haut de versant, avec des pH de 4,5 et 5,0 respectivement dans les horizons de surface (A) et de profondeur (B).

Les teneurs moyennes en azote total de ces sols étaient très faibles ($N < 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$) sur toute la toposéquence et quel que soit l'horizon. Quant au phosphore assimilable, sa teneur était normale ($25 < P.\text{ass} < 50 \text{ g.kg}^{-1}$) à élevée ($P.\text{ass} < 100 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons de surface (A) et de normale à très faible ($P.\text{ass} < 15 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons de profondeur (B). Une forte teneur des sols en carbone organique est observée ($C > 2,5 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons A des hauts et mi de versant contrairement aux bas de versants où elle est normale ($1 < C < 1,5 \text{ g.kg}^{-1}$). Les rapports C/N calculés pour les sols de Man sont généralement élevées ($12 < C/N < 25$) à très élevées ($25 < C/N$) hormis l'horizon A du bas de versant qui a eu des valeurs très faibles ($C/N < 9$). Au niveau de la matière organique, hormis les horizons supérieurs des hauts et mi-versants qui ont été riches ($MO > 4 \text{ g.kg}^{-1}$), les autres teneurs étaient globalement moyennes ($2,6 < MO < 4 \text{ g.kg}^{-1}$) au bas versant.

Pour ce qui concerne le complexe absorbant, les sols sont caractérisés par une capacité d'échange cationique élevée ($8 < \text{CEC} < 15 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) dans les hauts et mi-versants, contrairement aux bas de versant qui ont eu une teneur normale ($3 < \text{CEC} < 8 \text{ cmol.Kg}^{-1}$). Dans ces sols, la teneur en base échangeable a été faible ($2 < S < 3 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) et ces sols ont eu un complexe d'échange fortement désaturé ($V < 50 \%$) au niveau de toutes les positions topographiques et tous les profils de sols.

❖ Cas des sols de Toumodi

Les sols de Toumodi sont acides, avec un pH eau compris entre 5,2 et 6,6 (Tableau IX). Leurs teneurs en matière organique ($2 < MO < 4 \text{ g.kg}^{-1}$) et en carbone ($1 < C < 2,5 \text{ g.kg}^{-1}$) étaient moyennes. Cependant, la teneur en azote de ces sols est très faible ($N < 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$) sur toute la toposéquence et quel que soit l'horizon. Le rapport C/N calculé est très faible dans les horizons de surfaces ($C/N < 9$) contrairement aux horizons de profondeur qui présentent une teneur élevée ($C/N > 12$). Quant au phosphore assimilable, sa teneur va de normale ($25 < P.\text{ass} < 50 \text{ g.kg}^{-1}$) à élevée ($P.\text{ass} < 100 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons de surface (A) et de normale à très faible ($P.\text{ass} < 15 \text{ g.kg}^{-1}$) à normale ($P.\text{ass} \leq 25 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons de profondeur (B).

Concernant le complexe absorbant, les sols de Toumodi ont présenté une capacité d'échange cationique moyenne ($3 < \text{CEC} < 8 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) sur toutes les toposéquences hormis l'horizon A du bas de versant qui a eu une teneur élevée ($8 < \text{CEC} < 15 \text{ cmol.Kg}^{-1}$). La somme des bases échangeables était faible ($1,5 < S < 3 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) sur tous les horizons des toposéquences

et ces sols ont un complexe d'échange fortement désaturé ($V < 50 \%$) au niveau de toutes les positions topographiques et tous les profils de sols.

❖ **Cas des sols de Prikro**

Au niveau des sols de Prikro, les sols sont faiblement acides ($\text{pH} > 5,5$) et présentent une très faible teneur en azote ($\text{N} < 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$) au niveau de toutes les positions topographiques et tous les profils de sols. La teneur moyenne en matière organique est normale ($2 < \text{MO} < 4 \text{ g.kg}^{-1}$) dans tous les horizons hormis, les horizons superficiels (A) des mi de versants où la valeur de la matière organique a été élevée ($\text{MO} = 4,6 \text{ g.kg}^{-1}$) au niveau de l'horizon A. Au niveau du carbone de ces sols, la teneur varie de moyenne ($1 < \text{C} < 1,5 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les hauts et bas de versant à élevée ($\text{C} > 2,5 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons A des mi-versants. Le rapport C/N varie avec des valeurs moyennes ($9 < \text{C/N} < 12$) au niveau de tous les horizons des mi et bas de versant. Cependant, cette teneur est très faible ($9 < \text{C/N}$) dans tous les horizons du haut de versant. Quant au phosphore assimilable, sa teneur était très faible ($\text{P.ass} < 15 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons B du haut de versant et faible ($\text{P.ass} = 18 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons A du haut de versant et B ($\text{P.ass} = 16 \text{ g.kg}^{-1}$) du mi de versant. Cependant, la teneur en phosphore est de normale ($25 < \text{P.ass} < 50 \text{ g.kg}^{-1}$) à élevée ($\text{P.ass} < 100 \text{ g.kg}^{-1}$) dans les horizons de surface (A) et B respectivement dans les mi et bas de versant.

Pour ce qui est du complexe absorbant, les sols de la localité de prikro étaient généralement caractérisés par une capacité d'échange cationique élevée ($8 < \text{CEC} < 15 \text{ cmol.kg}^{-1}$), hormis les horizons A et B respectivement des mi et bas de versant dont les CEC sont moyennes ($3 < \text{CEC} < 8 \text{ cmol.kg}^{-1}$). La somme des bases échangeables est moyenne ($3 < \text{S} < 6 \text{ cmol.kg}^{-1}$) et le taux de saturation en base ($V < 50 \%$) est faible dans ces sols, traduisant une forte désaturation.

Tableau IX: Proportion des éléments chimiques dans les sols des localités d'étude

Toposé- quence	Hori- zons	Localités	pH	Matière organique					Complexe absorbant (cmol.Kg ⁻¹)					
				C (g.kg ⁻¹)	N (g.kg ⁻¹)	C/N	MO (g.kg ⁻¹)	P.ass (g.kg ⁻¹)	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	S (cmol.Kg ⁻¹)	V (%)
Haut- Versant	A	Man	4,5±0,01b	2,7±0,21a	0,2±0,01a	13,5±1,71a	4,6±0,2a	49±4,1a	14,8±1,8a	1,7±0,3b	1,2±0,01a	0,1±0,01b	3,1±0,1b	20,6±1,9b
		Toumodi	6,4±0,1a	1,3±0,12b	0,2±0,01a	6,5±1,1b	3,1±0,01b	33±3,2b	7,5±0,91c	1,5±0,2b	1,1±0,02a	0,1±0,01b	2,7±0,2b	36,4±3,1a
		Prikro	6,4±0,2a	2,3±0,11c	0,3±0,01a	8,2±2,1b	4,0±0,18a	18±3,21c	12,5±1,1b	2,5±0,7a	1,3±0,02a	0,3±0,01a	4,1±0,2a	32,9±3,6ab
		<i>p-value</i>	0,012	0,031	0,891	0,013	0,021	0,018	0,011	0,040	0,139	0,025	0,036	0,014
	B	Man	5,0±0,21b	1,8±0,11a	0,2±0,01a	12,8±2,3a	2,8±0,1a	19±2,2a	10,6±1,2a	1,1±0,6b	0,8±0,01a	0,1±0,01b	2,0±0,1b	18,7±1,1c
		Toumodi	5,2±0,23b	1,7±0,1a	0,2±0,01a	13,0±1,9a	2,5±0,4a	13±1,1a	6,9±0,9c	1,4±0,4b	0,6±0,01a	0,2±0,01ab	2,0±0,1b	29,6±2,3b
		Prikro	6,1±0,3a	1,2±0,3b	0,2±0,01a	7,7±2,1b	2,1±0,1b	4±1,0b	9,0±1,71b	2,5±0,5a	1,2±0,02a	0,3±0,01a	4,0±0,3a	44,2±2,5a
		<i>p-value</i>	0,023	0,037	0,902	0,022	0,034	0,042	0,001	0,042	0,067	0,043	0,040	0,011
Mi- versant	A	Man	5,7±0,17b	2,7±0,12a	0,1±0,01a	27,0±3,01a	4,6±0,4a	133±7,3a	10,7±1,2a	2,1±0,8ab	1,1±0,01a	0,2±0,01b	3,7±0,2a	31,7±2,7b
		Toumodi	6,4±0,22a	1,7±0,01b	0,2±0,01a	8,5±2,31b	4,3±0,9b	115±6,18a	5,7±0,7c	1,3±0,1b	0,9±0,01a	0,1±0,01b	2,3±0,1b	40,5±3,6a
		Prikro	6,2±0,21a	2,7±0,1a	0,3±0,01a	8,7±2,1b	4,6±0,8a	44±4,2b	7,1±0,9b	2,8±0,1a	1,1±0,01a	0,4±0,01a	2,3±0,1b	40,5±3,1a
		<i>p-value</i>	0,019	0,028	0,275	0,001	0,046	0,031	0,030	0,039	0,091	0,046	0,039	0,027
	B	Man	6,2±0,27b	1,9±0,03a	0,1±0,01a	18,5±3,1a	3,2±0,3a	41±3,71a	9,5±1,0ab	1,8±0,1a	0,7±0,01a	0,1±0,01b	2,5±0,1a	26,0±1,7a
		Toumodi	6,6±0,07a	2,0±0,01a	0,2±0,01a	13,5±2,71b	2,5±0,1b	25±1,12b	7,4±0,93b	0,8±0,1b	0,7±0,01a	0,2±0,01b	1,6±0,1b	22,2±2,8b
		Prikro	6,1±0,04b	2,0±0,01a	0,2±0,01a	10,5±1,8c	3,5±0,2a	16±1,31c	10,5±1,2a	1,5±0,2a	1,0±0,01a	0,5±0,01a	3,0±0,2a	27,1±2,2a
		<i>p-value</i>	0,022	0,076	0,111	0,011	0,031	0,013	0,012	0,040	0,101	0,048	0,031	0,026
Bas- versant	A	Man	5,4±0,1b	1,5±0,02a	0,2±0,01a	7,5±1,2b	2,6±0,35a	51±3,0b	7,2±0,9b	1,8±0,2b	1,0±0,01b	0,1±0,01b	2,9±0,2b	40,6±4,5b
		Toumodi	6,2±0,3a	1,5±0,02a	0,2±0,01a	7,5±1,3b	2,6±0,4a	33±2,7c	10,5±2,3a	1,7±0,1b	0,9±0,01b	0,1±0,01b	2,7±0,2b	25,8±2,7c
		Prikro	5,9±0,21ab	1,6±0,01a	0,1±0,01a	11,1±1,51a	2,7±0,3a	117±11,1a	10,7±1,3a	3,1±0,8a	1,5±0,01a	0,3±0,01a	4,8±0,2a	44,7±3,1a
		<i>p-value</i>	0,017	0,358	0,231	0,041	0,199	0,001	0,032	0,020	0,041	0,034	0,028	0,012
	B	Man	5,6±0,31a	1,0±0,01a	0,1±0,01a	10,0±1,5b	1,8±0,2a	25±2,1a	8,1±0,7a	1,5±0,01a	0,7±0,01a	0,1±0,01b	2,2±0,1b	26,8±2,1b
		Toumodi	5,9±0,33a	1,3±0,02a	0,1±0,01a	13,0±1,8a	2,2±0,1a	25±2,71a	7,3±0,8b	0,8±0,01b	0,8±0,01a	0,2±0,01ab	1,7±0,1b	22,0±1,7b
		Prikro	5,9±0,31a	1,2±0,01a	0,1±0,01a	9,8±1,2b	2,1±0,1a	25±2,3a	7,1±0,43b	1,8±0,01a	1,2±0,01a	0,3±0,01a	3,5±0,2a	51,1±4,9a
		<i>p-value</i>	0,161	0,250	0,673	0,034	0,097	0,210	0,045	0,037	0,078	0,042	0,040	0,034

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Fischer, Lsd.05, & = 0,05).

C : Carbone, N : Azote, MO : Matière Organique, CEC : Capacité d'Echange Cationique, Ca : Calcium, Mg : Magnésium, K : Potassium, S : Somme des bases échangeable, V : Taux de Saturation.

3.1.5. Identification des sols rencontrés dans les nouvelles zones hévéicoles

Les données de terrain et de laboratoire dans les différentes localités ont permis de définir différentes classes de sols suivant les niveaux topographiques (Figure 15 à 17).

❖ Cas des sols de Man

A Man, les sols sont généralement de couleurs rougeâtres (2,5 YR) et jaunâtres (7,5YR) en raison de la présence d'oxydes de fer et d'aluminium oxydés. Leurs textures sont plutôt grossières allant de sablo-argileuse (10 à 20 % d'argile) à argilo-sableuse (20 à 40 % d'argile) dès la surface et ces sols sont généralement bien drainés ce qui rend leurs structures polyédriques subanguleuses à grumeleuses au niveau des racines et leurs limites plus ou moins régulières. Ils contiennent des agrégats grossiers moyens à partir de 60 cm de profondeur due à une proportion moyenne d'éléments grossiers ($20 < EG < 50 \%$) et il faut noter l'absence de tâche d'hydromorphisme. Il est ressorti que les sols sont profonds (≥ 150 cm) avec un profil bien développé et plusieurs horizons distincts. Les horizons supérieurs sont généralement riches en matière organique et en éléments nutritifs, tandis que les horizons inférieurs contiennent souvent une accumulation d'argile, d'oxydes de fer et d'aluminium. Ces sols sont acides ($4,5 < pH < 6,4$) en raison de la forte lixiviation des éléments nutritifs du sol. Les sols ont présenté des taux de saturation en cations échangeables allant de 18 à 44 %. Leur capacité d'échange cationique (CEC) a varié de normale à élevée (7 et 14 cmol.kg^{-1}). Par ailleurs, ces sols ont une faible teneur en base échangeable ($2 < S < 3 \text{ cmol.Kg}^{-1}$). Ces sols décrits sont de la classe des Ferralsols et plus généralement identifiés comme des Ferralsols (Dystric) (Figure 15).

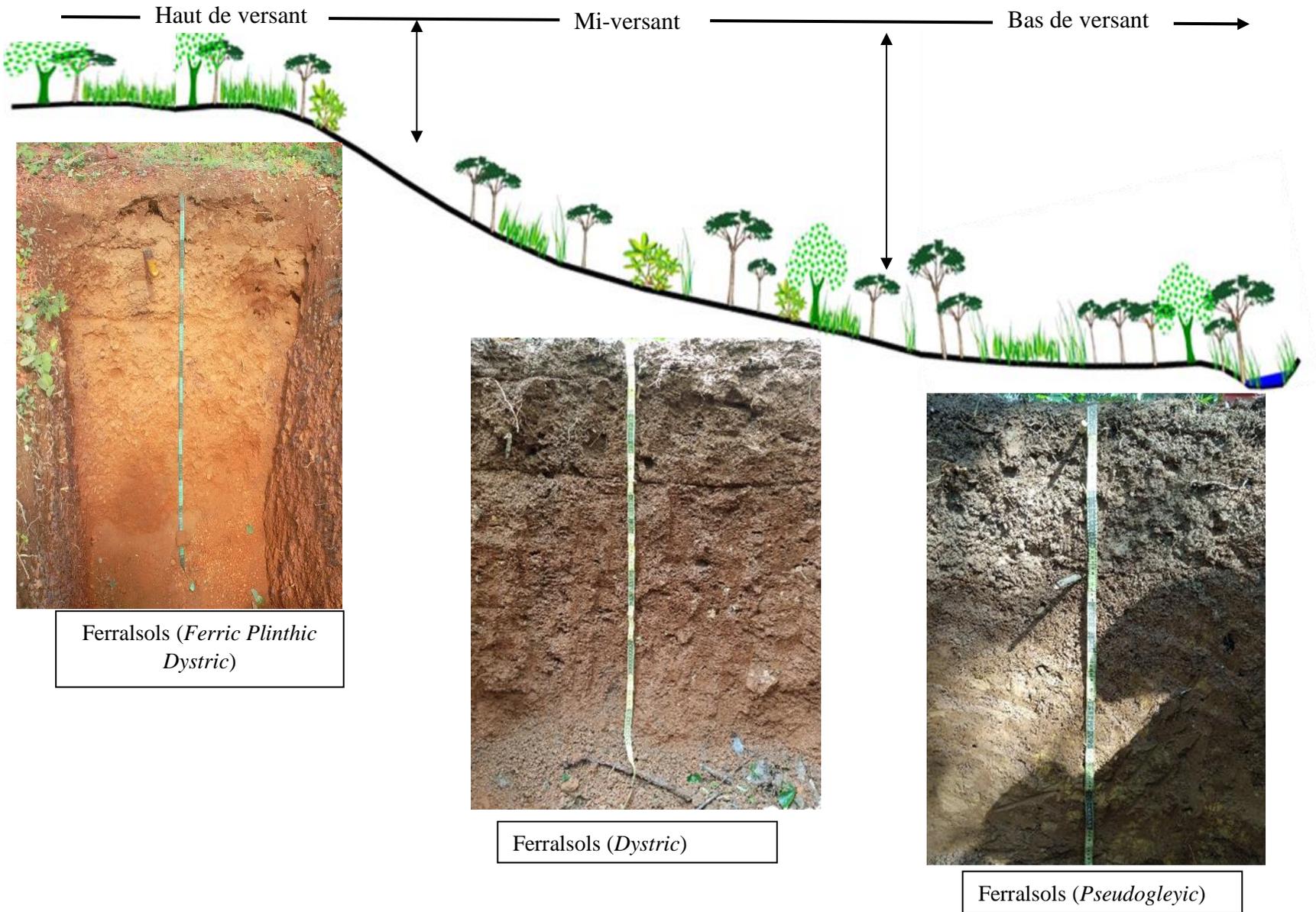


Figure 15 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Man

❖ **Cas des sols de Toumodi**

A Toumodi, la majorité des sols présente le caractère de sols brunifiés par des roches altérées et dominées par les ferromagnésiens. Les éléments grossiers (nodules ferrugineux) ont dominé les hauts et mi de versant. Le taux d'éléments grossiers a varié de 26,8 à 56,1 % respectivement du bas au haut de versant. Leurs structures sont généralement polyédriques subanguleuses à grumeleuses au niveau des racines. Ces sols sont poreux, cohérent avec d'assez nombreuses racines (mm) à orientation préférentielle subhorizontale. Le drainage interne est bon avec une transition nette par la couleur et la cohésion et une limite plus ou moins régulière. Les sols de Toumodi sont dans l'ensemble acides ($5 < \text{pH} < 7$), pauvres en bases échangeables ($1,5 < S < 3 \text{ cmol.Kg}^{-1}$) et fortement désaturés ($20 < V < 45 \%$), avec une capacité d'échange cationique ($5 < \text{CEC} < 11 \text{ cmol.kg}^{-1}$) normale. Leur faible profondeur et faible teneur en argile constituent une contrainte à l'hévéaculture. L'identification de ces sols nous ramène à la classe des Cambisols (Hyper Dystric) (Figures 16).

❖ **Cas des sols de Prikro**

Les Ferralsols ont été observés à Prikro. Ces sols sont moyennement désaturés ($27 < V < 51 \%$). Leur capacité d'échange cationique a tendance à être normale ou élevée avec des valeurs comprises entre 7 et 12 cmol.kg^{-1} . Par ailleurs, ces ferralsols observés sont pauvres en base échangeables, à faibles ou moyennes ($2 < S < 4,5 \text{ cmol.Kg}^{-1}$). La texture est soit argilo-sableuse soit sablo-argileuse avec une proportion d'argile variable entre 14 et 56 % selon la position topographique. Les sols ont eu une structure généralement polyédrique subanguleuse à grumeleuse au niveau des racines, très poreux, meubles à peu cohérents, assez nombreuses racines (mm) à orientation préférentielle subhorizontale, bon drainage interne, transition graduelle par la couleur et la cohésion, limite plus ou moins régulière (Figures 17). Ces sols, décrits comme des Ferralsols (Dystric).

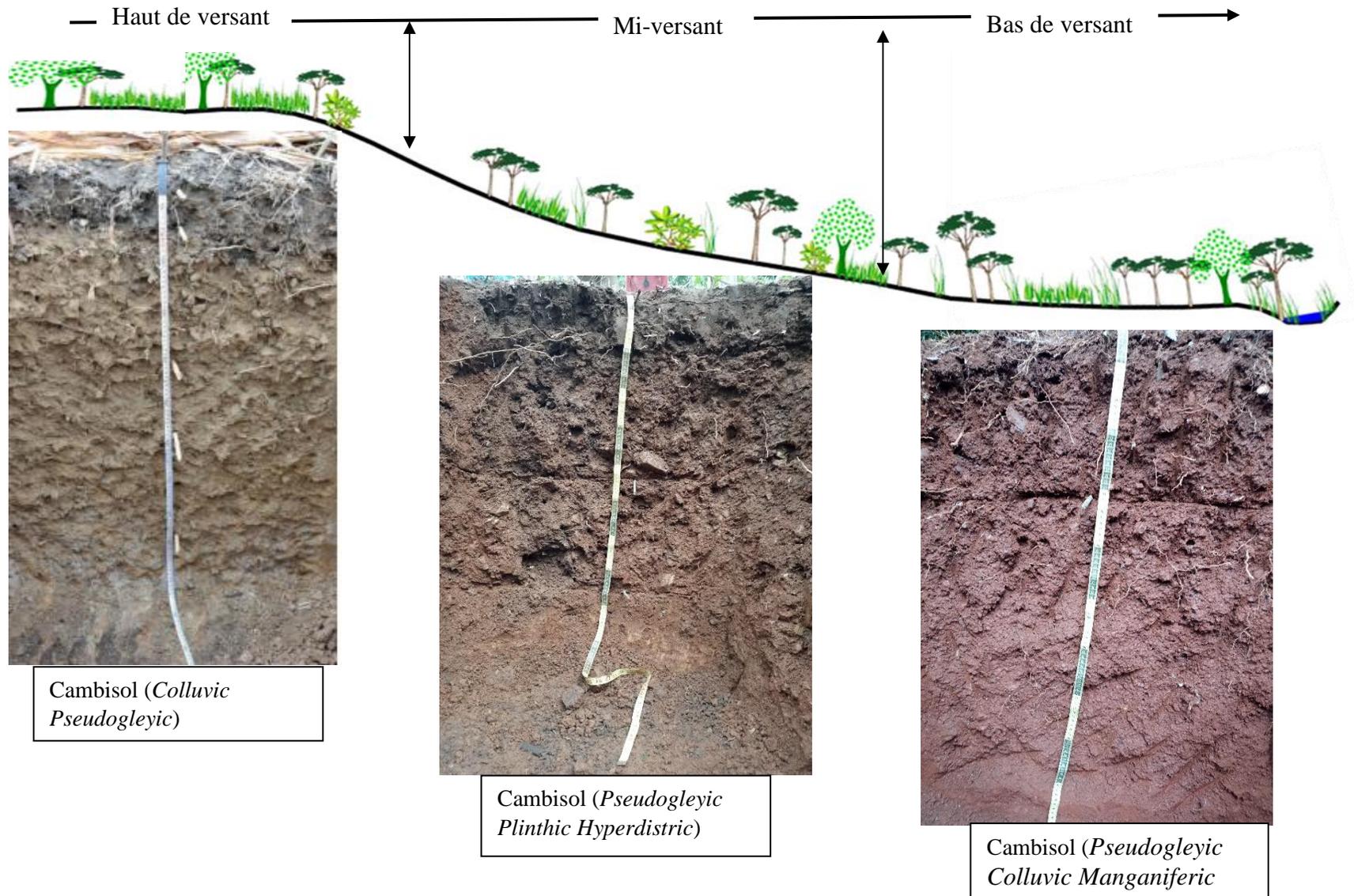


Figure 16 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Toumodi

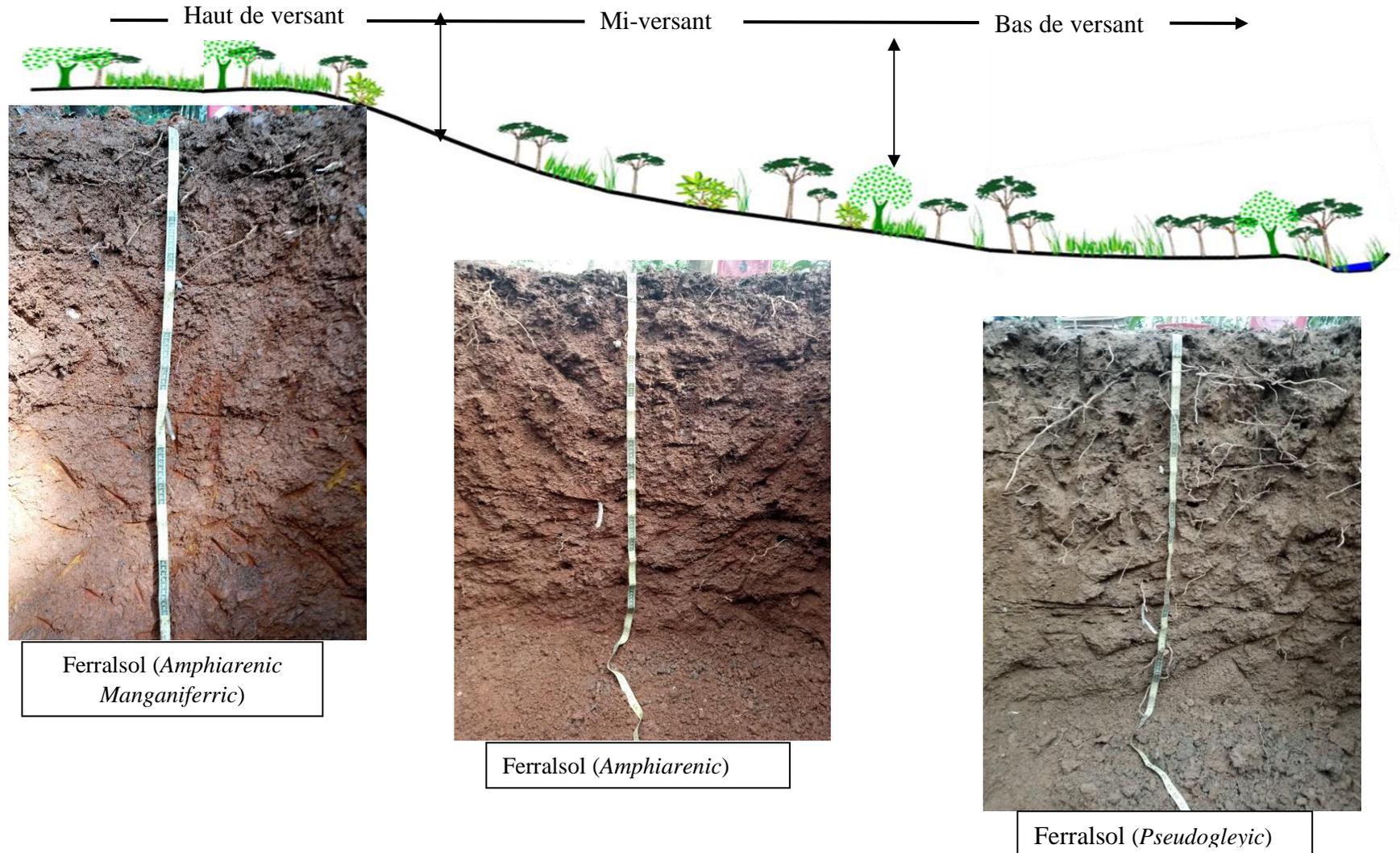


Figure 17 : Quelques types de sol observés dans les toposéquences de Priko

3.1.6. Carte des aptitudes culturelles des sols des zones d'étude

Sur les sites de l'étude, la description des sols portée sur l'aptitude culturelle a permis de déterminer la proportion des sols aptes ou non à l'hévéaculture.

❖ Cas des sols de Man

L'étude cartographique des sols a permis de montrer qu'à Man 18,4 % des sols sont d'aptitude culturelle bonne à l'hévéaculture soit, 38493,1 ha et ces sols sont principalement localisés au sud-ouest, centre et centre-est du département (Figure 18). Vingt-huit pourcent (28 %) soit 59624,1 ha des sols de la zone d'étude sont d'aptitude culturelle assez bonne à la culture de l'hévéa. Ces sols d'aptitude assez bonne sont principalement localisés au sud et au centre du département. Les sols principalement localisés au nord de la localité d'étude sont en majorité d'aptitude culturelle passable et couvre 20,6 % du territoire, soit 43106,4 ha. Quant aux sols d'aptitude culturelle médiocre, ils couvrent 30,9 % de la localité avec une superficie de 64668,9 ha et se sont pratiquement retrouvés un peu partout sur toute l'étendue du département, principalement sur des sols à faible induration ou hydromorphie.

L'étude de l'aptitude culturelle des sols a montré qu'à Man, les sols sont bien repartis sur le territoire avec respectivement 18,4 % de sol d'aptitude bonne, 28,5 % d'aptitude assez bonne, 20,6 % d'aptitude passable et 30,9 % de sol à aptitude médiocre.

Sur 200 points ayant servis à la vérification des cartes 69,8 % des observations faites sont conformes à la prédiction.

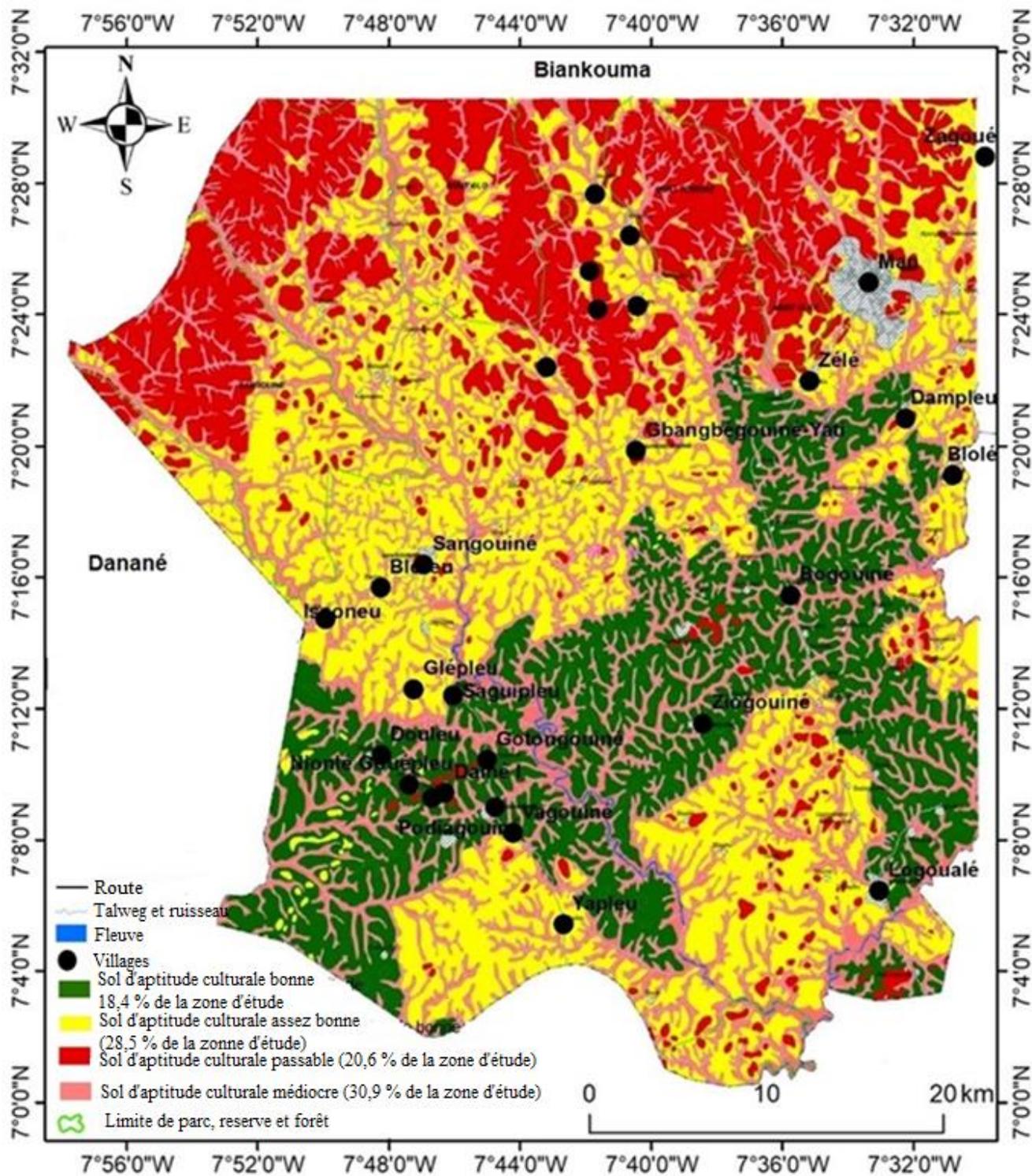


Figure 18 : Carte des aptitudes culturales des sols à l'hévéa du département de Man

❖ **Cartes sols de Toumodi**

L'étude de l'aptitude culturale des sols dans la localité de Toumodi a permis de mettre en exergue quatre divers types de potentialités agronomiques (Figure 19).

En effet, 79298,8 ha soit 29,5 % de la localité présentent des aptitudes culturales bonnes à la culture de l'hévéa. Ils sont pratiquement observés sur toute l'étendue du territoire mais beaucoup plus condensé au sud, au centre et au nord du département. Les sols d'aptitude culturale assez bonne à l'hévéaculture couvrent une superficie de 32191,2 ha soit 12 % du territoire et sont plus localisés au centre du département mais avec quelques portions au sud et au nord. Dans ce département, il faut noter qu'au centre et au nord, il est répertorié plus de sols à aptitude culturale passable, qui couvrent une superficie de 54884,2 ha soit 20,4 % du territoire. Pour les sols d'aptitude culturale médiocre, ils sont observés sur toute l'étendue du territoire et principalement rencontrés dans les sols ayant une nappe phréatique proche de la surface et des sols moins profonds, avec induration à moins d'un mètre de profondeur. Ils couvrent la plus grande superficie avec 99823 ha soit 37,1 %.

L'étude a révélé que les sols de Toumodi sont majoritairement moins aptes (médiocre) à la culture de l'hévéa avec 37,1 % du territoire contre 29,5 % de sols à aptitude bonne à l'hévéaculture.

Pour la vérification des cartes, 72 % des 200 points ayant servis à cette fin se sont montrés conformes à la prédiction.

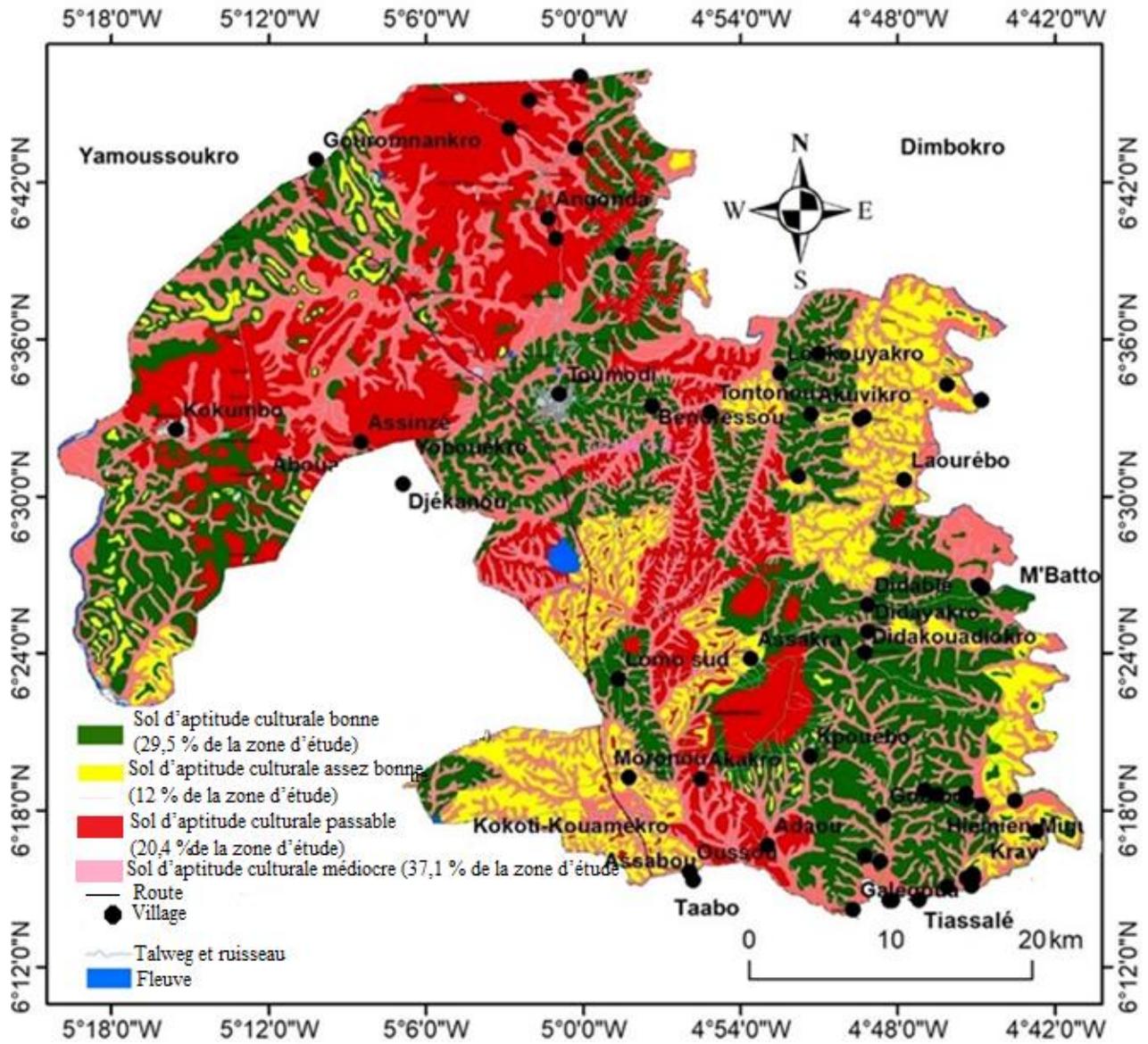


Figure 19 : Carte des aptitudes culturelles des sols à l'hévéa du département de Toumodi

❖ **Cas des sols de Prikro**

Les résultats de cette étude présentés à la figure 20 donnent une liste exhaustive des aptitudes culturales des sols identifiées en tenant compte de l'étendue et de la proportion relative par rapport à la superficie totale dudit département. A Prikro, également, les sols sont répartis en quatre groupes d'aptitude avec des superficies variables. Les potentialités des sols dites à aptitude bonne concernent 46,9 % de la superficie totale du département soit 126657,2 ha et sont répartis sur toute l'étendue du territoire étudié. Les sols à aptitude assez bonne quant à eux, couvrent une superficie de 40309,1 ha soit 14,9 % du territoire. Ces sols sont également répartis sur tout le territoire, mais sont quasiment inexistant dans la partie nord du département. En ce qui concerne les sols à aptitude culturale passable, ils couvrent une superficie de 19212,5 ha soit 7,1 % de la localité de Prikro et s'observent plus au nord du département. Les sols d'aptitude culturale médiocre ou de faible potentialité culturale couvrent une superficie de 81988,5 ha soit 30,4 % de la localité qui ont été considérés comme des sols non propices à l'hévéaculture et qui se rencontrent en petite portion sur toute la localité étudiée. Ces sols sont généralement des sols de Bas-fonds.

L'étude de l'aptitude des sols de Prikro montre que ces sols sont majoritairement de bonne aptitude culturale avec 46,9 % contre 30,4 % d'aptitude médiocre ou mauvaise à la culture de l'hévéa. Il est ressorti également que les sols de bonne aptitude culturale sont repartis sur tout le territoire étudié.

Sur 200 points ayant servis à la vérification des cartes 75 % des observations faites sont conformes à la prédiction

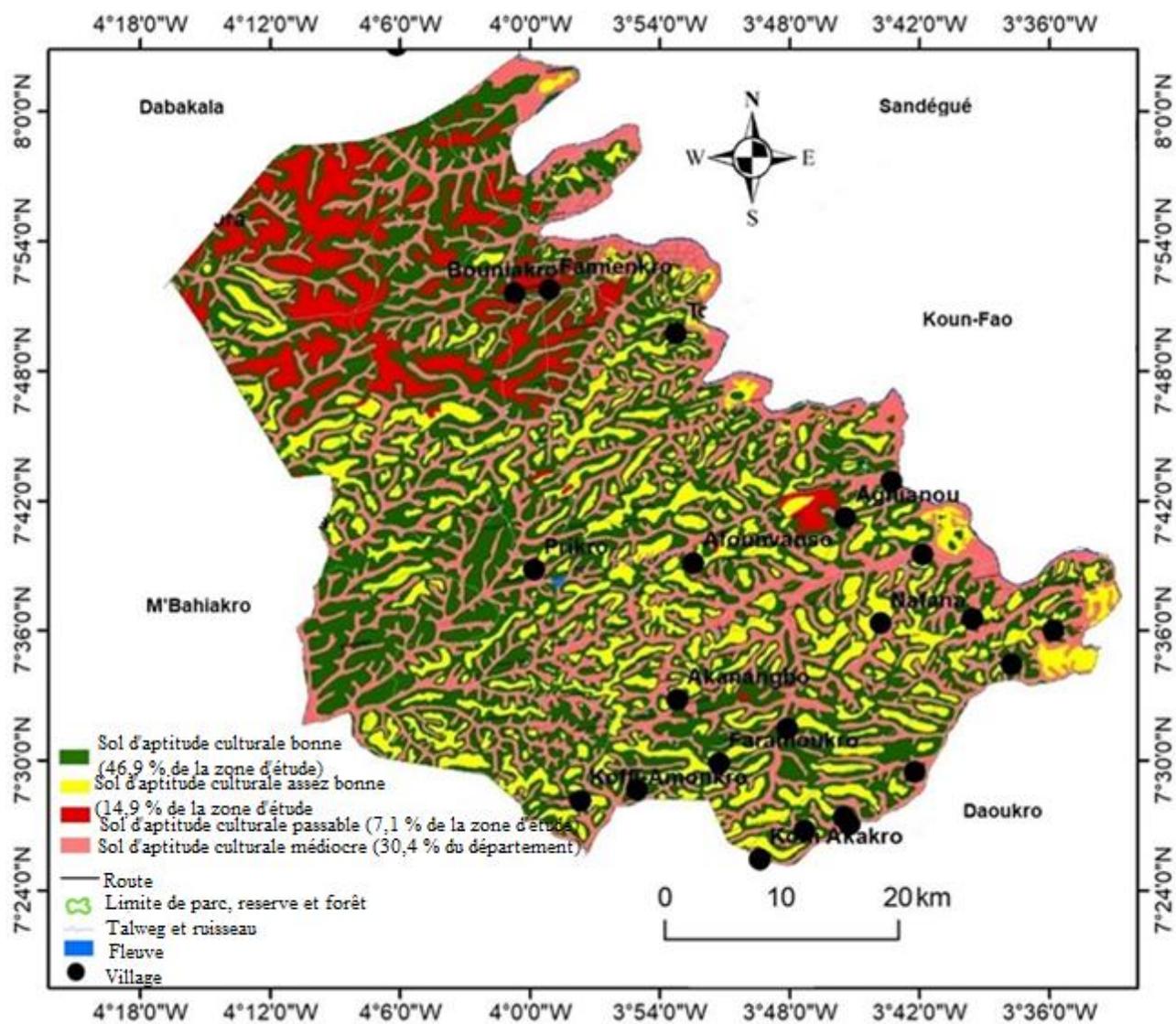


Figure 20 : Carte des aptitudes culturelles des sols à l'hévéa du département de Prikro

3.1.7. Effet des propriétés des sols sur le comportement agronomique de l'hévéa

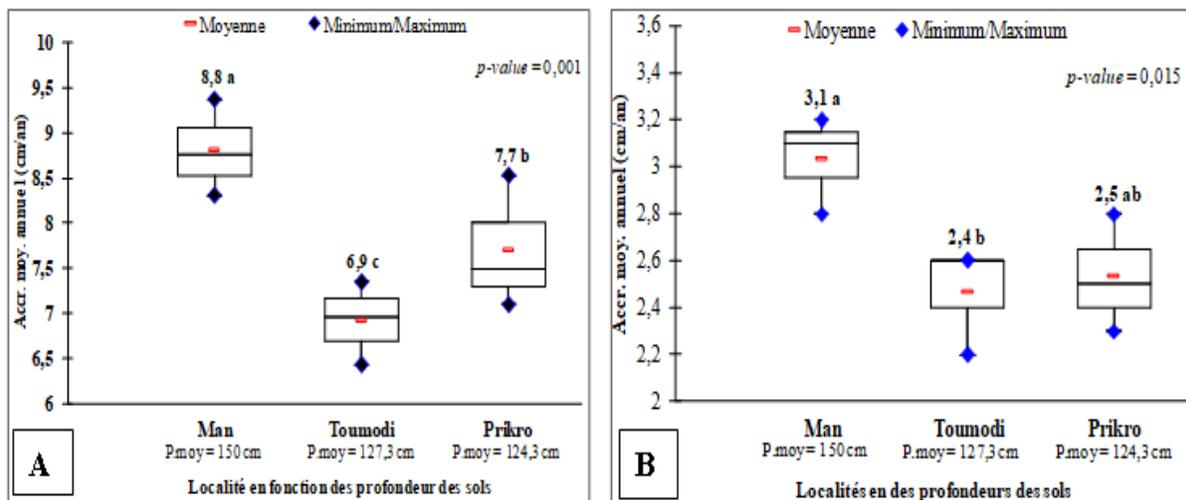
3.1.7.1. Effet de la profondeur

L'étude de l'effet de la profondeur du sol a été évaluée sur l'accroissement, la production, la sensibilité à l'encoche sèche et les paramètres physiologiques des arbres d'hévéa dans chaque localité d'étude.

❖ Effet sur l'accroissement moyen des arbres

L'étude de l'accroissement moyen annuel des arbres d'hévéa, en fonction de la profondeur du sol, a montré que les arbres croissent différemment en fonction de la profondeur du sol (Figure 21). L'analyse de variance effectuée sur le niveau d'accroissement a révélé une différence hautement significative ($p\text{-value} < 0,001$) au niveau des arbres immatures, contre une différence significative ($p\text{-value} < 0,05$) au niveau des arbres matures.

A Man, avec une profondeur moyenne de 150 cm des sols, les arbres ont eu le meilleur rythme d'accroissement moyen avec $8,8 \text{ cm.an}^{-1}$ en plantation immature et de $3,1 \text{ cm.an}^{-1}$ en plantation mature. A Prikro, les accroissements moyens de $7,7$ et $2,5 \text{ cm.an}^{-1}$ ont été atteints respectivement pour les plants immatures et les plants matures. Quant à la localité de Toumodi, elle a eu le plus faible niveau d'accroissement avec $6,9$ et $2,4 \text{ cm.an}^{-1}$ respectivement pour les plantations immatures et les plantations matures.



Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$).

Figure 21 : Influence de la profondeur du sol sur l'accroissement en fonction des localités A : plantation immature, B : plantation mature

❖ **Effet sur la production de caoutchouc**

Les valeurs moyennes de la production correspondant aux différentes profondeurs de sol étudiées sont consignées dans le tableau X. L'analyse statistique a révélé une différence significative ($P\text{-value} = 0,001$) des valeurs moyennes de production au niveau des profondeurs de sols étudiés. La production est plus forte ($63,27 \pm 6,1 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) à Man sur des sols à 150 cm de profondeur. Alors qu'elle est plus faible ($44,51 \pm 4,2 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) à Toumodi sur les sols à profondeur 127 cm. Prikro a la valeur intermédiaire avec $51,36 \pm 3,7 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$ sur un sol à 124 cm de profondeur. Relativement, à la production à l'arbre par saignée, la production en kilogramme par hectare est plus forte ($2904,1 \pm 442,6 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) à Man avec une profondeur de 150 cm contre la plus faible ($1729,35 \pm 125,1$) production qui est observée sur une profondeur de 130 cm à Toumodi. On en déduit de ces résultats que les différentes productions observées sont d'un bon niveau.

Tableau X : Production moyenne de caoutchouc en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités

Localités	Profondeur du sol (cm)	Production moyenne	
		$\text{g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$
Man	150	63,27±6,1a	2904,1±442,6a
Toumodi	127	44,51±4,2c	1729,35±125,1c
Prikro	124	51,36±3,7b	2153,2±143,5b
<i>P-value</i>		0,001	0,022

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$). $\text{g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$: gramme par arbre par saignée ; $\text{kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$: kilogramme par hectare par an.

❖ **Effet sur la sensibilité à l'encoche sèche de l'hévéa**

Le tableau XI met en évidence une différence hautement significative ($P\text{-value} = 0,001$) de la sensibilité à l'encoche sèche des arbres sur la profondeur de sol. La valeur de la LEM la plus élevée ($12,17 \pm 2,3 \%$) est obtenue à Toumodi sur des sols de 127 cm de profondeur. Pareillement la plus forte valeur ($11 \pm 3,1 \%$) d'encoche sèche (ES) est perçue à Toumodi sur des sols de 130 cm de profondeur. La plus faible valeur ($6,59 \pm 1,2 \%$) de LEM est observée à Prikro sur un sol de 124 cm de profondeur. Le plus faible taux ($5,5 \pm 1,4 \%$) d'encoche sèche a été observé à Prikro sur un sol de 124 cm de profondeur.

Tableau XI : Taux de longueur d'encoche malade et d'encoche sèche en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités

Localités	Profondeur (cm)	LEM (%)	ES Totale
Man	150	9,68±1,3b	9±1b
Toumodi	127	12,17±2,3c	11±2,3c
Prikro	124	6,59±2,1a	5,5±1,4a
<i>p-value</i>		0,0001	0,0001

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). LEM : Longueur d'Encoche Malade ; ES : Encoche sèche totale ; cm : centimètre ; % : pourcentage.

❖ Effet sur les paramètres physiologiques des arbres

L'analyse des paramètres physiologiques du latex des arbres (Extrait sec, Saccharose, Phosphore inorganique et Groupement thiols) a montré une différence significative liée à la profondeur des sols des différentes localités (Tableau XII). Le taux moyen d'extrait sec du latex obtenu est très élevé ($> 43\%$) en fonction de la profondeur du sol des localités d'étude. Pour toutes les localités, elle augmente en moyenne de $56,7 \pm 2,1$ à $60,50 \pm 0,70\%$. Les teneurs moyennes en saccharose du latex ont varié de $8,6 \pm 0,84$ à $9,1 \pm 1,8$ mmol.l⁻¹. Ces teneurs sont d'un niveau moyen (≤ 6 à 9 mmol.l⁻¹) pour toutes les profondeurs de sol étudiées dans les différentes localités. Dans l'ensemble, les teneurs en phosphore inorganique (Pi) sont faibles (≤ 10 à 15 mmol.l⁻¹) sur toutes les profondeurs de sol étudiées. Les résultats relatifs à la teneur moyenne en groupements thiols (RSH) du latex des arbres sont d'un niveau faible ($\leq 0,60$ à $0,80$ mmol.l⁻¹) pour les sols étudiés sur toutes les localités.

Tableau XII : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la profondeur du sol dans les différentes localités

Parcelle	Profondeur (cm)	Ext.Sec (%)	Sacc (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	RSH (mmol.l ⁻¹)
Man	150	60,50 ± 0,7a	9,1 ± 1,8a	13,25 ± 1,62a	0,66 ± 0,03a
Toumodi	127	56,7 ± 2,1b	8,7 ± 0,28b	10,95 ± 4,87b	0,61 ± 0,04a
Prikro	124	57,4 ± 1,5b	8,6 ± 0,84b	11,05 ± 1,34b	0,63 ± 0,13a
<i>p-value</i>		0,044	0,013	0,031	0,022

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). mmol.l⁻¹ : milimole par litre ; Ext.Sec : Extrait Sec ; Sacc : Saccharose ; Pi : Phosphore inorganique ; RSH : Groupements thiols ; % : pourcentage.

3.1.7.1. Effet de la texture

L'étude de l'influence de la texture du sol a été évaluée sur l'accroissement, la production, la sensibilité à l'encoche sèche et les paramètres physiologiques des arbres d'hévéa dans chaque localité d'étude.

❖ Effet sur l'accroissement moyen des arbres

Les valeurs moyennes de l'accroissement moyen annuel des arbres en fonction de la texture du sol de chacun des sites d'étude sont indiquées au tableau XIII. L'analyse du tableau révèle l'existence d'une différence significative ($p\text{-value} < 0,05$) entre les accroissements moyens annuels des arbres d'hévéa mesuré et les textures de sols selon les localités quelle que soit le stade de développement (mature et immature) de la culture. Les plants ont un meilleur niveau d'accroissement sur les sols à textures plus argilo-limoneuse (25% < argile < 50%) dans la localité de Man, avec des valeurs de 9,06 et 3,15 cm.an⁻¹, respectivement en plantation immature et mature. Il est suivi des arbres de Prikro sur la même texture avec 8,01 et 2,75 cm.an⁻¹ pour les plantations immatures et matures respectivement. Les plus faibles valeurs d'accroissements sont observées à Toumodi (7,06 et 2,65 cm.an⁻¹ respectivement en culture immature et mature) sur des sols à texture sablo-argileuse (10% < argile < 25%). Les sols à texture sablo-argileuse (10% < argile < 25%) de Man (7,30 cm.an⁻¹ en culture immature et 2,53 cm.an⁻¹ en culture mature) ont également eu un niveau d'accroissement supérieur aux sols des localités de Prikro (6,96 et 2,30 cm.an⁻¹

respectivement pour les cultures immatures et matures) et Toumodi (6,0 et 2,47 cm.an⁻¹ respectivement pour les cultures immatures et matures).

Tableau XIII : Accroissement moyen annuel des arbres d'hévéa en fonction de la texture du sol

Localités	Texture	Accroissement moyen annuel (cm.an ⁻¹)	
		Période immature	Période mature
Man	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	7,30 c	2,53 b
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	9,06 a	3,15 a
Toumodi	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	6,00 d	2,47 c
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	7,06 c	2,65 b
Pri kro	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	6,96 c	2,30 c
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	8,01 b	2,75 b
<i>p-value</i>		0,031	0,042

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$) cm.an⁻¹ : Centimètre par an.

❖ **Effet sur la production des arbres**

Le tableau XIV révèle que la production moyenne de caoutchouc est significativement plus importante dans les sol argilo-limoneuse (25% < argile < 50%) de Man avec respectivement $63,48 \pm 5,1$ g.a⁻¹.s⁻¹ contre $60,58 \pm 5,1$ et $57,62 \pm 4,2$ g.a⁻¹.s⁻¹ respectivement sur les sols de Pri kro et Toumodi. La plus faible production est observée à Toumodi avec $39,83 \pm 4,7$ g.a⁻¹.s⁻¹ sur des sols à texture sablo-argileuse (10% < argile < 25%). Relativement, à la production à l'arbre et à la saignée (g.a⁻¹.s⁻¹), la production en kilogramme à l'hectare a été plus élevée ($2913,7 \pm 307$ kg.ha⁻¹.an⁻¹) à Man et plus faible à Toumodi ($1783,2 \pm 177$ kg.ha⁻¹.an⁻¹).

Tableau XIV : Production des arbres d'hévéa en fonction de la texture du sol

Productions des arbres en caoutchouc sec			
Localités	Texture	g.a ⁻¹ .s ⁻¹	kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹
Man	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	48,81±4,6c	1849,5±149,2b
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	63,48±5,1a	2913,7±307a
Toumodi	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	39,83±4,7d	1783,2±177c
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	57,62±4,2b	1933,7±160b
Pri kro	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	47,23±3,9c	1929,8±203b
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	60,58±5,1a	2598,9±132a
<i>P-value</i>		0,001	0,001

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$). g.a⁻¹.s⁻¹ : gramme par arbre par saignée ; kg.ha⁻¹.an⁻¹ : kilogramme par hectare par an.

❖ Effet sur la sensibilité à l’encoche sèche

Le taux d’arbres secs et la longueur d’encoche malade (LEM) des arbres montrent une différence significative ($p\text{-value} < 0,05$) de ces paramètres en fonction de la texture du sol (Tableau XV). En effet, l’étude montre qu’à Toumodi, les arbres mis en saignée sur des sols à texture moins argileuse ($10\% < \text{argile} < 25\%$) ont un taux élevé ($15,8 \pm 1,7 \%$) de longueur d’encoche malade (LEM) ainsi qu’un taux élevé ($12,45 \pm 1,5 \%$) d’arbres totalement secs. Ils sont suivis des sols à texture argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$) avec un taux de longueur d’encoche malade de $11,3 \pm 1,1 \%$ dans le même département. La plus faible valeur ($7,5 \pm 1 \%$) de LEM est quant à elle observée à Man sur des sols à texture argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$). Concernant le taux d’encoche sèche total, la plus faible valeur est obtenue à Prikro sur des sols à texture argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$). Il découle de ce résultat que le département de Toumodi rencontre les plus fortes maladies liées à l’encoche sèche quel que soit la texture du sol.

Tableau XV: Sensibilité à l’encoche sèche des des arbres d’hévéa en fonction de la texture du sol

Localités	Texture	LEM (%)	ES Totale
Man	Sablo-argileuse ($10\% < \text{argile} < 25\%$)	$9,1 \pm 1,2b$	$5,4 \pm 0,96 d$
	Argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$)	$7,5 \pm 1 c$	$4,9 \pm 0,77e$
Toumodi	Sablo-argileuse ($10\% < \text{argile} < 25\%$)	$15,8 \pm 1,7 a$	$12,45 \pm 1,5a$
	Argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$)	$11,3 \pm 1,1 a$	$6,55 \pm 0,9 c$
Prikro	Sablo-argileuse ($10\% < \text{argile} < 25\%$)	$9,5 \pm 1,2 b$	$7,7 \pm 0,9b$
	Argilo-limoneuse ($25\% < \text{argile} < 50\%$)	$9,3 \pm 1,1 b$	$2,2 \pm 0,21f$
<i>p-value</i>		0,021	0,0001

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). LEM : Longueur d’Encoche Malade ; ES : Encoche sèche totale ; cm : centimètre ; % : pourcentage.

❖ Effet sur les paramètres physiologiques des arbres

L’analyse des paramètres physiologiques du latex des arbres (Extrait sec, Saccharose, Phosphore inorganique et Groupement thiols) a montré une différence significative entre la texture du sol et les paramètres physiologiques (Tableau XVI). Le taux moyen d’extrait sec du latex obtenu est très élevé ($> 43 \%$) en fonction de la texture et dans toutes les localités. Pour toutes les localités, il a augmenté en moyenne de $46,1 \pm 0,21$ à $51,45 \pm 2,19 \%$. Les teneurs moyennes en saccharose du latex varient de $4,45 \pm 2,75$ à $7,85 \pm 1,62 \text{ mmol.l}^{-1}$. Ces teneurs sont d’un niveau moyen (≤ 6 à $9 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$) pour toutes les textures des différentes localités hormis la texture sablo-argileuse

(10% < argile < 25%) observée à Toumodi qui a été d'un faible niveau (≤ 4 à 6 mmol.l^{-1}). Dans l'ensemble, les teneurs en phosphore inorganique (Pi) obtenues sont généralement faibles (≤ 10 à 15 mmol.l^{-1}) pour toutes les localités hormis la teneur qui est élevée (≤ 10 à 15 mmol.l^{-1}) sur sol à texture sablo-argileuse (10% < argile < 25%) observée à Man. Les résultats relatifs à la teneur moyenne en groupements thiols (RSH) du latex des arbres sont d'un niveau moyen ($\leq 0,60$ à $0,80 \text{ mmol.l}^{-1}$) pour les sols à texture argilo-limoneuse (25% < argile < 50%) et faible ($\leq 0,40$ à $0,60 \text{ mmol.l}^{-1}$) pour les sols à texture sablo-argileuse (10% < argile < 25%) dans toutes les localités.

Tableau XVI : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la texture du sol

Parcelle	Texture	Ext.Sec (%)	Sacc (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	RSH (mmol.l ⁻¹)
Man	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	48,75 ± 4,31 b	6,70 ± 0,28 b	11,50 ± 1,27 c	0,47 ± 0,16 d
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	51,45 ± 2,19 a	7,85 ± 1,62 a	22,25 ± 8,83 a	0,66 ± 0,03 a
Toumodi	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	46,1 ± 0,21 d	4,45 ± 2,75 c	10,05 ± 1,34 d	0,51 ± 0,33 c
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	48,95 ± 0,07 b	6,95 ± 2,05 b	13,70 ± 2,68 b	0,60 ± 0,11 b
Prikro	Sablo-argileuse (10% < argile < 25%)	47,95 ± 1,34 c	6,60 ± 0,84 b	10,95 ± 4,87 c	0,45 ± 0,03 d
	Argilo-limoneuse (25% < argile < 50%)	49,50 ± 0,70 b	7,30 ± 1,55 a	13,25 ± 1,62 b	0,70 ± 0,45 a
p-value		0,036	0,043	0,040	0,044

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). mmol.l⁻¹ : milimole par litre ; Ext.Sec : Extrait Sec ; Sacc : Saccharose ; Pi : Phosphore inorganique ; RSH : Groupements thiols ; % : pourcentage.

3.1.8. Effet de la densité de plantation

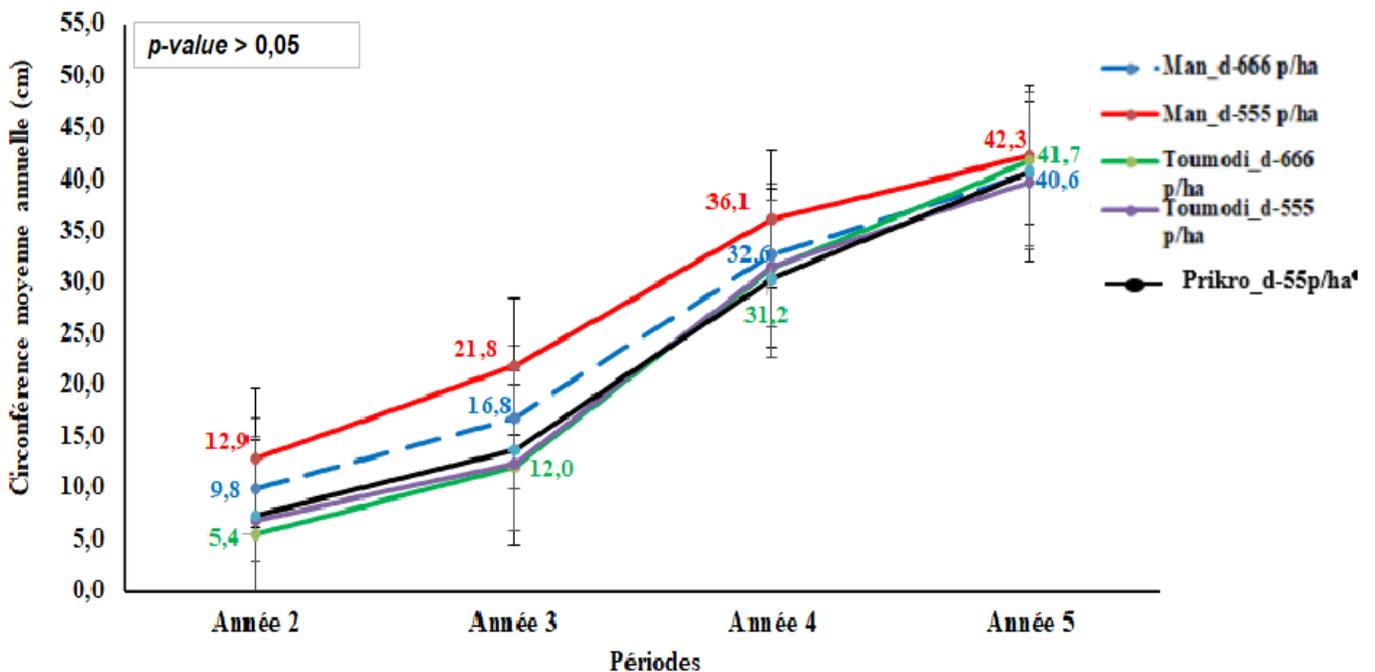
L'étude de l'effet de la densité de plantation a été évaluée sur l'accroissement, la production, la sensibilité à l'encoche sèche et les paramètres physiologiques des arbres d'hévéa dans chaque localité d'étude.

❖ Effet sur l'accroissement moyen des arbres

L'évaluation de l'influence de la densité de plantation sur la croissance isodiamétrique des arbres d'hévéa montre aucune différence significative ($p\text{-value} > 0,05$) entre les densités de plantation et l'accroissement des arbres dans les localités d'étude (Figure 22). Cependant, les circonférences des plants ont évolué différemment en fonction de l'année d'observation dans les

localités d'étude. La plus forte valeur d'accroissement (12,9 à 42,3 cm) est observé à Man avec une densité de 555 arbres.ha⁻¹. Elle a été suivie par la densité de 666 arbres.ha⁻¹ dans la même localité avec une circonférence comprise entre 9,8 et 41,7 cm. La plus faible valeur d'accroissement des arbres a été observé à Toumodi avec une densité de 666 arbres.ha⁻¹ pour une circonférence allant de 5,4 à 40,6 cm. A Pri kro, une seule expérience a été menée avec la densité de 555 arbres.ha⁻¹. Le résultat de Pri kro a été meilleur (6,5 à 41,1 cm) à celui obtenu à Toumodi (6,2 à 40,6 cm) pour la même densité.

De ces résultats, il est ressorti que, la densité des arbres a influencé l'accroissement des plants et qu'à Man, le développement des arbres est meilleur qu'à Toumodi et Pri kro.



Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. p/ha : plants à l'hectare

Figure 22 : Evolution de la circonférence moyenne des plants en fonction de la densité

❖ Effet sur la production de caoutchouc

La production moyenne de caoutchouc à l'arbre et à la saignée (g.a⁻¹.s⁻¹) a varié de 41,94 ± 8,15 à 63,85 ± 15,1 g.a⁻¹.s⁻¹ selon la densité (Tableau XVII). L'analyse de variance effectuée a montré une différence hautement significative (*P-value* = 0,001) entre la production (g.a⁻¹.s⁻¹) et la densité. La production en fonction de la densité est plus élevée à Man avec 63,85 ± 15,1 et 62,69 ±

12,5 g.a⁻¹.s⁻¹ respectivement pour les densités de 555 et 666 p.ha⁻¹. La plus faible production (41,94 ± 8,15) a été observée à Toumodi à densité de 555 p.ha⁻¹.

Tableau XVII : Production moyenne de caoutchouc en fonction de la densité de plantation

Production moyenne			
Localités	Densité	g.a ⁻¹ .s ⁻¹	kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹
Man	666 p.ha ⁻¹	62,69 ± 12,5 a	2375,9±79,1 a
	555 p.ha ⁻¹	63,85 ± 15,1 a	2930,7±42,3 a
Toumodi	666 p.ha ⁻¹	52,03 ± 9,5 b	2329,4±45,2 a
	555 p.ha ⁻¹	41,94 ± 8,15 c	1407,5±37,7 b
Prikro	555 p.ha ⁻¹	54,2 ± 13,4 b	2214,6±59,4 a
<i>P-value</i>		0,001	0,022

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$). g.a⁻¹.s⁻¹ : gramme par arbre par saignée ; kg.ha⁻¹.an⁻¹ : kilogramme par hectare par an ; p.ha⁻¹ : plants par hectare.

❖ **Effet sur la sensibilité à l’encoche sèche**

La densité de plantation des arbres influence significativement le taux d’encoche sèche des arbres (Tableau XVIII). L’étude de l’effet de la densité de plantation sur la sensibilité à l’encoche sèche des arbres a montré que la longueur d’encoche malade (LEM) des arbres est plus élevée à Toumodi et à Man sur la même densité de plantation de 666 p.ha⁻¹ avec respectivement 9,5 ± 1,9 et 9,3 ± 2,3 % à Toumodi et Man. Le plus faible taux d’encoche malade a été observé à Prikro sur une densité de 555 p.ha⁻¹ avec une valeur de 5,8 ± 1,1 %. Quant au taux d’arbres totalement secs, la plus forte valeur a été observée à Toumodi sur une densité de 555 p.ha⁻¹ avec 4,9 ± 1,1 % et la plus faible (1,8 ± 0,4 %) valeur a été observée à Prikro sur une densité de 555 p.ha⁻¹.

Tableau XVIII : Taux de longueur d’encoche malade et d’encoche sèche en fonction de la densité de plantation des arbres

Localités	Densité	LEM (%)	ES Totale
Man	666 p.ha ⁻¹	9,3±2,3a	2,2±0,8b
	555 p.ha ⁻¹	6,9±1b	1,9±0,3c
Toumodi	666 p.ha ⁻¹	9,5±1,9a	2,7±0,8b
	555 p.ha ⁻¹	7,5±2,1b	4,9±1,1a
Prikro	555 p.ha ⁻¹	5,8±1,1c	1,8±0,4c
<i>p-value</i>		0,034	0,012

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). LEM : Longueur d’Encoche Malade ; ES : Encoche sèche totale ; cm : centimètre ; % : pourcentage.

❖ **Effet sur les paramètres physiologiques**

L'analyse des paramètres physiologiques du latex des arbres (Extrait sec, Saccharose, Phosphore inorganique et Groupement thiols) a montré une différence significative entre les différentes densités (Tableau XIX). Le taux moyen d'extrait sec du latex obtenu a été très élevé (> 43 %) en fonction de la densité de plantation et dans toutes les localités. Pour toutes les localités, il a augmenté en moyenne de $45,41 \pm 5,21$ à $50,25 \pm 7,8$ %. Les teneurs moyennes en saccharose du latex ont varié de $9 \pm 1,6$ à $11,9 \pm 2,5$ mmol.l⁻¹. Ces teneurs ont été d'un niveau élevé (≤ 9 à 12 mmol.l⁻¹ \geq) pour toutes les densités. Dans l'ensemble, les teneurs en phosphore inorganique (Pi) ont été généralement moyens (≤ 15 à 20 mmol.l⁻¹ \geq) pour toutes les localités et densités. Les résultats relatifs à la teneur moyenne en groupements thiols (RSH) du latex des arbres sont d'un niveau moyen ($\leq 0,60$ à $0,80$ mmol.l⁻¹ \geq) sur toutes les densités.

Tableau XIX : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction de la densité

Localités	Densités p.ha ⁻¹	Ext.Sec (%)	Sacc (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	RSH (mmol.l ⁻¹)
Man	666	48,75 ± 5,1 b	10,4 ± 1,8 b	17,3 ± 2,6 c	0,6 ± 0,03 c
	555	50,25 ± 7,8 a	11,9 ± 2,5 a	20,01 ± 4,6 a	0,8 ± 0,03 a
Toumodi	666	45,41 ± 5,21 d	9,0 ± 1,6 c	15,13 ± 2,7 d	0,67 ± 0,06 c
	555	47,4 ± 5,8 c	9,3 ± 1,9 c	17,3 ± 3,4 c	0,6 ± 0,01 c
Prikro	555	48,54 ± 5,5 b	10,6 ± 1,8 b	18,8 ± 4,6 b	0,75 ± 0,03 b
<i>p-value</i>		0,046	0,032	0,031	0,037

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). mmol.l⁻¹ : milimole par litre ; Ext.Sec : Extrait Sec ; Sacc : Saccharose ; Pi : Phosphore inorganique ; RSH : Groupements thiols ; % : pourcentage.

3.1.9. Effet des paramètres environnementaux

L'étude de l'effet des paramètres environnementaux sur le développement profondeur du sol a été évaluée sur l'accroissement, la production, la sensibilité à l'encoche sèche et les paramètres physiologiques des arbres d'hévéa dans chaque localité d'étude.

❖ **Relation et contribution des axes et plan factorielle entre les paramètres environnementaux et le développement des arbres**

L'ACP réaliser pour montrer la relation entre 'étude de la relation entre les paramètres pédologiques, environnementaux et agro-physiologiques réalisée avec l'analyse en composante principale (ACP) a montré que les axes 1 et 2 représentent 100 % des valeurs propres de l'inertie

totale (Figure 23). Cela signifie que la représentation de l'ACP en deux dimensions est suffisante pour mettre en évidence l'influence des paramètres étudiés. L'axe 1 contribue à 61,9 % à la dispersion des paramètres étudiés contre 38,1% pour l'axe 2.

Les valeurs des coefficients de corrélation au niveau des paramètres agro-physiologiques montrent que l'accroissement ($r = 1,00$) avec le RSH ($r = 0,74$; $P < 0,05$), la forêt ($r = 0,80$; $P < 0,05$) et la production ($r = 0,89$; $P < 0,05$) sont corrélés positivement à l'axe 1 (Tableau XX). De même, la jachère ($r = 0,99$; $P < 0,01$), le Sacc ($r = 0,95$; $P < 0,01$), phosphore inorganique ($r = -0,80$; $P < 0,05$), l'extrait sec ($r = 0,93$; $P < 0,01$) sont corrélés positivement à l'axe 2 contrairement à la savane ($r = 0,99$; $P < 0,01$) et la LEM ($r = 1,00$; $P < 0,001$) qui sont corrélé négativement à axe 2. La carte factorielle a permis de définir 3 groupes en mettant en lien les facteurs environnementaux et agro-physiologiques (Figure 23).

Ainsi, le groupe **G1** est composé de la forêt, de la production, de l'accroissement et des groupements thiols.

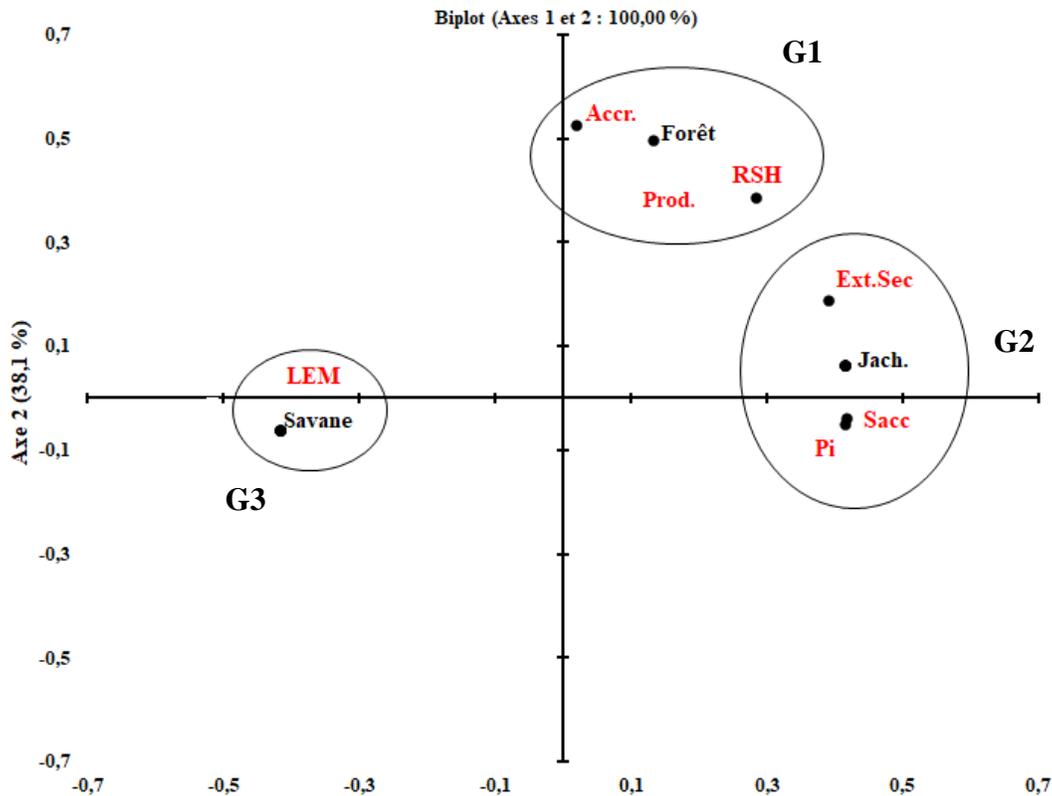
Le groupe **G2** a été constitué du précédent cultural jachère qui a une influence sur le taux d'extrait sec, le saccharose et le phosphore inorganique.

Le groupe **G3** est composé du précédent savane qui a une influence sur la longueur d'encoche malade des arbres.

Tableau XX : Coefficients de corrélation entre les paramètres agro-physiologiques, les paramètres environnementaux et les axes de l'ACP

Paramètres agro-physiologiques	Paramètres environnementaux	
	Axe 1	Axe 2
Accr.	1	0,05
LEM	0,03	-1
Ext.Sec	0,36	0,93
Sacc	0,32	0,95
Pi	0,6	0,8
RSH	0,74	0,68
Prod.	0,89	-0,46

Accr : Accroissement, LEM : Longueur d'Encoche Malade, Ext.Sec : Extrait Sec, Sacc : Saccharose, Pi : Phosphore inorganique, RSH : Groupements Thiols, Prod : Production, Jach : Jachère.

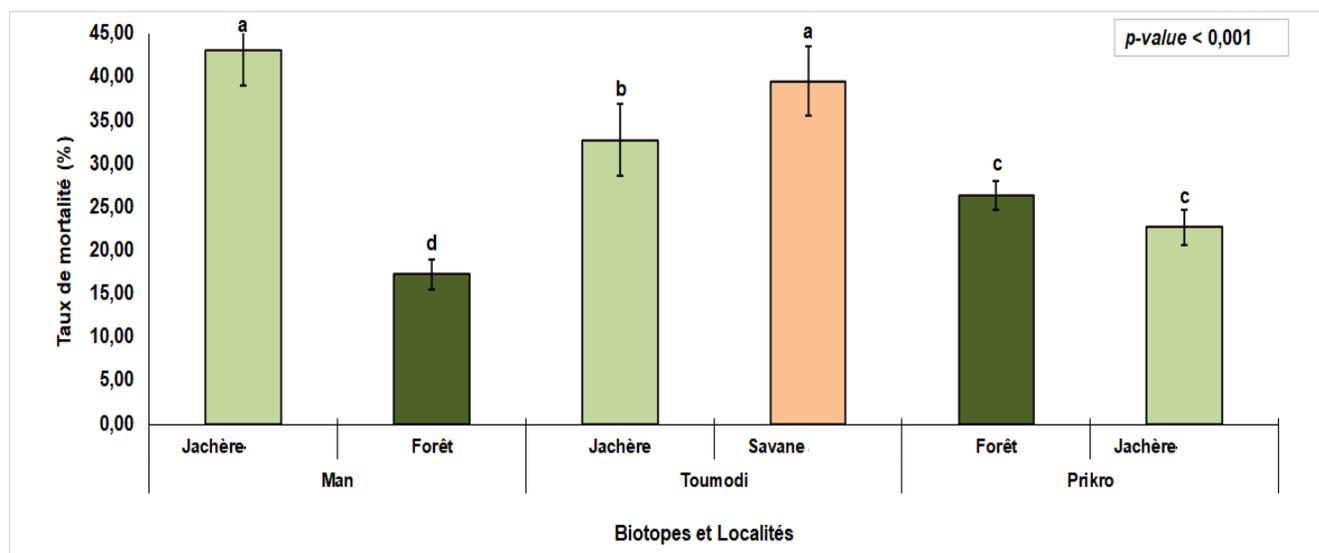


Accr : Accroissement, LEM : Longueur d’Encoche Malade, Ext.Sec : Extrait Sec, Sacc : Saccharose, Pi : Phosphore inorganique, RSH : Groupements Thiols, Prod : Production, Jach : Jachère.

Figure 23 : Diagramme de l’ACP basé sur les relations agro-physiologiques et les paramètres du biotope

❖ **Effet du précédent culturel sur le taux de mortalité des plants**

L’étude du taux de mortalité des plants, juste après la mise en place des plantations, montre que le précédent culturel a influencé la réussite des plants (Figure 24). L’analyse statistique a révélé une différence hautement significative ($p\text{-value} < 0,001$) entre le précédent culturel (biotope) et le taux de mortalité dans les différents départements. Les taux de mortalité observés ont varié de 17,30 à 43,09 % à Man, respectivement pour les précédents forêt et jachère. A Toumodi, le taux de mortalité était de 32,78 % pour la parcelle ayant eu la jachère comme précédent culturel, contre 39,53 % pour un précédent de savane. Concernant le département de Priero, le taux de mortalité des plants a été de 26,37 % après forêt contre 22,7 % pour le précédent de jachère comme précédent. Les précédents culturels jachère et savane arborée à Man et Toumodi ont montré les taux de mortalité les plus élevés avec respectivement 43,07 et 39,78 %. Toutefois, le plus faible taux de mortalité a été observé à Man sur précédent forêt avec 17,3 %.



Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$).

Figure 24 : Taux de mortalité des plants en fonction du biotope et de la localité

❖ Effet du précédent culturel sur l'accroissement moyen annuel des arbres

Une différence significative ($p\text{-value} < 0,05$) a été observée entre le biotope et l'accroissement moyen annuel des plants d'hévéa selon la localité (Figure 25). L'évaluation de l'accroissement moyen des plants a montré que les biotopes jachère, forêt et jachère permettent un bon niveau d'accroissement des plants avec des accroissements moyens annuels compris entre 8,0 et 9,0 $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$. Les plus faibles valeurs de l'accroissement moyen des plants ont été observées au niveau des précédents culturels jachère et savane, avec des valeurs respectivement comprises entre 6,7 et 7,2 % à Man et Toumodi. Les plants d'hévéa ont eu une meilleure croissance à Pri kro qu'à Man et Toumodi.

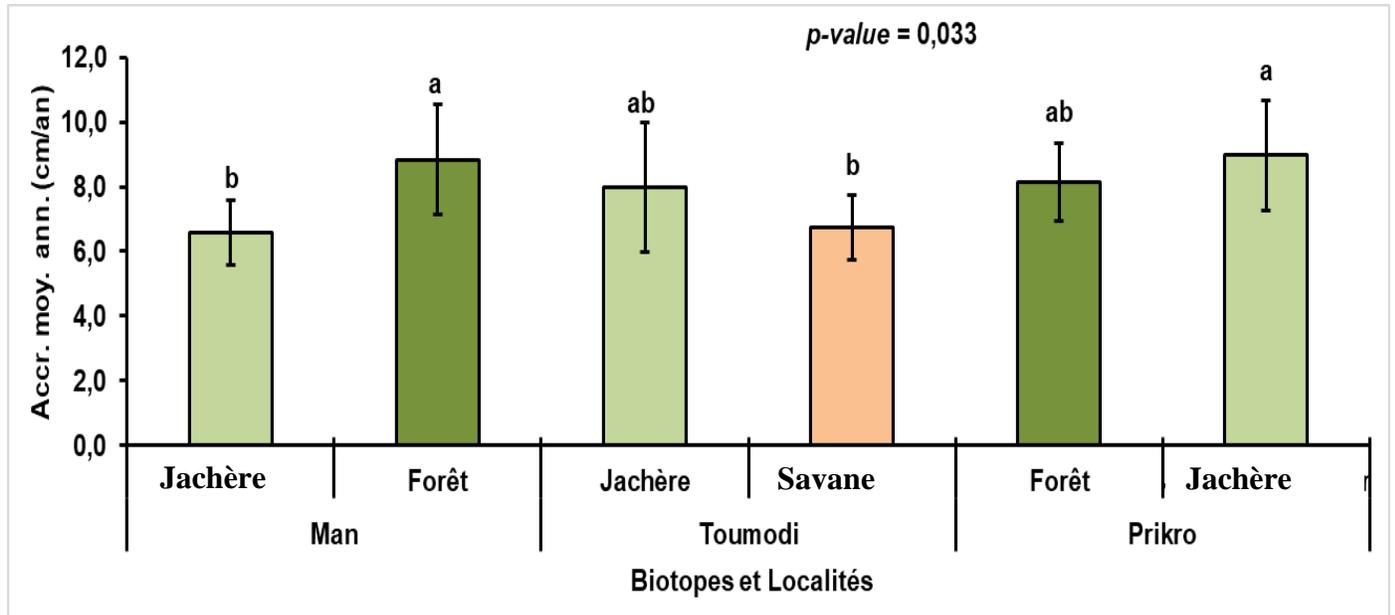


Figure 25 : Accroissement moyen annuel des plants immatures en fonction du biotope et de la localité

Les barres représentent l'erreur type de la moyenne. Les moyennes affectées des lettres différentes indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$), **Accr.moy.ann** : Accroissement moyen par année.

❖ Effet du précédent culturel sur la production de caoutchouc

Le tableau XXI présente les valeurs moyennes de la production de caoutchouc en fonction des précédents culturels. Ce tableau révèle que le précédent culturel affecte significativement ($P\text{-value} = 0,001$) la production de caoutchouc. Les résultats montrent également que le précédent culturel forêt donne les plus grandes productions principalement à Man $65,73 \pm 11,1 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$ et Prikro $62,33 \pm 13,2 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Il est suivi du précédent culturel jachère et la savane vient en dernière position. Il ressort de ce tableau que les plants cultivés sur les précédent culturels forêt et jachère donne les meilleures productions. Aussi, la production a été d'un bon niveau dans tous les départements.

Tableau XXI : Production moyenne de caoutchouc en fonction du précédent cultural

Localités	Précédent cultural	Production moyenne en caoutchouc sec	
		$g.a^{-1}.s^{-1}$	$kg.ha^{-1}.an^{-1}$
Man	Jachère	60,11±10,3a	2277,8±80,1b
	Forêt	65,73±11,1a	3016,9±78,6a
Toumodi	Jachère	56,73±12,3b	2495±55,2b
	Savane	54,33±9,2b	1823,3±61,6c
Prikro	Forêt	62,33±13,2a	2545,9±37,6b
	Jachère	57,15±11,5b	2451,8±49,2b
P-value		0,04	0,042

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Student-Newman-Keuls, $\alpha = 0,05$). $g.a^{-1}.s^{-1}$: gramme par arbre par saignée ; $kg.ha^{-1}.an^{-1}$: kilogramme par hectare par an ; $p.ha^{-1}$: plants par hectare.

❖ **Effet du précédent cultural sur la sensibilité à l'encoche sèche des arbres**

L'étude de l'effet du précédent cultural sur la sensibilité à l'encoche sèche des arbres montre que la longueur d'encoche malade (LEM) des arbres est plus influencée à Toumodi (Tableau XXII). Le taux le plus élevé ($15,3 \pm 1,1$ %) de LEM est obtenu sur le précédent savane à Toumodi. Il est suivi des précédents jachère respectivement à Man et Toumodi avec $10,2 \pm 2,2$ et $10,14 \pm 2,5$ %. Aussi, la plus faible valeur ($6,17 \pm 1,9$ %) de LEM est observée à Man sous précédent forêt. Concernant le taux d'arbre sec, Toumodi avec le précédent culturale savane montre le plus fort taux d'arbres totalement secs ($16,2 \pm 1,9$ %) et Prikro avec le précédent cultural jachère donne le plus faible ($5,3 \pm 1,2$ %) taux d'arbre totalement sec.

Tableau XXII : Taux de longueur d'encoche malade et d'encoche sèche en fonction de la du précédent cultural

Localités	Biotope	LEM (%)	ES Totale
Man	Jachère	10,2±2,2b	7,3±1,9c
	Forêt	6,17±1,9e	6,9±1,7d
Toumodi	Jachère	10,14±2,5b	8,5±1,2b
	Savane	15,3±1,1a	16,2±1,9a
Prikro	Forêt	8,2±1,7d	7,7±0,9c
	Jachère	9,1±2,1c	5,3±1,2e
p-value		0,0001	0,0001

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). LEM : Longueur d'Encoche Malade ; ES : Encoche sèche totale ; cm : centimètre ; % : pourcentage.

❖ Effet du précédent cultural sur les paramètres physiologiques des arbres

L'analyse des paramètres physiologiques du latex des arbres (Extrait sec, Saccharose, Phosphore inorganique et Groupement thiols) a montré une différence significative liée au précédent cultural (Tableau XXIII). Les résultats du taux moyen d'extrait sec du latex montrent qu'il est très élevé ($> 43\%$) en fonction du biotope et dans chaque localité. Pour toutes les localités, il a augmenté en moyenne de $45,42 \pm 2,28$ à $52,45 \pm 4,24\%$. Les teneurs moyennes en saccharose du latex varient de $6,6 \pm 0,91$ à $12,01 \pm 1,95 \text{ mmol.l}^{-1}$. Ces teneurs sont d'un niveau moyen (≤ 6 à $9 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$) et élevé (≤ 9 à $12 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$) pour les précédents forêt de Man et Prikro. Dans l'ensemble, les teneurs en phosphore inorganique (Pi) sont généralement moyennes (≤ 15 à $20 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$) pour toutes les localités. Les résultats relatifs à la teneur moyenne en groupements thiols (RSH) du latex des arbres sont d'un niveau moyen ($\leq 0,60$ à $0,80 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$) sur tous les précédents culturaux, hormis le précédent forêt de Man qui est d'un niveau élevé ($\leq 0,80$ à $0,90 \text{ mmol.l}^{-1} \geq$).

Tableau XXIII : Paramètres physiologiques du latex des arbres en fonction du précédent cultural

Parcelle	Biotope	Ext.Sec (%)	Sacc (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	RSH (mmol.l ⁻¹)
Man	Jachère-	$48,75 \pm 4,31$ b	$10,4 \pm 0,28$ b	$18,83 \pm 1,62$ a	$0,75 \pm 0,03$ b
	Forêt	$52,45 \pm 4,24$ a	$12,01 \pm 1,95$ a	$19,83 \pm 3,60$ a	$0,90 \pm 0,03$ a
Toumodi	Jachère	$46,55 \pm 1,21$ c	$7,3 \pm 0,56$ b	$16,6 \pm 1,27$ b	$0,67 \pm 0,16$ c
	Savane	$45,42 \pm 2,28$ d	$6,6 \pm 0,91$ d	$15,13 \pm 1,34$ c	$0,61 \pm 0,11$ c
Prikro	Jachère	$46,94 \pm 5,65$ c	$8,3 \pm 0,84$ c	$15,9 \pm 3,46$ c	$0,65 \pm 0,33$ c
	Forêt	$48,12 \pm 4,21$ b	$9,8 \pm 2,75$ b	$17,9 \pm 1,62$ b	$0,71 \pm 0,43$ b
p-value		0,036	0,023	0,001	0,017

Les moyennes affectées des lettres différentes dans la même colonne indiquent des différences significatives (test de Kruskal Wallis au seuil de $\alpha = 0,05$). mmol.l⁻¹ : milimole par litre ; Ext.Sec : Extrait Sec ; Sacc : Saccharose ; Pi : Phosphore inorganique ; RSH : Groupements thiols ; % : pourcentage.

3.1.8. Relations entre paramètres agro-physiologiques, environnementaux et pédologiques

Diverses corrélations sont établies entre les paramètres agro-physiologiques, environnementaux et pédologiques (Tableau XXIV). L'analyse du tableau montre plusieurs niveaux de corrélation entre les différentes variables. Au niveau des paramètres pédologiques, les résultats ont indiqué que la toposéquence et la texture du sol établissent une forte corrélation positive ($r = 1$; $P < 0,001$) avec le taux d'éléments grossiers. La texture du sol permet d'établir également une forte corrélation positive avec la longueur d'encoche malade ($r = 0,91$; $P < 0,01$),

la teneur en saccharose du latex ($r = 0,99$; $P < 0,01$) et la teneur en groupements thiols ($r = 0,93$; $P < 0,01$) contrairement à la toposéquence qui établit une forte corrélation négative avec les mêmes paramètres. Quant à la profondeur, elle a établi une forte corrélation positive avec la longueur d'encoche malade ($r = 0,99$; $P < 0,01$), le taux d'extrait sec ($r = 0,92$; $P < 0,01$) et la production de caoutchouc ($r = 0,99$; $P < 0,01$) contrairement au phosphore inorganique qui présente une forte corrélation négative ($r = 0,97$; $P < 0,01$). Le taux d'éléments grossiers présente également une forte corrélation négative avec la longueur d'encoche malade ($r = 0,90$; $P < 0,01$), la teneur en saccharose ($r = 0,99$; $P < 0,01$) et la teneur en groupements thiols ($r = 0,94$; $P < 0,01$).

Pour la relation entre les paramètres environnementaux et agro-physiologiques, les résultats indiquent une forte corrélation positive entre le biotope, le saccharose ($r = 0,96$; $P < 0,01$) et l'accroissement ($r = 0,97$; $P < 0,01$). Quant à la densité de plantation, elle donne une forte corrélation positive entre la longueur d'encoche malade ($r = 0,99$; $P < 0,01$), le taux d'extrait sec ($r = 0,92$; $P < 0,01$), la teneur en saccharose ($r = 0,96$; $P < 0,01$) et la production ($r = 0,86$; $P < 0,01$). Le taux d'extrait sec quant à lui montre une forte corrélation positive entre la longueur d'encoche malade ($r = 0,94$; $P < 0,01$) et la production ($r = 0,99$; $P < 0,01$). La longueur d'encoche malade donne une forte corrélation positive avec la teneur en saccharose ($r = 0,93$; $P < 0,01$) et la production ($r = 0,89$; $P < 0,01$) mais présente une faible corrélation négative avec le phosphore inorganique ($r = 0,81$; $P < 0,05$). L'extrait sec et le saccharose sont quant eux liés positivement aux groupements thiols avec $r = 0,89$ et $r = 0,91$ respectivement. Le phosphore inorganique est négativement lié à la production de caoutchouc ($r = 0,98$; $P < 0,01$) et positivement à l'accroissement ($r = 0,90$; $P < 0,01$). La production a une faible corrélation négative avec l'accroissement ($r = 0,82$; $P < 0,05$).

Tableau XXIV : Matrice de corrélation entre paramètres agro-physiologiques, environnementaux et pédologiques

	Topo	Text	Profondeur (cm)	EG (%)	Biotope	Densité	ES Totale	%LEM	Ext.Sec (%)	Sacc (mmol.l ⁻¹)	Pi (mmol.l ⁻¹)	RSH (mmol.l ⁻¹)	Produc	Accroi
Topo	1,00													
Text	1,00***	1,00												
Profondeur (cm)	-0,68	0,68	1,00											
EG (%)	1,00***	1,00***	-0,68	1,00										
Biotope	-0,47	-0,49	0,29	-0,15	1,00									
Densité	-0,19	0,14	0,19	-0,09	-0,63	1,00								
ES Totale	-0,72	0,73	1,00***	-0,73	0,16	0,92	1,00							
%LEM	-0,91	0,91	0,93	-0,91	-0,36	1,00	0,95	1,00						
Ext.Sec (%)	-0,70	0,70	-0,05	-0,70	0,09	0,40	0,01	0,33	1,00					
Sacc (mmol.l ⁻¹)	-1,00	1,00	0,74	-1,00	0,97	0,96	0,78	0,94	0,64	1,00				
Pi (mmol.l ⁻¹)	0,50	-0,50	-0,97	0,50	0,73	-0,77	-0,96	-0,82	0,27	-0,57	1,00			
RSH (mmol.l ⁻¹)	-0,94	0,94	0,40	-0,94	-0,58	0,77	0,46	0,72	0,90	0,91	-0,18	1,00		
Produc	-0,63	0,63	1,00	-0,63	-0,16	0,86	0,99	0,90	-0,12	0,69	-0,99	0,34	1,00	
Accroi	0,08	-0,08	-0,78	0,08	0,97	-0,42	-0,74	-0,49	0,66	-0,15	0,90	0,26	-0,82	1,00

Topo : Toposéquence ; *Text* : Texture ; *EG* : Élément Grossier ; *ES* : Encoche Sèche totale ; *LEM* : Longueur d'Encoche Malade ; *Ext.Sec* : Extrait sec ; *Sacc* : Saccharose ; *Pi* : Phosphore inorganique ; *RSH* : Groupements thiols ; *Produc* : Production de caoutchouc ; *Accroi* : Accroissement ; mmol.l⁻¹ : milimole par litre ; * : faible corrélation ; ** : forte corrélation ; *** : très forte corrélation.

3.2. DISCUSSION

3.2.1. Contexte pédologique de la zone dominé par les ferralsols et les cambisols

La classification et l'évaluation des sols pour différentes utilisations des terres sont la première étape pour développer un système d'utilisation durable des terres et respectueux de l'environnement. L'étude systémique du sol en tant que ressource naturelle, fournit des informations sur la nature et le type de sol, leurs contraintes, leurs potentiels, leurs capacités et leur aptitude à divers usages (Sehgal, 1996).

L'étude pédologique réalisée sur les sites expérimentaux a révélé que les sols de Man et Prikro appartiennent à la classe des ferralsols, ceux observés à Toumodi sont de la classe des Cambisols (selon la WRB version 2022). Ces sols se sont développés sur différents types de roches en fonction des positions topographiques, d'origine métamorphique (Schistes, Amphibolite, Granite, Gneiss et Migmatite). Certains îlots de Cambisols sont développés sur des roches granitiques et des alluvions. Les variations climatiques, les facteurs parentaux, les facteurs biologiques et les facteurs topographiques sont les différentes interactions qui déterminent la formation et les propriétés des différentes classes de sols que l'on trouve dans ces localités d'étude.

L'évaluation des caractéristiques morpho-physiques des sols indique que les sols de Man sont profonds, avec une couche arabe plus épaisse. Cette profondeur importante des sols de Man pourrait être confortée par la végétation dense avec de grands arbres dans cette région montagneuse et par une grande saison de pluie de plus de trois mois, avec une pluviométrie moyenne supérieure à 1600 mm.an⁻¹. A cela, s'ajoute une forte activité des microorganismes observée dans ces sols, créant les conditions d'une pédogenèse forte et rapide. En effet, Brou (2005) et Kassin *et al.* (2012) confirment la bonne profondeur des sols par ces paramètres bioclimatiques et l'intensité de l'altération des roches. Cette qualité qu'offrent les sols de Man pourrait être bénéfique à l'agriculture, car un sol profond peut offrir plus d'espace aux racines des plantes pour un bon développement et améliorer ainsi l'absorption des nutriments et de l'eau (Essehi, 2019). Entre autres, les horizons organo-minéraux en surface ont été globalement, épais ce qui pourrait s'expliquer par l'abondance de racines dues à la forte végétation sur les sols et la forte pluviosité (≥ 1600 mm.an⁻¹) dans cette région (Brou, 2017). Ce bon développement de ces horizons serait susceptible de favoriser une bonne croissance racinaire et un bon développement des plantes

(Baize, 2000). Les horizons de surface des sols sont bruns (7,5 YR), signe de la présence de matière organique dans la couche superficielle (N'guessan *et al.*, 2015). L'altération prononcée de ces roches a fortement réduit le taux d'éléments grossiers dans ces sols. Les éléments grossiers identifiés sont constitués de graviers et de gravillons de quartz qui pourraient provenir de la désagrégation de schiste birimien observable dans la localité comme l'a signalé Bahan *et al.* (2012). Selon Compagnon (1986), un sol avec une telle profondeur et poreux offre des conditions très favorables à l'hévéaculture.

La teneur en argile de ces sols a augmenté avec la profondeur du sol quelle que soit la toposéquence. La texture était soit sablo-argileuse (10 à 25 % d'argile), soit argilo-limoneuse (25% < argile < 50%) dès la surface du sol. Notons qu'une faible teneur des sols en argile pourraient avoir des conséquences sur la qualité des sols, notamment leur fertilité chimique comme l'ont noté Adéchina *et al.* (2018) sur les sols de Gogbala au Nord de la Côte d'Ivoire. Par ailleurs, en hévéaculture, les travaux de Compagnon, (1986) et Essehi, (2019) ont montré qu'une forte teneur (≥ 25 %) des sols en argile serait un atout pour le développement des arbres d'hévéa. En effet, du fait de sa grande surface spécifique et des propriétés colloïdales, l'argile a une grande capacité de fixation des cations, responsable de la fertilité chimique du sol.

La densité des sols de Man a été plus élevée dans les mi et bas de versant que celle des hauts de versants. Toutefois cette densité moyenne ($< 1,6 \text{ g.cm}^{-3}$) montre une bonne aération des sols due probablement à la proportion moyenne (≤ 25 %) de ces sols en argile. En effet, la densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du matériau et, indirectement, la porosité totale. Lorsqu'elle est élevée, le sol ne contient pas des pores nécessaires à la croissance des racines, les capacités en eau sont réduites et la circulation des fluides ralentie (N'guessan *et al.*, 2015). L'étude a révélé une fluctuation de la teneur en eau du sol au cours des saisons. Les valeurs élevées de la teneur en eau mesurée à Man, sont dues à l'abondante quantité de pluie qui tombe dans cette région. L'étude a révélé une augmentation de la réserve en eau du sol, du haut au bas de versant. Cette variation semble être liée aux caractères morphologiques des sols, notamment le taux d'éléments grossiers et la texture. En effet, sur les hauts de versant, où le taux d'éléments grossiers a été élevé, la réserve utilisable est relativement faible (103 mm). Par contre, dans les positions inférieures (mi-versant et bas versant), riches en éléments fins (argile et limon) et faiblement gravillonneuses, cette réserve est relativement élevée (134 mm). Ce résultat est similaire à ceux obtenus par Koné (2007), dans le Nord de la Côte d'Ivoire, au-dessus du 7ème parallèle. Selon cet auteur, l'eau utile du sol

croît des sols de sommet, de teinte 2,5YR, aux sols de bas de versant, de teinte 10YR. L'auteur explique ce résultat par un lessivage progressif de l'argile des positions supérieures et leur accumulation dans les positions inférieures.

Les sols de Man ont été très acides ($\text{pH} \leq 5$) dans les hauts de versant. En effet, le rôle du pH pour un sol donné est de créer un milieu favorable à la nutrition minérale des plantes et à leur croissance. Ce rôle est mieux rempli quand le pH est voisin de 7. Cependant, les sols de Man ont eu des pH très acides, ce qui constitue un paramètre favorable à la culture de l'hévéa (Moreau, 2001 ; Doucet, 2006 ; Borah *et al.*, 2010). Dans ces sols, la teneur en azote, considérée comme l'un des principaux éléments nutritifs des sols (Kuttimani *et al.*, 2013), a été relativement faible. Ceci pourrait être lié à la faible teneur en argiles, à l'abondance des pluies dans la localité, qui auraient conduit à une perte par ruissellement, lixiviation ou dénitrification (FAO, 2003). La minéralisation de la matière organique, traduite par le rapport C/N, serait probablement liée aux conditions physico-chimiques plus ou moins favorables ($\text{pH} = 5,5$) du sol. Les conditions climatiques pourraient aussi expliquer le niveau moyen de la matière organique obtenu. L'humidité et la température qui prévalent en zone tropicale humide favorisent la minéralisation des composés organiques. La durée de la jachère (2 à 4 ans) peut en être également la cause. En effet, la courte durée de la jachère ne permet pas à la végétation subclimacique de régénérer assez efficacement la matière organique et les nutriments du sol (Harter, 2007).

Dans le cas de la culture de l'hévéa, les propriétés physiques telles que la texture, la profondeur du sol et le taux d'éléments grossiers du sol conditionnent plus la réussite d'une plantation d'hévéa que les propriétés chimiques qui eux peuvent être comblés à tout moment par apport extérieur (Compagnon, 1986). Cela justifierait la faible proportion des sols (18,4 % de la localité) de la localité de Man à la culture de l'hévéa.

Les sols de Toumodi et Prikro ont généralement été moins profonds (< 150 cm) à tous les niveaux de la toposéquence comparativement à ceux de Man. Par ailleurs, une profondeur d'apparition des éléments grossiers généralement inférieure à 30 cm a été observé dans les hauts de versant des sols de Toumodi contrairement à ceux de Prikro qui ont été observés au-delà de 60 cm. En effet, la profondeur utile d'un sol est fondamentale pour la culture de l'hévéa du fait de son enracinement. Elle permet alors de se prononcer ou de décider quant à la mise en valeur d'un sol en hévéa. Si elle est inférieure à 100 cm, il faut abandonner le sol à un autre type d'exploitation agricole, car la durabilité d'une culture d'hévéa n'y est pas garantie (Déa *et al.*, 1998 ; Penot, 2001 ;

Yoro et Kassin, 2004). La faible profondeur du sol réduit également le volume de terre explorable par les racines et sa réserve en eau (Esséhi, 2019 et Chandrakala *et al.*, 2019). Elle empêche par conséquent un bon ancrage des plantes. La faible profondeur du sol constitue de ce fait une contrainte pour l'hévéaculture.

La granulométrie (argile, limons fin et grossier, sables fin et grossier) a révélé que les textures des sols sont majoritairement argilo-sableuse à sablo-argileuse avec une proportion d'argile comprise entre 25 et 45 % selon la localité et la toposéquence. En effet, les sols de Prikro ont été plus argileux que ceux de Toumodi qui ont quant à eux présenté plus d'éléments grossiers. La texture sableuse n'est pas une contrainte pour des régions à pluviométrie abondante et bien répartie toute l'année (Chandrakala *et al.*, 2019). Par contre, pour les climats relativement secs, comme celui de la localité de Toumodi et Prikro, la texture sableuse est une contrainte, car sur ce type de sol, l'eau n'est plus disponible dès que les pluies cessent (Yoro & Kassin, 2004). Pour une hévéaculture en phase d'installation sur un sol sableux, les besoins en eau des hévéas ne pourront pas être satisfaits, surtout en saison sèche ; ce qui pourrait occasionner une forte mortalité des jeunes plants notamment à Toumodi où les sols ont été moins argileux. A la différence de Prikro où les sols avec une bonne teneur en argile seraient susceptibles de favoriser la rétention de l'eau en saison pluvieuse et permettre un bon développement des plants dans cette région. Le sable rend le sol filtrant, alors que la présence de l'argile permet la rétention de l'eau. Le limon étant considéré comme un engrais, le sol de texture limono-argilo-sableuse est équilibré même si le sol idéal pour l'hévéaculture est le sol sablo-argileux ou argilo-sableux (Ono *et al.*, 2021).

Les sols de Prikro et Toumodi appartiennent, respectivement, aux classes des Ferralsols et Cambisols (WRB, 2022). Les sols de Toumodi ont également été affectés par le phénomène de remaniement (forte charge en éléments grossiers), qui se sont observés à environ 40 cm de profondeur. Ce phénomène peut constituer un facteur limitant à l'implantation de certaines cultures, si la nappe de gravats est supérieure à 25 cm d'épaisseur ou si le pourcentage en éléments grossiers de l'horizon est supérieur à 50 %. En effet, les éléments grossiers (concrétions et nodules) réduisent le volume de terre explorable par les racines et la réserve en eau. Ils entravent l'enracinement de la plante. Toutefois, l'hévéa a des racines fasciculées, peu profondes et peut donc s'accommoder de ce type de sol s'il n'y pas d'induration à moins de 100 cm. La richesse en éléments grossiers des horizons superficiels prédispose les sols de Toumodi au processus d'induration. En effet, il a été montré que les Cambisols sont riches en oxydes de fer, lesquels sont capables de cimenter les

éléments grossiers (Yao-Kouamé, 2008) et constituer des indurations au niveau du sol ce qui rendrait ces sols moins propices à l'hévéaculture contrairement à ceux de Prikro qui ont été moins pourvus en éléments grossiers et contenant plus d'argile. La formation de ces types de sol est due à une proportion importante d'oxyde de fer, responsable de l'induration des sols (Boyer, 1982 et Yao-Kouamé, 2008). Le processus d'induration et d'hydromorphie observé sur les sols à Toumodi aurait pour effet la réduction du volume de terre exploitable par les racines. Aussi, pour les sols comprenant des horizons dont la charge en éléments grossiers varie de 30 à 50 %, la fertilité pourrait se trouver sensiblement réduite surtout si cette charge en éléments grossiers se retrouve sur plus de 20 à 30 cm dans les horizons supérieurs du profil (Boa, 1986). Cette charge constitue un obstacle à l'élongation de la racine pivotante de l'hévéa (Compagnon, 1986) dont la trajectoire pourrait être modifiée et la croissance freinée. Pour les sols ayant un horizon gravillonnaire qui repose, dans les 100 cm supérieurs, sur un horizon altéritique, une bonne trouaison (40 cm^3) permet de juguler l'influence négative des éléments grossiers sur l'enracinement. En effet, elle permet de diminuer l'importance de l'horizon gravillonnaire. Dans ces conditions, l'accès de la racine pivotante à l'horizon d'altération, plus humide que les horizons supérieurs en saison sèche, est facilité pour la survie des plants (Jagoret & Jadin, 1993). En atteignant un obstacle tel qu'une induration (cuirasse ou carapace), un caillou, une pierre ou un bloc rocheux, la racine pivotante peut modifier sa trajectoire, changer d'aspect ou arrêter sa croissance.

La densité apparente moyenne des sols a augmenté du haut de versant au bas de versant. Elle est plus faible dans les hauts de versant avec celui de Toumodi qui a présenté la plus faible valeur ($0,96 \text{ g.cm}^{-3}$). En effet, la densité apparente du sol correspond à la masse de terre présente dans un volume donné. Cela permet de quantifier la porosité et la compaction d'un sol, deux éléments importants pour la croissance des plantes. Les valeurs de la densité apparente plus faibles dans les hauts de versant traduisent une bonne aération des sols (Yeboua *et al.*, 2008 ; N'Guessan *et al.*, 2015) du fait de la forte proportion en éléments grossiers. La densité apparente du sol traduit globalement l'état de compaction du matériau et indirectement, la porosité totale. Lorsqu'elle est élevée, le sol ne contient pas des pores nécessaires à la croissance des racines, les capacités en eau sont réduites et la circulation des fluides ralentie (Alongo & Kambele, 2013). La densité apparente des sols tropicaux augmente avec la profondeur (Feller *et al.*, 2001 ; Selma *et al.*, 2014), et selon le type d'occupation des sols. Un sol trop compact peut empêcher les racines des plantes d'accéder à l'eau et aux nutriments dont elles ont besoin pour se développer. Une densité apparente élevée peut

également réduire la porosité du sol, ce qui diminue la capacité de rétention d'eau et peut rendre le sol plus vulnérable à érosion.

L'étude a révélé une fluctuation de la teneur en eau du sol au cours des saisons. Elle a été élevée en saison pluvieuse et faible en période sèche. En effet, cette étude a mis en évidence la quantité de pluies enregistrée entre deux dates de mesure d'humidité. Yao & Goué (1992) ont également mis en évidence l'influence positive de la quantité d'eau enregistrée entre deux périodes de mesure d'humidité sur la teneur en eau du sol. Cependant, les valeurs élevées de la teneur en eau mesurée dans les mi et bas de versant sont dues à la bonne teneur des sols en argile et par ailleurs à la faible quantité d'éléments grossiers. La variation de la réserve utile est donc fonction de la période d'observation. Même si, la quantité d'eau disponible pourrait s'épuiser, en absence totale de pluies sur une longue période. Selon compagnon (1986), cette réserve sera insuffisante pour couvrir les besoins hydriques de l'hévéa, durant les saisons sèches (3 mois et plus selon les régions). Il va donc falloir appliquer des techniques d'économie d'eau ou arroser les plants, au cours des saisons sèches, pendant les trois premières années d'installation de la culture, pour assurer la survie des jeunes plants d'hévéa. Aussi, dans les départements de Toumodi et Prikro, la capacité de stockage en eau des sols a été faible et variable en fonction de la période et de la position topographique du fait de la faible quantité de pluie (1200 mm.an^{-1}) que reçoit ces départements (CNRA, 2021).

Du point de vue chimique, les sols de Toumodi sont potentiellement sensibles à la dégradation chimique (lixiviation des cations) à cause de leur faible teneur en argile (Disnar & Bruand, 2007 ; Olayossimi & Amidou, 2018). En effet, cette fraction minérale forme avec la matière organique, le complexe argilo-humique qui confère au sol une stabilité structurale et une forte capacité de rétention des éléments nutritifs. Les résultats du pH ont montré que les sols de Toumodi étaient acides, alors que ceux de Prikro étaient faiblement acides. Le bas niveau d'azote et le niveau moyen de carbone caractérisent bien les sols de Toumodi et Prikro. En effet, les systèmes de culture itinérante ou successive influencent la dynamique de la matière organique (Koné *et al.*, 2009) et ne donnent pas le temps nécessaire au sol de constituer son stock d'azote et de carbone (Bationo & Buerkert, 2000). La teneur en phosphore assimilable a été faible dans l'ensemble des sols. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Koko (2009), sous les cacaoyers dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. La teneur très faible en phosphore assimilable est typique et propre à de nombreux sols des régions inter-tropicales en raison de leur fort pouvoir

fixateur (Hinsinger *et al.*, 2015). Le faible niveau du phosphore assimilable serait aussi dû à la faible teneur dans ces sols, de la matière organique qui est la principale cause de la biodisponibilité du phosphore dans les sols en milieu tropicale. En effet, les travaux de Ouattara *et al.* (2017) ont montré un effet similaire de la matière organique sur la biodisponibilité du phosphore dans les sols sous les cultures de cacaoyer. Les teneurs des sols en calcium, magnésium, potassium et sodium et la somme des bases ont été faibles dans la plupart des sols. Cette mauvaise fourniture en cations échangeables dans l'ensemble des sols serait due à l'exportation par les récoltes sur plusieurs années sans une fumure de restitution et la mauvaise décomposition de la matière organique. Ce résultat est similaire à ceux de Kissou *et al.* (2014) menés sur les sols tropicaux au Burkina Faso qui relèvent la faible somme des bases des sols sous cultures et de Diomandé *et al.* (2021) obtenus après analyse des sols sous anacardiens en Côte d'Ivoire. Toutes ces caractéristiques physiques et chimiques dénotent de ferralsol à Prikro et de cambisol dans la localité de Toumodi. Les sols présentent des complexes fortement désaturés traduisant leur faible disponibilité en cations. En outre, la pauvreté du sol en éléments chimiques ne peut être un obstacle à l'implantation de l'hévéa, si de bonnes conditions physiques sont par ailleurs réalisées (Compagnon, 1986). Chez l'hévéa, les propriétés physiques du sol (profondeur, texture, aération, capacité de rétention en eau, etc...) sont plus importantes que la fertilité chimique du sol. En effet, comparé à d'autres cultures, l'hévéa supporte mieux des sols à faible potentiel de fertilité (Compagnon, 1986 ; Essehi, 2019 ; Ono *et al.*, 2021). De ce fait, une grande proportion (46,5 %) de sol a été identifiée comme étant bonne à la culture de l'hévéa à Prikro contrairement à Toumodi où seulement 26,9 % du territoire ont été définis comme ayant une bonne aptitude à la culture de l'hévéa.

3.2.2. Zone à aptitude hévéicole variable selon les principales classes de sols rencontrées et la position topographique des sols

Selon Compagnon (1986), les facteurs susceptibles d'agir sur la croissance végétative et le rendement de l'hévéa sont de diverses natures et sont liés aux conditions d'établissement et d'entretien de plantation, de récolte du latex et de la pression pathologique. Les résultats de notre étude ont également montré que le précédent cultural, l'entretien des parcelles et la densité de plantation influencent la production et l'accroissement des arbres d'hévéa.

L'étude du taux de mortalité des plants juste après la mise en place des plantations a permis de montrer que le précédent cultural influence la réussite des plants malgré l'utilisation du même

matériel végétal. Les parcelles ayant pour précédent cultural les jachères et les savanes ont eu les plus forts taux de mortalité contrairement aux parcelles avec le précédent cultural forêt. Les conditions climatiques et environnementaux tels que les différentes végétations propres à chaque localité pourraient également favoriser une variation du taux de mortalité des plants dans ces régions. En effet, ces forts taux de mortalités pourraient être liés aux variations climatiques : sécheresse, trop fortes variations de température notamment à Toumodi qui est une zone savanicole avec un niveau élevé de température (Mahyao *et al.*, 2022). De plus, ce taux de mortalité élevé en champ après transplantation, pourrait être dû à la déformation du système racinaire et au nombre insuffisant de radicelles causé par le long séjour dans les sachets. En effet, l'établissement d'une plante après la transplantation dépend de sa nutrition hydrominérale qui est fonction des radicelles munies de poils absorbants. La spiralisation et l'orthotropie des racines latérales plagiotropes engendrées par ces déformations diminuent la capacité de développement des racines après plantation en limitant l'utilisation des ressources en eau et en fertilisants du sol. Elles nuisent aussi à l'ancrage stable et durable des plants qui pourraient être déracinés par les vents (Assi *et al.*, 2018). Le fort taux de mortalité des plants sous précédent jachère caféier à Man pourrait être dû à la « pourriture blanche des racines » dont l'agent causal est un champignon du sol appelé *Leptoporus lignosus* ou *Rigidoporus lignosus* ou *Fomes lignosus* couramment appelé *Fomes* (Wahounou *et al.*, 2017). Le pourridié des racines peut décimer 10 à 30 voire 50 % du peuplement d'hévéa d'une plantation (Obouayeba, 2005). En effet, il est capable de se maintenir à l'état de saprophyte au sein de débris ligneux durant plusieurs années après défrichage (Wahounou *et al.*, 2017). Ces taux de mortalité ont été supérieurs à ceux observés dans les zones traditionnelles dans les mêmes conditions de cultures (Elabo *et al.*, 2022).

L'évaluation de l'accroissement moyen annuel des plants a également montré que les biotopes influencent l'accroissement des arbres. La jachère cacaoyère, forêt et jachère simple ont permis un bon niveau d'accroissement des plants. Cette situation serait probablement liée à l'arrière effet de la biomasse laissée sur les sols après désherbage. Il est généralement reconnu que les résidus de récolte permettent le recyclage des éléments nutritifs notamment l'azote, le phosphore et le potassium (Bado, 2002 ; Kambiré *et al.*, 2007) ce qui favoriserait l'accroissement des plants des cultures à venir probablement à l'origine d'une bonne productivité comme cela a été observé dans cette étude. Cela pourrait aussi s'expliquer par le fait que les arbres de forêt ont eu un effet bénéfique sur le sol en les rendant plus meuble, profond et aéré. De même, le pourridié racinaire,

redoutable maladie des racines causée par le genre *Fomes* sur les arbres de *Hevea brasiliensis*, pourrait être un obstacle à la réussite et à la croissance des plants ayant enregistré un faible taux de croissance (Wahounou *et al.*, 2017). Dans le même temps, vu la forte pluviosité enregistrée à Man, cette localité pourrait être plus favorable à la croissance des plants (Camara, 2019). Néanmoins, pour Lines *et al.*, (2010) ; Hurst *et al.*, (2011), la croissance des plants est faible en raison d'une plus grande vulnérabilité aux facteurs externes comme la sécheresse, les champignons ou les pullulations d'insectes.

Les résultats ont aussi montré que la densité des arbres influence l'accroissement des plants et qu'à Man, les arbres croissent mieux par rapport aux autres départements. En effet, les parcelles contenant 555 arbres.ha⁻¹ se sont mieux comportées sur tous les sites. Cependant, à Man les parcelles de 666 arbres.ha⁻¹ se sont également mieux développées. Cela pourrait être dû à la bonne pluviosité (1600 mm.an⁻¹) de cette localité contrairement à ceux de Toumodi et de Prikro (1200 mm.an⁻¹). L'accroissement de la circonférence des hévéas dans la localité de Man pourrait indiquer une compétition possible pour l'absorption d'eau et de nutriments. En effet, lorsque la densité de plantation augmente, elle atteint un point seuil au-dessus de laquelle la compétition entre les plants pour les nutriments, l'eau et la lumière devient forte (Foidl *et al.*, 2001 ; Abuzar *et al.*, 2011) ; ce qui limite le grossissement individuel (circonférence) et la croissance en hauteur des plants (Abuzar *et al.*, 2011). Mieux, les travaux de Obouayeba (2005) et Obouayeba *et al.* (2006) ont clairement mis en évidence que la densité optimum en technique de planting ou la densité économiquement et agronomiquement justifiable est comprise entre $400 \leq \text{arbres.ha}^{-1} \leq 700$. Selon leur densité et leur position, la croissance de l'hévéa peut être réduite de 20 à 30 % (Compagnon, 1986 ; Pagès *et al.*, 1991 ; FIRCA, 2008).

Il faut également noter dans cette étude que les plants d'hévéa se sont mieux développés à Man et Prikro qu'à Toumodi en fonction de la teneur en argile et de la classe des sols. En effet, les sols de Man et de Prikro sont de la classe des ferralsols tandis que ceux de Toumodi sont des cambisols aussi l'argile contenu dans ces ferralsols est un constituant important du sol qui peut affecter sa structure, sa rétention en eau et sa capacité à fournir des nutriments aux plantes (Rezaei & Gilkes, 2005) ce qui justifierait la bonne croissance des plants d'hévéa sur ces classes de sols. Aussi, le potentiel d'un sol à faire croître les plants des cultures est largement déterminé par l'environnement que le sol fournit pour la croissance des racines. Les racines ont besoin d'air, d'eau,

de nutriments et d'un espace adéquat pour se développer. Les propriétés physiques du sol et, à leur tour, la croissance des plantes sont considérablement contrôlées par la variation des attributs du paysage, qui influencent la distribution de l'énergie, les éléments nutritifs des plantes et la végétation (Rezaei & Gilkes, 2005). Cela reflète les niveaux divergents de développement des plants dans les localités d'étude. Selon Soltner (1992), rapportées par N'guessan *et al.*, (2015), lorsque les sables grossiers dominent dans un sol, ils favorisent la pénétration de l'eau et de l'air, retiennent peu d'eau et facilitent les échanges de température. Le sol se réchauffe vite en saison sèche, et ses constituants ne peuvent s'agglomérer en mottes. Ce qui justifierais le faible niveau de développement des plants dans la localité de Toumodi. Cependant, il faut noter que la culture de l'hévéa serait bénéfique à l'environnement de ces régions. En effet, la culture de l'hévéa améliore les propriétés physique, hydrodynamique, chimique et biologique des sols dégradés (Chandrakala *et al.*, 2019 ; Andriyana *et al.*, 2020), grâce à sa chevelu racinaire très abondant, à sa grande capacité de séquestration du CO₂ et de l'environnement de forêt secondaire qu'elle crée. Elle reconstitue, également, un couvert forestier dès la cinquième année de culture (Obouayeba *et al.*, 2016).

La production moyenne annuelle de caoutchouc naturel à l'arbre et à la saignée ($\text{g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) et relativement celle en kilogramme à l'hectare par année ($\text{kg}.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) ont été influencées par les paramètres environnementaux et les paramètres de sol étudiés. Les résultats ont montré une productivité en caoutchouc plus accrue à Man et à Prikro qu'à Toumodi. Ces résultats seraient imputables aux conditions environnementales. En effet, la localité de Man a une pluviométrie de plus 1600 mm.an-1 qui est bien répartie le long de l'année (Brou, 2017) et les sols ont été plus argileux. Ce niveau d'argile pourrait retenir l'eau afin de la mettre à la disposition de la plante en période sèche. Devakumar *et al.* (1988), ont rapporté que pendant une période de stress hydrique du sol le débit d'écoulement du latex est réduit. Chandrasekhar, (1994) a soutenu que l'humidité du sol était significativement et positivement liée au rendement en latex. Il est donc certain que l'augmentation des fragments grossiers réduit l'humidité disponible du sol et diminue ainsi la croissance ainsi que le rendement en caoutchouc, lorsque les autres conditions sont maintenues constantes. Outre, l'impact direct des paramètres physiques du sol, notamment la teneur en argile du sol sur la croissance et le rendement en caoutchouc, Rao & Vijayakumar (2006) ont montré l'effet significatif des éléments nutritifs du sol sur le rendement en caoutchouc.

Les taux moyens de longueur d'encoche malade (LEM) et d'extrait sec ont été plus élevés à Toumodi et Prikro qu'à Man. Plusieurs travaux ont indiqué que le syndrome de l'encoche sèche est causé par des stress exogènes et/ou un dysfonctionnement physiologique des arbres (Okoma et al., 2011 ; Okoma *et al.*, 2016 ; Obouayeba *et al.*, 2016). Le stress exogène peut être dû à une surstimulation (Chrestin, 1985) ou à de multiples stress parmi lesquels se trouvent, les fortes variations saisonnières du climat (Okoma *et al.*, 2016), le type de sol (Jobbe-Duval *et al.*, 1988) notamment, son niveau de compaction qui peut être lié au passage des bulldozers (IRD, 2005), etc... La forte sensibilité à l'encoche sèche observée à Toumodi et Prikro pourrait emmener à émettre l'hypothèse d'un problème pédologique. Puisque les sols de ces régions contiennent assez d'éléments grossiers et sont moins argileux.

L'état physiologique des arbres exprimé par le profil physiologique est l'état de santé des hévéas à un instant donné. Cet état peut être bon ou mauvais en fonction des paramètres environnementaux et du sol tel que l'on montré ces résultats. Cela signifie que les hévéas sont respectivement en condition de récolte du latex bonne ou optimale (exploitation normale des arbres) ou mauvaise (surexploitation ou sous-exploitation des arbres). Le profil physiologique est apprécié par l'analyse des paramètres biochimiques qu'est l'extrait sec (Ex.S), le saccharose (Sac), le phosphore inorganique (Pi) et les groupements thiols (R-SH). L'analyse des paramètres physiologiques du latex dans les différentes localités d'expérimentation a révélé que le taux d'extrait sec, reflet de l'efficacité de la biosynthèse isoprénique ou production de caoutchouc, tous traitements et classe d'activité métabolique confondus est satisfaisant (taux > 43 %, valeur de référence). En effet, ces taux ont varié d'élevé à très élevé selon les localités et la teneur en argile du sol. C'est le signe d'une très bonne activation du métabolisme laticigène et d'un bon rendement qui est d'ailleurs confirmé par les bonnes productions à l'hectare observées, c'est-à-dire que le saccharose intra laticifère est suffisamment disponible et très efficacement transformé en caoutchouc et ce, en fonction de la teneur en argile du sol. Cette forte teneur en extrait sec traduit une bonne régénération du latex après la saignée (Jacob *et al.*, 1998 ; Adou, 2019). C'est ce qui justifie la bonne production de latex sur ces sites avec plus de $38 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Au niveau du saccharose, les teneurs moyennes exprimées par localité sont très faibles hormis la localité de Man qui a une teneur élevée ($12 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$). Le saccharose étant le précurseur de la voie de biosynthèse du caoutchouc, il représente un facteur limitant de la production de latex et de la régénération (Lacrotte, 1991). Alors, une faible concentration peut traduire soit un mauvais approvisionnement

des cellules laticifères et une faible activité de ces cellules, soit une forte utilisation du saccharose due à une forte activité métabolique.

Le phosphore inorganique est considéré comme un indicateur de l'intensité du métabolisme énergétique des cellules laticifères car il est impliqué dans le catabolisme glucidique et dans la biosynthèse du caoutchouc. Il intervient dans la synthèse des nucléotides impliqués dans les transferts d'énergie chimique (ATP) ou porteurs de pouvoir réducteur (NAD(P)H/NAD(P)⁺). Sa concentration est fortement corrélée à la production (Eschbach et Tonnelier, 1984). Ces résultats traduisent que l'énergie biochimique au sein des laticifères pour la biosynthèse du caoutchouc est disponible et connaît une bonne augmentation relativement à chaque clone, notamment à son métabolisme. Ceci en rapport étroit avec l'augmentation de la profondeur du sol. Cela est illustré par les fortes valeurs d'extrait sec de toutes les localités. Sur les parcelles à faible profondeur, la teneur en phosphore inorganique au niveau des arbres saignés étant plus faible que celle des parcelles à forte profondeur, constitue un avantage. En effet, puisque le niveau de saccharose est bon, signifiant qu'un apport d'énergie exogène, par le biais d'une stimulation hormonale, n'aura probablement pas de préjudices majeurs causés aux arbres. Les groupements thiols (RSH) constituent un paramètre majeur du diagnostic car ils reflètent, en partie, la capacité des laticifères à se protéger de la production de molécules de formes actives d'oxygène (FAO : O₂⁻, OH⁻ et H₂O₂) qui s'avèrent très toxiques par leurs effets d'oxydation destructive au niveau des cellules laticifères. Ces formes actives d'oxygène participent généralement à la sénescence des cellules laticifères (Jacob *et al.*, 1988). Les niveaux de groupements thiols reflètent aussi l'intensité du stress auquel les arbres sont soumis vis-à-vis de la récolte du latex (Jacob *et al.*, 1988). A cet effet, les valeurs des RSH observées dans cette étude traduisent en effet, un niveau très bon de protection biologique des lutoïdes et une bonne stabilité du latex des hévéas comme montrés par les travaux de Traoré (2014) et ceux de Dick *et al.* (2014). Par ailleurs, la teneur moyenne en R-SH des localités d'étude, est, dans l'ensemble, faible. Le niveau des teneurs en R-SH pour toutes les localités traduit le fait que la saignée a eu une incidence négative sur les mécanismes de protection du système laticifère. Il indique, en outre, une instabilité des lutoïdes du latex. Cette instabilité semble expliquer variabilité plus ou moins bonne de la production de caoutchouc observée dans toutes les localités. Tout au moins, l'état des systèmes protecteurs des cellules laticifères productrices de latex constitue un facteur limitant de la production de caoutchouc. Cela pourrait être dû à la faible formation des saigneurs dans ces nouvelles zones (Elabo *et al.*, 2022).

Par ailleurs, l'étude a permis de montrer que la zone de Man à une faible superficie occupé par la culture de l'hévéa avec une superficie plantée de 163 ha pour 1148 planteurs. Cette faible superficie plantée se justifie par la faible disponibilité des terres liée au relief montagneux (Camara, 2019). A Prikro il existe autant de superficie pour autant de producteurs ce qui revient à un producteur par hectare. Cela se justifie par le fait que la région comprend plus d'autochtones qui ont pour activité principale l'agriculture (Banque mondiale, 2021). Au niveau de Toumodi, les résultats ont montré que cette zone contient les plus grandes superficies des sols occupés par l'hévéaculture. Ces résultats sont probablement dus au fait que cette région est plus accessible et plus proche de la zone traditionnelle de culture donc les citadins pourraient acheter plus de portion de terre pour la culture de l'hévéa.

L'état de surface des sols a laissé entrevoir des contraintes au développement de l'hévéa. Ces contraintes sont le cuirassement, l'affleurement de granite et les végétations qui pourraient entraver le développement de l'hévéa dans ces zones. En effet, les cuirasses et affleurements de granite indiquent des sols moins profonds qui peuvent entraver le développement des racines et ainsi limité leur absorption en eau. Ce qui constitue un véritable problème, car la faible pluviométrie observée à Prikro et à Toumodi limiterait la productivité des arbres. Toutes ces contraintes se traduisent par de nombreux cas d'échecs de la culture. Toutefois, il existe de grandes disponibilités de terre arable et la présence de nombreuses retenues et cours d'eau. Ce qui a permis d'observer des plantations réussies sur lesquelles se sont portées cette étude. Par ailleurs, les départements d'étude sont situés dans la zone de transition savane – forêt. En fonction des variations des facteurs climatiques et de la végétation dominante dans le paysage, la réussite des cultures varie d'une région à l'autre (Avit *et al.*, 1999) ce qui justifie la difficile réussite des plantations à Toumodi où les feux de brousse ont fait assez de dégâts. Cette diversité de végétation permet des activités agricoles diversifiées conduites par les populations (Cissé *et al.*, 2020). Cependant, il faut noter certaines contraintes au développement agricole dans ces régions. En effet, les saisons sèches de plus en plus longues, entraîneraient de fréquents feux de brousses. Cela pourrait être du fait de la présence de divers massifs montagneux à l'ouest qui influencent la répartition et la quantité des précipitations dans cette région, par un effet de fœhn (Eldin, 1971).

Avant l'essor de l'hévéaculture, les localités d'étude étaient couvertes, en partie, par des jachères, savanes arborées et de vieilles plantations abandonnées de café ou cacao. En fait, les

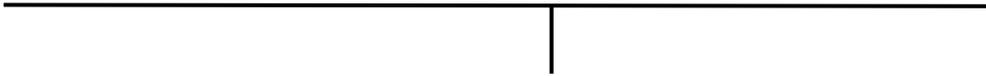
exploitations d'hévéa sont venues remplacer les jachères et par moment les vieilles exploitations abandonnées de caféières et de cacaoyères. Ainsi, c'est une forte présence d'arbres et de véritables paysages d'agroforesterie qui parsèment et couvrent la zone de nos jours. Comme le conseille Greenpeace (2011), les paysages d'agroforesterie jouent un rôle important dans la détermination des pluies, en créant des vents atmosphériques qui pompent de l'humidité à travers les continents pour provoquer les précipitations. En se basant sur les travaux de Houphouët *et al.* (2017) et Akmel (2018), l'on peut noter que le développement de l'hévéaculture dans ces localités pourrait conduire à corriger les déficits pluviométriques et diversifier le couvert floristique dans ces régions. Sa forte présence pourrait bien avoir des avantages environnementaux très perceptibles surtout à Toumodi qui est une zone savanicole et est plus proche des zones traditionnelles.

3.2.3. Production hévéicole corrélée aux précédents culturels des sols

La production de caoutchouc, l'accroissement, la longueur d'encoche malade (LEM), le saccharose, l'extrait sec et les groupements thiols sont influencés par le précédent cultural. En effet, les précédents culturels des sols font référence aux cultures qui sont cultivées sur un terrain avant la plantation d'hévéas. Alors, les précédents culturels des sols peuvent avoir un impact significatif sur la production hévéicole de plusieurs manières. Concernant la forêt, elle a dû aider à prévenir l'épuisement des nutriments du sol et à réduire la propagation des maladies et des ravageurs, ce qui a permis d'observer un meilleur comportement des hévéas établis sous ce précédent cultural. Egalement, cultivées après une forêt a certainement permis de protéger le sol de l'érosion, d'améliorer la fertilité du sol et contrôler les mauvaises herbes. Ainsi, la forêt a une relation positive sur la production, l'accroissement et le groupement thiol des arbres. En effet, les groupements thiols (R-SH) sont un ensemble de molécules antioxydantes majeures permettant de lutter contre les mécanismes physiologiques libérant de l'oxygène sous forme toxique lorsque l'activité laticigène est accrue par la stimulation éthylénique (d'Auzac, 1988). Leur régénération nécessite de l'énergie biochimique sous forme d'ATP et dépend aussi pour une part du sucre disponible *in situ* à l'origine du carbone moléculaire et de nombreuses réactions. Aussi, le précédent cultural jachère a une influence sur le taux d'extrait sec, le saccharose et le phosphore inorganique. La jachère a tout comme la forêt impactée positivement les paramètres de production de l'hévéa. En effet, la jachère permet de restaurer la fertilité du sol en augmentant sa teneur en nutriments et en le rendant plus perméable à l'eau. Cela conduit à une meilleure qualité des cultures et des rendements plus élevés

sur le long terme (Akpo *et al.*, 2002). Aussi, la jachère est une pratique agricole où une parcelle de terre est mise en repos pendant une saison de culture. Elle permet au sol de se reposer et de se régénérer en lui fournissant des nutriments et en augmentant sa capacité de rétention d'eau. Cependant, si la durée est courte cela peut ne pas permettre une bonne régénération des nutriments qui pourrait constituer une entrave au non développement des cultures à venir (Akpo *et al.*, 2002). Pour le précédent cultural savane, il a influencé la longueur d'encoche malade des arbres. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la savane n'a pas permis une bonne aération et porosité des sols. Aussi, la savane peut être sujet à des maladies et des ravageurs, peut nécessiter l'utilisation d'herbicides et de pesticides. De ces faits, ce précédent cultural a montré qu'il n'est pas bénéfique à la culture de l'hévéa car augmente l'encoche sèche de l'hévéa. Les précédents culturaux peuvent être bénéfiques aux paramètres de productions de latex comme l'a montré cette étude. Toutefois, il serait juste de mentionner que certaines cultures comme le maïs ou le manioc peuvent être porteuses de maladies spécifiques aux hévéas, ce qui peut augmenter le risque d'infections fongiques ou bactériennes (Wahounou *et al.*, 2017). Il est important de noter également que les effets des précédents culturaux peuvent varier en fonction de nombreux facteurs, tels que le climat, la composition du sol, les pratiques agricoles utilisées, etc (Obouayeba *et al.*, 2016).

CONCLUSION, RECOMMENDATIONS ET PERSPECTIVES



CONCLUSION

L'étude « Caractérisation agro-pédologique de nouvelles zones de production hévéicole de la Côte d'Ivoire » est une étude qui cadre avec les attentes des populations des localités de Man, Toumodi et Prikro. Celles-ci manifestent un engouement pour l'hévéaculture par la création de plus de 900 plantations, établies sur plus de 3 000 ha. Conformément au déroulé de l'étude, les deux composantes pédologique et agronomique ont permis de caractériser l'espace configuré par les différents départements concernés.

L'étude pédologique a mis en évidence quatre contraintes morpho-pédologiques à l'hévéaculture, le long des toposéquences. Il s'agit de l'induration à faible profondeur, du taux pondéral des éléments grossiers supérieur à 50 % en haut de versant, de la texture sableuse et de l'hydromorphie au bas de versant. Dans les localités d'étude, les positions topographiques dont les sols sont plus favorables à l'hévéaculture, sont les positions de mi-versant et de bas de versant exondés, non sableux. L'ensemble des sols des régions a présenté une structure généralement polyédrique subanguleuse. La texture des sols a varié en fonction de la localité et de la position topographique avec des sols à texture plus argileuse à Prikro et Man contrairement à ceux de Toumodi qui ont été plus sableux avec assez d'éléments grossiers. Les propriétés hydrodynamiques des sols, notamment leur capacité de stockage de l'eau (CSE), ont été significativement influencées par le site et la période d'observation, quelle que soit la partie de la zone d'étude. En effet, le stock en eau des sols a été plus important dans les mi et bas de versant en saison pluvieuse, notamment à Man où la pluviométrie est élevée (≥ 1600 mm/an). Il ressort nettement des études pédologiques, de l'ensemble des trois départements concernés par l'étude, que la localité de Prikro vient en tête, avec plus de 62 % de sa superficie favorable à l'hévéaculture par les proportions élevées de paramètres de sol de potentialités A et B (aptitude bonne et assez bonne). Ensuite, vient la localité de Man avec 48 % de sa superficie favorable à l'hévéaculture et enfin la localité de Toumodi avec 42 % de ses sols aptes à la culture de l'hévéa. Ces différentes aptitudes seraient liées à la classe des sols (ferralsol à Man et Prikro contre cambisol à Toumodi) et aussi au précédent cultural dont la forêt primaire et la jachère sont mieux indiqués pour une culture.

Au plan de la fertilité chimique des sols, la richesse du sol en éléments minéraux nécessaires au développement des arbres et à leur production a été globalement moyenne sur l'ensemble des localités d'étude. La disponibilité est assez bonne en phosphore (P) et en capacité d'échange

cationique (CEC) avec un pH favorable à la culture de l'hévéa. Par contre, la disponibilité en azote et en matière organique des sols est satisfaisante, alors que le C/N a montré une bonne minéralisation de la matière organique (MO). La Somme des bases échangeables (S) a été faible et le complexe des sols a également été faiblement désaturé.

Sur le plan agronomique, globalement l'établissement des plantations, du planting jusqu'à la mise en saignée, est un fait avéré même si localement quelques soucis (présence de couche indurée, retard de croissance plus ou moins important, ...) ont été notés. Le comportement agro-physiologique des plantations a été dans l'ensemble satisfaisant avec un meilleur développement des plants et une bonne production à Man et Prikro sur des sols avec une proportion d'argile ≥ 25 %. Le profil physiologique des arbres a également montré qu'ils sont dans l'ensemble bien exploités. Les résultats enregistrés présentent certes un écart par rapport à ceux observés dans les régions traditionnelles de culture, mais il peut être rattrapé dans le temps avec de bonnes pratiques agricoles et un meilleur encadrement des producteurs de ces nouvelles zones. Dans l'ensemble, tous les résultats obtenus à la fin de cette étude permettent de dire avec certitude que ces départements pourraient être un autre pôle de développement de l'hévéaculture en Côte d'Ivoire. Ces résultats répondent exactement aux préoccupations des producteurs qui est d'avoir de nouvelle terre propice à l'hévéa.

RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats obtenus, l'itinéraire technique de plantation dans ces nouvelles zones doit tenir compte des conditions pédoclimatiques actuelles et futures. Ainsi, les densités de plantation doivent favoriser une association de culture afin de mieux entretenir les plantations, assurer une autosuffisance alimentaire, diminuer la prolifération des mauvaises herbes et assurer une meilleure conservation de l'eau et de la matière organique du sol. Le développement durable de l'hévéaculture, dans le contexte pédoclimatique des trois départements, va nécessiter l'utilisation de clones d'hévéas résistants à la sécheresse et aux maladies. En outre, il faudra associer aux hévéas, les légumineuses arborées ou les bananiers, pour réduire leur taux de mortalité des plants dans leur jeune âge. Pour le succès de la culture de l'hévéa, il convient de mettre au point des clones résistants à la sécheresse, et d'adapter l'itinéraire technique de culture aux conditions

pédoclimatiques locales afin de faire de ces localités un autre pôle de développement de l'hévéaculture en Côte d'Ivoire.

PERSPECTIVES

L'étude a révélé que certains sols des nouvelles zones hévéicoles possèdent des caractères morphologiques favorables à la culture de l'hévéa. Il est donc possible de relancer durablement l'hévéaculture sur les précédents non forestiers. Il faut pour cela appliquer des itinéraires techniques adaptés aux conditions pédoclimatiques locales. C'est pour cela que, les perspectives suivantes sont envisagées, à savoir :

1. étendre l'étude des conditions agropédologiques, et même climatiques à toutes les nouvelles zones de production de caoutchouc en Côte d'Ivoire, afin de développer les plantations d'hévéa dans les zones agropédoclimatiques favorables ;
2. mettre au point, dans chaque nouvelle zone hévéicole, des itinéraires techniques de plantation régionalisées, qui soient adaptés aux conditions pédoclimatiques locales, et qui garantissent la durabilité de l'exploitation hévéicole ;
3. déterminer, par des études hydrodynamiques dans chaque nouvelle zone de production de caoutchouc, les besoins hydriques de l'hévéa à chaque étape de son développement, afin d'envisager, si possible une irrigation dans les périodes critiques, comme c'est déjà le cas en Indonésie ;
4. établir une carte de l'aptitude des sols à l'hévéaculture des nouvelles zones hévéicoles de la Côte d'Ivoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham J. & Joseph P. (2015). Une nouvelle approche de gestion des mauvaises herbes pour améliorer la santé du sol dans une culture de plantation tropicale, l'hévéa (*Hevea brasiliensis*). *Experimental Agriculture*, 52(1) : 36-50.
- Abuzar M.R., Sadozai, G.U., Baloch M.S., Baloch A.A., Shah I.H., Javaid T. & Hussain N. (2011). Effect of plant population densities on yield of maize. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 21(4) : 692-695.
- Adéchina O., Ouattara A. & N'Ganzoua K.R. (2018). Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols savanicoles le long de toposéquences à Gogbala dans le Nord de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25(1) : 437-445.
- AFNOR (1999). La qualité des sols ; normes NF X 31 et Normes ISO. *Essai Proctor normal*, 2 : 408-566.
- Adou B.Y.C. (2019). Effet des technologies de récolte du latex sur la production de caoutchouc de l'hévéa [*Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae)] et contribution du micro diagnostic latex à la gestion moderne des plantations hévéicoles en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Sciences de la Nature, Université Nangui Abrogoua. (Abidjan, Côte d'Ivoire), 220 p.
- Agnimel A.C. (2009). Utilisation de la variabilité génétique pour la valorisation du bois d'hévéa. Mémoire de fin d'études Cycle Ingénieur, ENSA, INPHB (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 56 p.
- Ahoba A. (2011). Évaluation de quelques caractéristiques dendrométriques de trois clones d'*Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (PR 107, PB 86, GT 1). *Agronomie Africaine*, 23(3) : 227 – 236.
- Ahoussi K.E., Koffi Y.B., Kouassi A.M., Soro G., Soro N. & Biémi J. (2012). Etude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'Zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(4) : 1854-1873.
- Ake G., Kouame K., Koffi A. & Jourda J. (2018). Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 31(2), 129-144.

- Akpo L.E., Masse D., & Grouzis M. (2002). Durée de jachère et valeur pastorale de la végétation herbacée en zone soudanienne au Sénégal. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 55(4), 275-283.
- Akmel M.S. (2018). Enjeux socio-économiques de l'hévéaculture et risque d'insécurité alimentaire en pays Odjukru dans la région de Dabou (Côte d'Ivoire). *Tropicultura*, 36(2) : 443-450.
- Allé J.Y., Dick E.A., Soumahin E.F., Gabla R.O., Keli J.Z. & Obouayeba S. (2015). Effect of mineral fertilization on agrophysiological parameters and economic viability of clone PB 235 of *Hevea brasiliensis* in the region of GO in south western Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 24(2) : 3768-3780.
- Allé Y.J. (2016). Evaluation de l'effet de la fertilisation minérale sur les propriétés physiques et chimiques du sol et les paramètres agro physiologiques pour une productivité rentable du clone pb 235 de *hevea brasiliensis* muell. arg. (Euphorbiaceae) au sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 198p.
- Alloway B.J. (1995). Processus du sol et comportement des métaux. *Métaux lourds dans les sols*, 13 : 3488.
- Alongo S. & Kambele F. (2013). Évolution de la densité apparente et du rapport c/n du sol sous les variétés exotiques et locale de manioc dans les conditions naturelles de Kisangani (R.D.Congo). *Annales de l'Institut Facultaires des sciences agronomiques de Yangambi*, 1 : 197-214.
- ANADER. (2014). Rapport de monographie. Document interne. ANADER Man, (Côte d'Ivoire), 23 p.
- Anatole B.G., Frédéric K.K., & Maxime B.N.T.K. (2017). Culture de l'igname au Centre-Est de la Côte d'Ivoire : contraintes, caractéristiques sociodémographiques et agronomiques. *Journal of Applied Biosciences*, 110, 10701-10713.
- Anderson J.M. & Ingram J.S.I. (1993). Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. CAB International, *Soil Science*, 157(4) : 265-280.

Références bibliographiques

- Andriyana Y., Thaler P., Chiarawipa R. & Sopharat J. (2020). Effet à la ferme de la culture intercalaire de bambous sur la teneur en eau du sol et la distribution des racines dans les plantations d'hévéas. *Forêts, arbres et moyens de subsistance*, 29 (4) : 205-221.
- ANRPC. (2023). The Association of Natural Rubber Producing Countries. Annual report. (Indonésie), 47 p.
- APROMAC. (2023). Production de caoutchouc en Côte d'Ivoire. www.Apromac.ci. Consulté le 11 Mai 2023.
- Ashwell G. (1957). Colorimetric analysis of sugar. *Methods Enzymol.* 3 : 73-105.
- Assa A. (1976). Phénomène de sélectivité d'échange cationique dans certains minéraux argileux : 1. Sélectivité du potassium dans le système K-Ca. *Cahier ORSTOM Série Pédologique*, 14(13) : 219-226.
- Assa A. (2005). Précis de pédologie. Collection Sciences. Editions Universitaire de Côte d'Ivoire. Université de Cocody-Abidjan, (Côte d'Ivoire), 100 p.
- Assi E.M., Dogbo O.D., Kassin E., Assiri A.A., Tahy G.M., Guiraud B., & Kone B. (2018). Détermination de l'âge optimal en pépinière des plants de cacaoyer pour une meilleure réussite au champ. *Journal africain des sciences des cultures*, 26 (4), 491-501.
- Assié H.K., Angui P.K.T., Danho M.D., Tamia Jocéphyne T.A. & Savané I. (2012). Effets des contraintes morpho-pédologiques sur quelques propriétés hydrodynamiques des sols sous différents agrosystèmes au (Oumé) Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 34 : 2145-2155.
- Avit J.B.L.F., Pedia P.L. & Sankaré Y. (1999). Diversité Biologique de la Côte d'Ivoire. Stratégie et Plan d'Action sur la Diversité Biologique, Edition Ivoirienne, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 273 p.
- Bado B.V. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudaniennes du Burkina Faso. Thèse de Doctorat - Département des sols et Environnement, Université Laval, (France). 148 p.

- Bahan F. (2016). Programme riz. Rapport annuel d'activités de recherche 2015, CNRA Man. Rapport de projet, CNRA, (Man, Côte d'Ivoire), 43 p.
- Bahan F., Kéli Z.J., Yao K.A., Gbakatchétché H., Mahyao A., Bouet A. & Camara M. (2012). Caractérisation des associations culturales à base de riz (*Oryza sp*) : cas du Centre-Ouest forestier de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 56 : 4118 – 4132.
- Baize D. (2000). Guide des analyses en pédologie, 2nd Edition INRA, (France), 257 P.
- Baize D. & Jabiol. (1995). Guide pour la description des sols. Edition INRA, (Paris, France), 1 : 375p.
- Ballo K.E. (2019). Effet de différentes techniques culturales sur les paramètres agrophysiologiques et sanitaires de l'hévéa (*hevea brasiliensis* muell. arg) au sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 208p.
- Banque mondiale. (2021). Fonds monétaire international Washington. Rapport du FMI n° 21/127. 117p.
- Banton O. & Bangoy L.M. (1997). Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines. *Presse de l'Université du Québec/AUPELF*, 1 : 61-69.
- Bationo A. & Buerkert A. (2000). Soil organic carbon management for sustainable land use in (Sudano-Sahelian West Africa). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 6 : 58-65.
- Beudou A.G. & Sayol R. (1980). Étude pédologique de la région de Boundiali-Korhogo (Côte d'Ivoire). Cartographie et typologie sommaire des sols. Feuille de Boundiali, feuille de Korhogo, à 1/ 200 000. *Travail et Document. ORSTOM*, 12 : 128-281.
- Boa D. (1987). Terminologie et caractérisation des gravillons ferrugineux (glébules) du bassin versant de Booro-Borotou (Région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), Document ORSTOM, (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire), 17 p.
- Boa D. (1988). Modélisation de la relation entre le taux pondéral et le taux volumique des sols gravillonnaires, Document ORSTOM, (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire), 21 p.

- Borah K.K., Bhuyan B. & Sarma H.P. (2010). Lead, arsenic, fluoride, and iron contamination of drinking water in the tea garden belt of Darrang district, Assam, India. *Environmental monitoring and assessment*, 169 : 347-352.
- Boyer J. (1982). Les sols ferrallitiques : facteurs de fertilité et utilisation des sols. Tome X, Initiation-Documentations Techniques n°52, ORSTOM, (Paris, France), 384 p.
- Boyne A.F. & Ellman G.I. (1972). A methodology for analysis of tissue sulphhydryl components. *Analytical Biochemistry*, 46 : 639-653.
- Brou K.M. (2017). Croissance urbaine et risques naturels en milieu de montagne : l'exemple de Man (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR Géographie, Université Félix Houphouët-Boigny. (Abidjan, Côte d'Ivoire), 258 p.
- Brou T. (2010). Variabilité climatique, déforestation et dynamique agrodémographique en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 21(4) : 327-329.
- Brussaard L., De Ruiter P.C. & Brown G.G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, ecosystems & environment*, 121(3) : 233-244.
- Camara M. (1989). Les systèmes de culture et leurs influences sur quelques propriétés physiques et hydrodynamiques du sol. Cas de Boro-Borotou, région de Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, UFR Sciences de la Terre, Université d'Abidjan, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 139 p.
- Camara M. (2019). Pratiques agricoles de la région montagneuse de la Côte d'Ivoire. Editions universitaires européennes. (Paris, France), 69p.
- Canh T.V. (1999). Recherche pour le secteur hévéicole en Côte d'Ivoire. *Plantation, Recherche, Développement*, 6 (2) : 102 – 105.
- Center G.G.F.M., Forma H.H.D., Radiometer M.M.R.I., Shapefile S.H.P., & Mercator U.U.T. (2021). Evaluation des superficies forestières brûlées de 2001 à 2019 dans le département de Toumodi, au centre de la Côte d'Ivoire. *Revue AFN Maroc N*, 29, 30p.
- Chandrakala M., Srinivasan R., Kumar K.A., Sujatha K., Hegde R. & Singh S.K. (2019). Évaluation de l'aptitude des terres pour le caoutchouc dans la région tropicale

- humide du Kerala, en Inde. *Journal actuel des sciences appliquées et de la technologie* 32(1) : 1-12.
- Chandrasekhar T.R. (1994). Corrélation et analyse de la trajectoire du rendement et de son composants, certains facteurs des relations hydriques et l'humidité du sol dans *Hevea brasiliensis*. *Journal indien de recherche sur le caoutchouc naturel*, 7(2) : 89-94.
- Chantuma P. & Thasanasakul P. (2018). Good agricultural practices (GAP) standards for rubber plantation and harvesting fresh latex from the field, International Rubber Conference (IRC) and IRRDB, Annual Meeting, 22th – 24th october 2018, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 6 p.
- Chaudhuri P.S., Bhattacharjee S., Dey A., Chattopadhyay S. & Bhattacharya D. (2013). Impact de l'âge des plantations d'hévéas (*Hevea brasiliensis*) sur les communautés de vers de terre du West Tripura (Inde). *Journal de biologie environnementale*, 2(1) : 51-59.
- Chotiphan R., Vaysse L., Lacote R., Gohet E., Thaler P., Sajjaphan K., Bottier C., Char C. & Liengprayoong S. Gay F. (2019). La fertilisation peut-elle être un moteur de l'intensification des plantations d'hévéas ? *Cultures et produits industriels*, 1(4) : 791-813.
- Chrestin H. (1985). La stimulation à l'éthrel de l'hévéa ; jusqu' où ne pas aller trop loin. *Caoutchouc Plast*, 647/648 : 75-78.
- CIRAD. (1997). Le caoutchouc naturel. Salon international de l'agriculture 1997, Direction des relations extérieures, 23 février – 02 mars 1997, (Paris, France), 16 p.
- Cissé A., Ouattara M., N'guessan E. A. & Abrou J.E.N.G. (2020). Diversité végétale et usages des plantes dans une zone de savane soudanienne : Cas de la localité de Ferkessédougou (Nord, Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(8) : 2807-2825.
- Citeau L., Bispo A., Bardy M. & King D. (2008). Gestion durable des sols. *Edition Quae*. 8 : 1-320.
- CNRA (2015). Caractérisation agropédoclimatique des nouvelles zones hévéicoles des Côte d'Ivoire. Rapport final, 246 p.

- CNRA (2017). Station météorologique du CNRA Man (pluviométrie 2016). Document interne, (Man, Côte d'Ivoire), 12 p.
- CNRA. (2021). Direction régionale de Bouaké. Station météorologique du CNRA (pluviométrie 1990-2020). Document interne. (Bouaké, Côte d'Ivoire), 12 p.
- Compagnon P. (1986). Le caoutchouc naturel Biologie-Culture-Production. Edition. G.P. Maisonneuve & Larose. (Paris, France), 595p.
- Coulibaly B., Konan D., Traoré S. & Obouayeba S. (2022). Evaluation de la capacité de séquestration de carbone par une plantation d'hévéa. Rapport final Projet CNRA, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 59p.
- CPCS. (1967). Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, Laboratoire des Geologie-Pédologie ENSA Grignon. Mimeo, (Paris, France), 96p.
- D'Auzac J. (1988). Mise au point du diagnostic latex. *Agritop*, 12: 97-118.
- Dago A. (1970). Étude pédologique du périmètre Nord de San-Pédro. Rapport de stage, Document ORSTOM, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 87 p.
- Dea G.B., Boa D., Keli Z.J., Assiri A.A., Gabla O.R., Leconte A. & Doumbia A. (1998). Sous-solage et croissance de l'hévéa dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire. CIRAD. (Montpellier, France), 57 p.
- Devakumar A.S., Rao G.G., Rajagopal R., Rao P.S., George M.J., Vijayakumar K.R. & Sethuraj M.R. (1988). Études sur le système sol-plante-atmosphère dans Hévéa : II. Effets saisonniers sur les relations hydriques et le rendement. *Journal indien de recherche sur le caoutchouc naturel*, 1(2) : 45-60.
- Dick E.A., Traoré M.S., Elabo A.E.A., Soumahin E.F., Assi E.G.M., Atsin O.G.J., Alle Y.J., N'guessan A.E.B., Kouamé C. & Obouayeba S. (2014). Effets de différentes fréquences annuelles de stimulation éthylénique sur les paramètres agrophysiologiques et de sensibilité à l'encoche sèche d'*Hevea brasiliensis* au Sud-Est de la Côte d'Ivoire : cas des clones PB 235 et PB 260 de la classe d'activité rapide. *International Journal of Biology and Chemistry Sciences*. 8(3) : 956-974.

- Diomandé L.B., Soro S., Koné D. & Adingra K.D.P. (2021). Diagnostic de la fertilité chimique des sols sous anacarderaies (*Anacardium occidentale L.*) dans le département de (Korhogo au nord de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 53(1) : 50-60.
- Disnar J.R. & Bruand A. (2007). La matière organique des sols (MOS): un héritage difficile mais fructueux. *Géochronique*, 104 : 20-21.
- Doucet R. (2006). Le climat et les sols agricoles. Edition Berger, Eastman, (Québec, Canada), 443 p.
- Duchaufour P. (1997). Abrégé de Pédologie. Sol, végétation, environnement. 5 édition, Masson, (Paris, France), 291 p.
- Ducroquet H., Tillie P., Louhichi K. & Gomez-Y-Paloma S. (2017). L'agriculture de la Côte d'Ivoire à la loupe. Etat des lieux des filières de production végétales et animales et revue des politiques agricoles. *Joint Research Centre (JRC)*, 12 : 58-63.
- Dusotoit C. A. (2009). Caractérisations physiologique et moléculaire des transporteurs de sucres et de polyols des cellules laticifères chez *Hevea brasiliensis*, en relation avec la production de latex. Thèse de Doctorat en Physiologie et Biologie Moléculaire Végétale, Université Blaise Pascal (Montpellier, France), 346 p.
- El Zein D., Ferro C., Wang C., Notteau M. & Bakayoko Y. (2011). Géopolitique de la Côte d'Ivoire. *Mutagenis*, 26(1) : 1-240.
- Elabo A., Yao G.F., Obouayeba S. & Esmel J.M. (2022). Adaptation des clones en zones marginales : valorisation des jachères de l'ancienne boucle du cacao. Rapport final interne CNRA. (Abidjan, Côte d'Ivoire), 57p.
- Eldin M. (1971). Le climat. In : le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, n°50, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 62p.
- Eponon E.C., Snoeck D., Kassin K.E., Keli J.Z. & Kone D. (2017). Diagnostic agronomique des pratiques culturelles paysannes dans les vergers caféiers de Côte d'Ivoire. *Cahier Agriculture*, 26, 45007.

- Eponon E.C, Snoeck D., Konaté Z., Kassin K.E., Camara M., Legnaté H. & Koné D. (2019). Caractérisation de la fertilité des sols dans les zones de production de Café (*Coffea spp.*) en (Côte d'Ivoire). *Journal de recherche des sciences agricoles et forestières*, 7 (2) : 15-24.
- Epron D., Ngao J., Dannoura M., Bakker M.R., Zeller B., Bazot S. & Loustau D. (2011). Variations saisonnières du transfert de carbone souterrain évaluées par marquage in situ des impulsions de ^{13}C des arbres. *Biogéosciences*, 8 (5) : 1153-1168.
- Eschbach J.M. & Tonnelier M. (1984). Influence de la méthode de stimulation, de la concentration du stimulant et de la fréquence de son application sur la production du clone GT 1 en Côte d'Ivoire. C.R. Collection. Exploitation. Physiologie. Amélioration. Hévéa, IRCA-CIRAD, édition. (Montpellier, France), 295–306.
- Eschenbrenner V. & Badarello L. (1978). Étude pédologique de la région d'Odienné. Feuille d'Odienné. Notice explicative n°74, ORSTOM, (Paris, France), 123 p.
- Esséhi J.L. (2019). Valorisation agronomique des déchets de ferme par compostage pour l'amélioration de la croissance végétative en pépinière en sac de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières. Université Félix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire). 234p.
- Ettien D.J., Akotto O.F. & Bouadou O.B.F. (2022). Potentialités agronomiques des sols en zone de pression foncière dans la localité d'Azaguié sud-est de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 34(1) : 81-89.
- FAO. (2003). Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. FAO Fiat Panis, (Rome, Italie), 55 p.
- Feller C., Albrecht A., Blanchart E., Cadiboche Y. M., Chevallier T., Eschenbrenner V., Hartmann C., Larré-Larrouy M. C. & N'Dandou J. F. (2001). Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61 : 19-31.
- FIRCA. (2008). Manuel du planteur d'hévéa. FIRCA/APROMAC, Rapport interne, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 48 p.

- Foidl N., Harinder P.S., Markar N. & Klaus B. (2001). The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and Industrial uses. In: *The Miracle Tree*. Lowell Fuglie (Edition), (Dakar, Senegal) : 45-76.
- Gay F., Brauman A., Chotiphan R., Gohet E., Laclau J., Lienprayoon S., Mareschal L., Malagoli P., Thoumazeau A., Nouvellon Y., Suvannang N., Thaler P. & Perron T. (2021). Managing soil quality to improve sustainability of rubber plantations, what do we know ? *CGIAR*, 2(4) : 42-45.
- George P.J. & Kuruvilla J.C. (2000). Natural rubber - Agromanagement and crop processing density on growth and yield productivity of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. Clone 235. *Journal Rubber Research*. 8 (4) : 257- 270.
- GEPPA. (1981). Groupement d'Etude de Problèmes en Pédologie Appliquée. Synthèse des travaux de la commission de cartographie. 2nd Edition IRD, (Paris, France), 102p.
- Gigou J. (1992). L'azote dans les systèmes de culture du nord et du centre de la Côte d'Ivoire. John Wiley. CIRAD-CA. (Paris, France), 87p.
- Gilot C., Lavelle P., Blanchart E., Kéli Z.J., Kouassi P. & Guillaume G. (1993). Biological activity of soil under rubber plantations in Côte d'Ivoire. In : XI International Colloquium on Soil Zoology, Jyväskylä, Finland, 10 – 14 August, 1992, Acta Zool. Fennica 196, (Helsinki, Finland), pp 186–189.
- Girard M.C., Walter C., Rémy J.L., Berthelein J. & Morel J.L. (2005). Sols et environnement. Cours, exercices et étude de cas. Sciences Sup, Dunod, Paris (France), 816p.
- Gnagne M.Y., Clément-Demange A., Legnaté H., Chapuset T. & Nicolas, D. (1998). Résultats du programme de sélection de l'hévéa en Côte d'Ivoire. *Conférence internationale IRRDB*. 15-19 Decembre 1998, (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 46p.
- Gnagne M.Y., Koffi K.E. & Assiri A.A. (2002). Analyse écosystémique de l'utilisation de l'hévéa dans les zones marginales de la Côte d'Ivoire. *Conférence internationale sur l'avenir des cultures pérennes*, (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 5-9 Novembre 2001, 552-602.

- Gnagne Y.M., Elabo A.E., Wahounou P.J. & Obouayeba S. (2016) Facteurs de marginalité à l'hévéaculture dans l'ancienne boucle du cacao, au centre-est de la Côte d'Ivoire. *Atelier regional de International Rubber Research and Development Board (IRRDB) 2016* (Livre des résumés), 28-30 Septembre 2016, (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 24-25.
- Greenpeace (2011). Acheter Amical de la forêt et Conseil de gestion de la Forêt. 4 p. Ressource en ligne, Disponible sur <http://www.greenpeace.org/newzealand/campaigns/ancientforests/action/buy-forest-friendly>. Consulté le 24-12-2021
- Hallé F. & Martin R. (1968). Etude de la croissance rythmique chez l'Hévéa (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg. Euphorbiacées). *Adansonia* 8 : 475-503.
- Harter R. D. (2007). Les sols acides des tropiques. Echo Technique, North Fort Myers, USA, 12 p.
- Henin S. (1976). Cours de physique du sol. Tomes I et II. ORSTOM, *Initiations et Documentations techniques*, 28 : 1-222.
- Hinsinger P., Ndeye Y., Becquer T., Chapuis-Lardy L. & Masse D. (2015). Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux, UMR Eco & Sols, SupAgro-CIRAD-INRA-IRD. (Montpellier, France) 64 p.
- Houphouët J.C., Koffi S.Y. & Assi-Kaudjhis J.P. (2017). Impacts environnementaux de l'hévéaculture dans le département d'aboisso, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 13(29) : 1857 – 7881.
- Humbel F.X. (1976). The soils and the measuring methods. The lateritic soils in Cameroon. Travaux et Documents de l'ORSTOM (no. 54), (France), 62 p.
- Humbel F.X. (1974). La compacité des sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, 12 : 73-101.
- Hurst J.M.; Allen R.B.; Coomes D.A. & Duncan R.P. (2011). Size-specific tree mortality varies with neighbourhood crowding and disturbance in a montane *Nothofagus* forest. *PLoS ONE* 6, e26670. *édition LavoisierTEC&DOC*, (Paris, France), 449 p.
- IRD. (2005). La nécrose de l'hévéa enfin élucidée. *Fiches scientifique*, 221 : 5-9.

- Jacob J.L., Prévôt J.C., Lacrotte R. & Eschbach J.M. (1995). Le diagnostic latex. Fiche technique, CIRAD-CP, (Montpellier, France), 5 p.
- Jacob J.L., Prévôt J.C., Lacote R., Gohet E., Clément A., Gallois R., Joet T., Pujad-Renaud V. & d'Auzac J. (1998). Les mécanismes biologiques de la production de caoutchouc par *Hevea brasiliensis*. *Platation Recherche Développement*, 7 : 5-13.
- Jacob J.L., Serres E., Prévot J.C., Lacrotte R., Vidal A., Eschbach J.M. & D'auzac J. (1988). Mise au point du diagnostic latex chez l'hévéa. *Agritrop*, 12(12) : 97-118.
- Jagoret P. & Jadin P. (1993). Recherche d'un itinéraire technique pour la replantation des cacaoyères au togo iv. Contribution à une meilleure approche pédologique de la replantation des cacaoyères. *Café Cacao Thé*, 37(4) :313-320.
- Jamagne M. (1967). Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Annual Agronomy*. 18 : 1-142.
- Jessy M.D. (2021). Améliorer la biodiversité dans les plantations d'hévéas : une stratégie à faible coût pour maintenir la santé des sols et atténuer la sécheresse, *Journal of African Earth Sciences*. 8(2) : 58-59.
- Jeyanny V. (2022). Fertiliser use in malaysian forest plantations—trends of the past and strategies for the future. *Journal of Tropical Forest Science*, 34(4) : 426-438.
- Jobbe-Duval B., Keli Z.J., Serres E., Omont H. & Eschbach J.M. (1988). Influence du milieu sur la maladie physiologique des encoches sèches de l'hévéa. Communication au 7ème colloque pour l'optimisation de la nutrition des plantes, (Nyborg, Danemark), 11 p.
- Kadio E., Coulibaly Y., Allialy M.E., Kouamelan A.N. & Pothin K. (2010). On the occurrence of gold mineralizations in southeastern Ivory Coast. *Journal of African Earth Sciences*, 57(5) : 423-430.
- Kadir A.B., Gitz V., Gohet E., Jacob J., Nair L., Pinizzotto S., Nghia N.A., Blagodatsky S., Brady M., Cerutti P., Chen B., Duchelle A., Fairuzah Z., Febbiyanti T.R. & Gay F. (2022). Contribution du caoutchouc naturel à l'atténuation du changement climatique. XV world forestry congress. Building a Green, Healthy and Resilient Future with Forests. 2-6 Mai 2022. Coex, Seoul, Republic of Korea, 19 p.

- Kambiré S.H., Sanou J. & Sankara C. (2007). Effets de la rotation et de l'association culturales Maïs-Pois d'angole sur l'amélioration des rendements du maïs en zone de savane du Burkina Faso. *Production in West and Central Africa*, 4(2) : 401-422.
- Kangah P.A.D. & Bi Z.K. (2019). Variabilité climatique dans le centre-est de la côte d'ivoire: indicateurs, scénarii actuels et futurs. *Plantations, Recherches, Développement*, 3(1) : 1–21.
- Kassin K.E., Koko L., N'goran K.E., Yao-Kouame A. & Yoro G.R. (2012). Sols favorables à la cacaoculture au centre-ouest de la Côte d'Ivoire dans un contexte d'assèchement climatique. *Journal international des sciences biologiques et chimiques*, 6 (3) : 1148-1157.
- Keita S.M., Vincent C., Schmit J.P., Ramaswamy S. & Bélanger A. (2000). Effect of various essential oils on *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of stored products Research*, 36(4) : 355-364.
- Kéli Z.J., Kpolo D.M., Déa G.B., Boa D. & Allet-Don A. (1997). L'hévéaculture en Côte d'Ivoire : Situation actuelle et perspectives. *Plantations, Recherches, Développement*, 4(1) : 5–11.
- Kéli Z.J., Omont H. & Hainnaux G. (1990). L'association temporaire hévéas-vivriers dans le Sud de la Côte d'Ivoire. *Révue Générale des Caoutchoucs et Plastiques*, 701 : 121-187.
- Kéli Z.J., Omont H., Assiri A.A., Boko K.A.M-C., Obouayeba S., Déa B.G. & Doumbia A. (2005). Associations culturales à base d'hévéa : bilan de 20 années d'expérimentations en Côte d'Ivoire ; partie I : comportement végétatif ; *Agronomie africaine*, 17(1) : 37-52.
- Kéli Z.J., Yoro G., Kouassi P., Martin A., Gilot C., Blanchard E., Olivier R., Eschbach J.M. & Leterme P. (1993). Caractérisation physique, chimique et biologique de sols observés sous plantations d'hévéas d'âges différents et sous forêt dans deux zones écologiques différentes de Côte d'Ivoire. Rapport IRCA-DEA n° 36/93 – T, 9 p.
- Kéli Z.J. (1988). Enquêtes préliminaires sur les systèmes vivriers dans trois zones hévéicoles de basse Côte d'Ivoire : Anguédédou, Dabou, Bouna. *Les cahiers de la recherche Développement*, 18 : 38-47.
- Kéli Z.J. (2003). Programme de deuxième génération. Commission : Cultures d'exportation. Document de travail CNRA, Côte d'Ivoire, 139 p.

Références bibliographiques

- Kissou R., Traoré E., Gnankambary Z., Nacro H. & Sédogo M. (2014). Connaissance endogène de la classification et de la fertilité des sols en zone Sud-Soudanienne du Burkina Faso. *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement*, 14(1) : 440-451.
- Koffie-Bikpo C.Y. (2016). Industrialisation, désindustrialisation et tentative de ré-industrialisation à Sérébou: aspects géographiques. *Pour*, (1), 201-213.
- 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-Pédro. Thèse Unique de Doctorat, UFR Sciences de la Terre, Université de Cocody-Abidjan, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 119 p.
- Koko L.K., Yoro R.G., N'Goran K. & Assa A. (2009). Evaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 20(1) : 81-95.
- Konan A., Boko K.A.M.C. & Attobra A. (2016). Mise à disposition de matériel végétal de qualité aux planteurs d'hévéa de Côte d'Ivoire : expérience de l'APROMAC. Atelier regional de International Rubber Research and Development Board (IRRDB) 2016 (Livre des résumés), 28-30 Septembre 2016, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, pp 63-64.
- Koné B. (2007). Couleur comme indicateur de la fertilité des sols : utilisation des données pour l'étude de la fertilité potentielle des sols ferrallitiques au-dessus de la latitude 7°N de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat, UFR Sciences de la Terre, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire), 146 p.
- Koné B., Diatta S., Sylvester O., Yoro G., Mameri C., Desire D.D. & Ayemou A. (2009). Estimation de la fertilité potentielle des ferralsols par la couleur. *Revue canadienne des sciences du sol*, 89(3) : 331-342.
- Kouadio N.J. (2016). Influence des adventices majeures sur la production de *Zea mays* à M'Bahiakro (Centre-Est) de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 160p.
- Kouadio Y.D.M. (2021). Caractérisation des systèmes de production impliquant l'hévéa dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire : Etude de l'association permanente hévéa (*Hevea brasiliensis*

- Muell. Arg.) – Caféier (*Coffea canephora* Pierre ex. Froehner). Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, (Daloa, Côte d'Ivoire), 187p.
- Kouakou N.K.P., Moro A.P., Diarrassouba M., Lehi I.M., Konan D., Koffi A., Kouakou T.H & Obouayeba S. (2021). Effect of Late Upward Tapping on the Productivity of the Metabolically Active *Hevea brasiliensis* Clone PB 260 in Southwestern Côte d'Ivoire. *Annual Research & Review in Biology*, 36(10) : 107-117.
- Kouassi B.S.T. (2018). Défis de politique, de développement et de durabilité du caoutchouc naturel en Côte d'Ivoire, International Rubber Conference and IRRDB Annual Meeting, 22-24 October 2018, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 16 p.
- Kouassi Y.F., Angui K.T.P & Savane I. (2010). Influence de quelques fractions d'éléments grossiers sur l'humidité du sol à la capacité au champ sous culture intensive au sud de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne Sciences et Technologies*. 8(2) : 127–138.
- Kuttimani R., Velayudham K., Somasundaram E. & Jothi N.J. (2013). Effect of integrated nutrient management on corm and root growth and physiological parameters of banana. *International Journal of Advance and Research*, 1 : 46-55.
- Lacrotte R. (1991). Etude des relations entre la teneur en sucres du latex et la production : approche des mécanismes du chargement en saccharose des laticifères d'*Hevea brasiliensis* Muell. Arg. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, (Montpellier, France), 266 p.
- Laroche B. (1997). Détermination et représentation cartographique de la capacité de stockage en eau des sols des localités de la Côte d'Or, 2nd Edition INRA, (Paris, France), 71 p.
- Lévêque C., Dejoux C. & Iltis A. (1983). Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire. *Hydrobiologia*, 100 : 113-141.
- Lines E.R., Coomes D.A. & Purves D.W. (2010). Influences de la structure forestière, du climat et de la composition des espèces sur la mortalité des arbres dans l'est des États-Unis. *PloS one* , 5(10) : 132-142.

- Maeght J.L. (2014). L'influence de la variabilité climatique sur l'enracinement superficiel et profond d'arbres adultes en plantation : les cas de l'hévéa (*Hevea brasiliensis*) et du teck (*Tectona grandis*) sous contraintes hydriques en Asie du sud-est Biologie végétale. Thèse de Doctorat, UFR Sciences et Techniques du Languedoc, Université de (Montpellier, France), 203p.
- Mahyao G.A., Assi E., Kouame B., Guiraud B.H., N'Guessan W.P., Coulibaly K., & Koffi C. (2022). Effets de scénarios de changements climatiques sur la cacaoculture en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 34(3), 457-468.
- Mbonigaba J.J.M., Nzeyimana I., Bucagu C. & Culot M. (2009). Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnology Agronomy and Social Environment*, 13(4) : 545-558.
- McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- Michels T. (2005). Adapter la conduite des plantations d'hévéa à la diversité des exploitations villageoises : étude de cas au Cameroun. Thèse de Doctorat : Unité Agronomie, Institut national agronomique Paris-Grignon, (Paris, France), 302 p.
- MINAGRI (2003) : Etude relative à l'élaboration d'un plan de développement de l'irrigation : bilan diagnostique du potentiel, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 52p.
- Mohammad A. & Flowers T.H. (2004). Evaluation of Kjeldahl digestion method. *Journal of Research Science*, 15 : 159-179.
- Moreau R. (2001). Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux, Rapport d'activité OSRTOM, (Montpellier, France), 12p.
- Moro A.P., Kouakou N.K.P., Atsin G.J.O., Diarassouba M., Lehi M.I., Koffi A., Kouakou T.H. & Obouayeba S. (2022). Determination of the Execution Time of Upward Tapping Allowing a Good Performance of Agrophysiological Parameters in Downward Tapping of Fast Metabolizing Rubber Clones PB 260 and IRCA 18. *Journal of Scientific Research & Reports* 28(8) : 1-12.

- N'guessan K.A., Diarrassouba N., Alui K.A., Nangha K.Y., Fofana I.J. & Yao-Kouamé A. (2015). Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire : cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science*, 11(3) : 115–128.
- Nangah K.Y. (2013). Caractérisation pédologique et distribution des éléments traces métalliques dans les sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Sciences de la Nature, Université Nangui Abrogoua, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 186p.
- Nangah K.Y., Yao-Kouamé A., Yao G.F., Kouakou Y.K.N., Alui K.A. & Savane I. (2012). Attributs physico-chimiques et contrainte à la productivité agricole des sols du site manganésifère de Lauzoua (Guitry) en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*. 50 : 3459–3467.
- Ndoutoumou P.N., Ovono O.P., Azi O.A.S., Mouketou A.M., Omeme O.V. & Nkodo F. (2016). Incidence des fluctuations climatiques sur la production de l'hévéa (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) dans la zone côtière du Cameroun. *Afrique Science*, 12(1) : 345-356.
- Nestor K.Y.K., Fernand Y.G., Yves N.K., Derving B., Achille A. & Yao-Kouame A. (2013). Caracteres macromorphologiques des sols developpes sur fonds volcano-sedimentaire au blafo-gueto (Toumodi) dans le centre-sud de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 9(9) : 8-30.
- N'Guessan K.A., Diarrassouba N., Alui K.A., Nangha K.Y., Fofana I.J. & Yao-Kouame. A. (2015). Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire : cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologies* , 11(3) : 115-128.
- Niamke K.H., Saley M.B., N'dri B.E., Ouattara A. & Biemi J. (2008). Contribution à l'interprétation des linéaments par l'exploitation des Pseudo Images, de l'hydrographie en région tropicale humide: Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 24(1) : 74-93.

- Obouayeba S. (1992). Intérêt agro-économique de l'association hévéas - cultures vivrières en milieu villageois de la Côte d'Ivoire : analyse d'un modèle de plantation. *Agronomie Africaine*, 4(1) : 21–23.
- Obouayeba S. (2005). Contribution à la détermination de la maturité physiologique de l'écorce pour la mise en saignée d'*Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae): Norme d'ouverture. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université de Cocody. (Abidjan, Côte d'Ivoire), 225p.
- Obouayeba S., Boa D. Aké S. & Lacrotte R. (2002). Influence of age and girth at opening on growth and productivity of Hevea. *Indian Journal of Rubber Research*, 15 (1) : 38-45.
- Obouayeba S., Boko M.C.A., Soumahin E.F., Elabo A.A.E., Dea G.B., Badou E.A., Obouayeba S., Dian K., Boko A.M.C., Gnagne Y.M. & Ake S. (2006). Effect of planting decay associated with *Verticillium sp.* And *Fomes sp.* Within reforestation areas in Côte d'Ivoire. *Journal of Tropical Forest Science*, 29(3) : 363–370.
- Obouayeba S., Soumahin E.F., Dobo M., Lacote R., Gabla O.R. & Doumbia A. (2009). Performances agronomiques du clone IRCA 111 d'*Hevea brasiliensis* sous différentes fréquences de saignées et de stimulations dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Rubber Research*. 12(2) : 93-102.
- Obouayeba S., Diarrassouba M., Soumahin E.F., Essehi J.L., Okoma. M.K., Adou C.B.Y. & Obouayeba A.P. (2016). Latex Harvesting Technologies Adapted to Clones IRCA18, IRCA 111, IRCA 130, PB 235 and PB 260 of *Hevea brasiliensis* (Rubber Tree) of the Class to Active Metabolism in South-Western Côte d'Ivoire. *Journal of American Engineering Research International*. 9(4) :1-14.
- Ocho L.A. (1999). Valorisation de la graine d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) : Production, caractérisation physico-chimique de la graine d'hévéa et efficacité alimentaire du tourteau chez le poulet de chair et la pondeuse. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, UFR Biosciences, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 108 p.

- Okoma D.M.J., Koffi L.B., Kouadio E., Elabo A. & Obouayeba S. (2020). Valorisation des graines de caoutchouc par l'huile et la production d'aliments pour volailles en Côte d'Ivoire. *Fiche technique CNRA-HEVEA*, 4 p.
- Okoma K.M. (2008). Étude de la sensibilité au syndrome de l'encoche sèche chez *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (*Euphorbiaceae*). Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 160p.
- Okoma K.M., Dian K., Obouayeba S., Elabo A.A.E. & N'Guetta A.S.P. (2011). Seasonal variation of tapping panel dryness expression in rubber tree *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. in Côte d'Ivoire. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2(3) : 559-569.
- Okoma K.M., Dian K., Soumahin E.F. & Elabo A.A. (2016). Agricultural practices in Côte d'Ivoire and apparition and development of tapping panel dryness in *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. *International Journal of Current Agricultural Sciences*. 6(7) : 74-80.
- Olayossimi A. & Amidou O. (2018). Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques des sols savanicoles le long des toposéquences à Gogbala dans le Nord de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25(1) : 437-445.
- Omout H. (1982). Plantation d'hévéa en zone climatique marginale. *Revue Générale des Caoutchoucs et Plastiques*, 625 : 75-79.
- Ono I.M.M.Z., Endamane N., Eba F. & Minko D.M. (2021). Impacts de l'heveaculture (*Hevea brasiliensis*) sur les caractéristiques physico-chimiques des sols dans la Région de Kango (NW, Gabon). *Agronomie Africaine*, 33(2) : 133-148.
- Oro F.Z., Lallié H.D., Silué S., Sanouidi D., & Diallo H.A. (2020). Comparaison de l'effet du biostimulant Banzaï et de l'engrais sur la pourriture des cabosses du cacaoyer dans le département de Toumodi, Centre-Est de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal and Plant Sciences (JAPS)*, 45(1), 7822-7838.
- Ouattara T.V., Kassin K.E., Koko L.J., Tahé G.N., Assi M.E., Amari G. & Camara M. (2017). Effets des engrais organo-phosphorés sur la biodisponibilité du phosphore, l'absorption d'aluminium et le pH du sol sous cacaoyers dans la région de Divo en Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 118 : 11754-11767.

- Pagès L., Jordan M.O. & Chadeau J. (1991). Mise en place du système racinaire de jeunes pêcheurs (*Prunus persica* L. Batsch). 2^{ème} colloque international sur l'arbre, 1015/09/90. Dans: L'arbre. Biologie et développement. C. Edelin Ed. *Naturalia monspeliensa, nhs.* (Montpellier, France), pp 648-650.
- Pansu M. & Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. Springer-Verlag, (Montpellier, France), 993 p.
- Paul O.O., Held-Stéphane K., Daudet M.M. S., Pamphile N.N., Claire K. & Jacques D. (2018). Facteurs permettant d'améliorer la réussite au greffage des clones GT1 et PB217 d'*Hevea brasiliensis* (HBK) (Muell. Arg) dans les conditions climatiques du nord Gabon. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 35(3) : 5749-5762.
- Penot E. & Ollivier I. (2009). L'hévéa en association avec les cultures pérennes, fruitières ou forestières : quelques exemples en Asie, Afrique et Amérique latine. *Bois et Forêts des tropiques*, 301(3) : pp 67-82.
- Penot E. (2001). Stratégies paysannes et évolution des savoirs : l'hévéaculture agroforestière indonésienne. Thèse de Doctorat, Faculté des sciences économiques, Université Montpellier I, (Montpellier, France), 360 p.
- Penot E. (2016). Origine et évolution des déterminants d'une stratégie agroforestière... Comment développer l'agroforesterie ? Comment changer d'échelle ? *Agritrop*. 15 : 61p.
- Penot E., Chambon B. & Sainte Beuve J. (2021). Le rôle de l'agroforesterie à base d'hévéa dans les systèmes agricoles et son effet sur les ménages : Stratégies d'adaptation aux risques du changement climatiques ? pp 70-77.
- Perraud A. (1967). Sols ferrallitiques forestiers du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire (région de Sassandra). Mémoire de D.E.S. ORSTOM-Fast Université d'Abidjan, (Côte d'Ivoire), 46 p.
- Perraud A. (1971). Les sols de la Côte d'Ivoire. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, 50, (Paris, France) : 269-389.
- Perron T., Mareschal L., Laclau J., Deffontaines L., Deleporte P., Masson A., Cauchy T. & Gay F. (2021). Dynamique de la biomasse et de l'accumulation des nutriments dans les plantations

- d'hévéa (*Hevea brasiliensis*) établies sur deux types de sol : Implications pour la gestion des nutriments pendant la phase immature. *Industrial Crops and Products*, 159 :1130-1154.
- Poss R. (1982). Étude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire). *Feuille 11* : 73-108.
- Rao D.V. & Vijayakumar K.R. (2006). Volume de sol effectif basé sur recommandations : un enjeu important. *Rubber Research Institute of India*, 12(7) : 224–232.
- Rekha K., Jayashree R., Thomas V., Kumari J.P., Kala R.G., Sobha S. & Thulaseedharan A. (2002). In vitro fertilisation in *Hevea brasiliensis*: a preliminary investigation. In *Proceedings of the 15th Plantation Crops Symposium Placrosym XV, Mysore, India*, 10(13) : 239-245.
- René B.K., & Roland T.B.G.G. (2019). Dynamique des activités humaines et risques de destruction du patrimoine archéologique en Côte d'Ivoire: le cas des zones d'Issia et de Toumodi. *Revue Ivoirienne des Sciences Historiques*, (5), 8-24.
- Rezaei S.A. & Gilkes R.J. (2005). Les effets des attributs du paysage et de la végétation communauté sur les propriétés physiques du sol dans les parcours. *Géoderme*, 125 (1-2) : 145–154.
- RGPH. (2021). Recensement général de la population et de l'habitat. <https://www.plan.gouv.ci/assets/fichier/RGPH2021-RESULTATS-GLOBAUX-VF.pdf> consulté le 10/08/22 à 16h12.
- Ribeiro S. (2019). Rôle de la cassiicoline dans l'interaction compatible *Hevea brasiliensis* *Corynespora cassiicola* : vers la sélection assistée par effecteur : Biologie végétale. Thèse de Doctorat, Université Clermont Auvergne, (Clermont, France), 182p.
- Rodrigo V.H.L., Iqbal S.M.M. & Dharmakeerthi R.S. (2011). Potential for rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) Cultivation in the Eastern Province of Sri Lanka. *Journal of National Sciences Foundation Sri Lanka*, 39(4) : 403–411.
- Ruf F. (2012). L'adoption de l'hévéa en Côte d'Ivoire. Prix, mimétisme, changement écologique et social. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, 3(13) : 103-124.

- Sehgal J. (1996). Pédologie : Concepts et applications. Éditeurs Kalyani, (New Delhi, Etats Unies), 256p.
- Sékongo K. (2002). Recherche de corrélations entre les dégâts de vents et les caractéristiques clonales, les techniques culturales. Mémoire de fin d'études, Diplôme D'agronomie Approfondie (DAA), École Supérieure d'Agronomie (ESA), Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INPHB) (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 47 p.
- Selma R.M., Dalziza O., Celso J.M., Sonia M.S.S., Leclerc M. & Riddle C.W. (2014). Potential carbon sequestration In rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum, Agronomy Maringá*, 36(2) : 239-245.
- SODEFOR. (2014). Bilan d'activité 2013 et programme d'activité 2014, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 74p.
- Soltner D. (1992). Phytotechnie générale : les bases de la production végétale. 19e édition. 12p.
- Soro D., Traore K. & Kassi N.J. (2011). Variabilité des caractères morphologiques chez le karité (*Vitellaria paradoxa*), dans le Nord de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(3) : 56-62.
- Soro T.D, Dibi B., & Traoré A. (2021). Impact de la variabilité du climat sur la recharge de la nappe des aquifères fractures du département de man : (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, 33 (3), 371-382.
- Soumahin E.F. (2010). Optimisation des systèmes de récolte du latex en hévéaculture par la réduction des intensités de saignées. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Felix Houphouët Boigny, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210p.
- Taussky H.H. & Shorr E. (1953). A micro colorimetric method for the determination of inorganic phosphorus. *Journal of Biology and Chemistry*, 20 : 675 - 685.
- Thierry M. (2005). Adapter la conduite des plantations d'hévéa à la diversité des exploitations villageoises (Etude de cas au Cameroun). Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris, France), 302 p.

- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Decaens T., Bottinelli N., Jaillard B., Chevallier T., Suvannang N., Sajjaphan K., Thaler P., Gay F. & Brauman A. (2019). Biofuntool : Un nouveau cadre pour évaluer l'impact de la gestion des terres sur la qualité des sols. Partie A : concept et validation de l'ensemble des indicateurs. *Indicateurs écologiques*, 97 :100-10.
- Toguila T.B., N'diaye O.N. & Attobra A. (2016). Dispositif d'assistance technique pour le transfert de technologies aux planteurs d'hévéa en Côte d'Ivoire. Atelier régional de l'IRRDB, 28-30 septembre 2016, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 26 p.
- Toko I. & Sinsin B. (2011). Facteurs déterminant la variabilité spatiale de la biomasse herbacée dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *International Journal of Biology and Chemistry Sciences* 5(3) : 930-943.
- Traoré M.S. (2014). Effets de différentes fréquences annuelles de stimulation éthylénique sur les paramètres agrophysiologiques des clones d'*Hevea brasiliensis* müll. Arg. (*Euphorbiaceae*), PB 235, PB 260, GT 1 ET PB 217 cultivés au sud-est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët- Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 195 p.
- Van De Sype H., (1984). The dry cut syndroms of *Hevea brasiliensis*, evolution, agronomical and physiological aspects. *C. R. Coll.Expl. Physiol. Amél. Hévéa*. Ed. IRCA-CIRAD, Montpellier, France : 249–271.
- Vawa O.S.T., Yao K.A.P. & Djézou K. (2021). Évaluation de l'efficacité d'un atomiseur porté par quatre personnes dans la lutte contre la maladie de chute des feuilles causée par *Corynespora cassiicola* en plantation villageoise adulte d'hévéa en Côte d'ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 160(1) : 16454-16459.
- Viennot M. (1983). Étude pédologique de la région de Touba. Feuille de Touba à 1/200 000. ORSTOM, Paris, *notice explicative* n°98, 91 p.
- Vilain M. (1997). La production végétale. La maîtrise technique de la production, volume 2. 2ème édition Lavoisier TEC&DOC, 449 p.

- Voko B.D.R., Nandjui J., Séry D.J-M., Fotso B., Niamke S. & Zézé A. (2013). Abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities associated with cassava (*Manihot esculenta* CRANTZ) rhizosphere in Abengourou, East Côte d'Ivoire. *Journal of Environmental, Natural and Ecology*. 5 (11) : 360-370.
- Wahounou P.J., Mpika J., Kouadio J.M., Adiko A., Zakra N. & Tahouo O. (2013). Les maladies et les ravageurs de l'hévéa dans les zones de production en Côte d'Ivoire. CNRA-2013, Direction des Innovations et des systèmes d'information CNRA, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 54 p.
- Wahounou, P. J., Coulibaly, B., Gnonhour, G. P., & Adiko, A. (2017). Teak (*Tectona grandis*) decay associated with *Verticillium* sp. and *Fomes* sp. within reforestation areas in Côte d'Ivoire. *Journal of Tropical Forest Science*, 363-370.
- Webster R. & Olivier O. (1990). Statistical methods in soil and land resources survey. *Oxford University Press, Oxford, UK*. 3: 340-350.
- WRB. (2022). World Reference Base for soil of Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), (Vienna, Austria), 254p.
- Yacé I. (1982). Étude géologique du volcanisme Eburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fétékro, Imprimerie nationale, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 160 p.
- Yao N.R. & Goué B. (1992). Water use efficiency of cassava crop as affected by soil water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 61 : 187-203.
- Yao-Kouamé A. (2007). Caractéristiques physiques des sols brunifiés dérivés des formations du complexe volcano-sédimentaire de Kanhankro (Toumodi) en moyenne Côte d'Ivoire. *Sciences et Médecine, Revue CAMES-Série A*, 05 : 76–86.
- Yao-Kouamé A. (2008). Etude des sols brunifiés dérivés des matériaux du complexe volcano-sédimentaire de Toumodi en moyenne Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Sciences Naturelles, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 219 p.

- Yeboua K., Ballo K. & Dembélé O. (2008). Effet de restauration d'une jachère de courte durée a *chromolaena odorata* sur la structure du sol sous culture de palmiers à huile en Côte d'Ivoire. *BIOTERRE, Revue International Sciences de la Vie et de la Terre*, 8 : 20-28.
- Yoro G. & Godo G. (1983). Recherche sur les systèmes de culture à base manioc en milieu paysan dans le sud - est de la Côte d'Ivoire (Bonoua - Adiaké - Aboisso). Observations partielles sur les exploitations familiales de la région. Document ORSTOM (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire), 35 p.
- Yoro G. (1982). Études pédologiques et perspectives agricoles de la région de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). ORSTOM (Adiopodoumé, Côte d'Ivoire), 50 p.
- Yoro G. (1986). Cartographie régionale à 1/200 000 et cartographie d'un paysage à sommet cuirassé dans le Centre de la Côte d'Ivoire. Communication au séminaire régionale sur les latérites, Yaoundé (Cameroun), 21-27 janvier, 1986, 13 p.
- Yoro G. (1992). La méthode au sable : protocole et utilisation pratique. Note technique. Cahiers ORSTOM, série Pédologique, 27(2) : 365–372.
- Yoro G. (2001). Caractéristion morpho-pédologiques des parcelles paysannes dans la délégation régionale de l'ouest. CNRA-Dreg Gagnoa (programme café, cacao, cola) – projet BAD-Ouest. Rapport muligr. (Gagnoa, Côte d'Ivoire) 24p.
- Yoro G. (2004). Formation à la reconnaissance des sols à cacaoyers et aux techniques de régénération cacaoyère. Atelier de formation des techniciens supérieurs, projet STCP. CNRA, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 5 p.
- Yoro G. & Kassin K.E. (2004). Caractérisation morpho-pédologique des sols des cacaoyères dégradées de l'Est, du Sud-Est et du Sud de la Côte d'Ivoire. Rapport technique du projet STCP : Régénération cacaoyère, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 46 p.
- Zhang Y. (2018). Identification des gènes impliqués dans la production et la détoxification des espèces activées de l'oxygène chez *Hevea brasiliensis* et leur caractérisation dans le latex. Thèse de Doctorat, UFR Amélioration Génétique et Adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales, Ecole doctorale GAIA, Unité de Recherche, Université de Montpellier, (Montpellier, France). 144p.

Références bibliographiques

ANNEXES



Annexe 1 : Fiche d'enquête

FICHE D'ENQUÊTE : PLANTATIONS

Date: _____ Enquêteur: _____

Enquêté (Nom a statut): _____ Contact: _____

Ville _____ Localisation: _____ Immatriculation: _____

Propriétaire (Nom): _____ Contact: _____

-Nature de l'exploitation

P V	<input type="checkbox"/>	P M P H	<input type="checkbox"/>	P H I	<input type="checkbox"/>	J A M H	<input type="checkbox"/>
-----	--------------------------	---------	--------------------------	-------	--------------------------	---------	--------------------------

-Type de matériel végétal planté

Stumps Seedling Greffage sur seedling en champ Sacs non débourrés Clone Remplacements Sacs débourrés

-Mise en place

Mois/Année Superficie écartement interligne

-Production

Mensuelle Annuelle

-Antécédent cultural:	Jachère	<input type="checkbox"/>	Cacaoyère	<input type="checkbox"/>	Autres	<input type="text"/>
	Forêt	<input type="checkbox"/>	Caféière	<input type="checkbox"/>		

-Origine du matériel végétal utilisé:

Zone marginale	<input type="text"/>	Zone traditionnelle de culture	<input type="text"/>
----------------	----------------------	--------------------------------	----------------------

Durée et méthode conservation

-Fournisseur de plants:

Planteur (pépinière privée)	<input type="checkbox"/>	Pépiniériste privé	<input type="checkbox"/>	Société	<input type="checkbox"/>
-----------------------------	--------------------------	--------------------	--------------------------	---------	--------------------------

-Type de plantation

Culture stricte d'hévéa	<input type="checkbox"/>	Culture associée	<input type="text"/>
-------------------------	--------------------------	------------------	----------------------

-Entretien

	Bon	Passable	Mauvais
Rabattage des lignes et interlignes			
Égourmandage			
Remplacements plants			

-Fertilisation: Type d'engrais et doses d'application

	NPK	Urée	PCa ₃	KCl	Autres
Dose(g/a)					
Période					
Mode					

-Exploitation

Mois et année d'ouverture Nbr d'années de saignée Nbr d'arbres saignés:

Hauteur d'ouverture Alternance de panneaux

A1	A2	A3	A4	A5	A6

Systeme de saignée

Part	Nbr d'arbres Sgn	Fréquence	Direction
1			
2			
3			
4			

Mois non saignés

Lieu et durée formation du saigneur

Type de rémunération: Journée de travail Kg de c/c produit Aboussan

Primes: P Production P Qualité saignée P Ancienneté P Assiduité

ENQUÊTE : PLANTATIONS (suite)

-Stimulation

Fréquence de stimulation /semaine /mois /an

Nature de la pâte stimulante

	2,5%	5%	Saigneur	Planteur	Encadreur	Autre
Prêt à l'emploi						
Ethrel + H P						

concentration concentration Préparateur Préparateur

Mode préparation

Mode d'application

Sur encoche

Sur panneau

Autre

-Maladies détectées, stress et autres

Racine

Tronc

Feuilles

Termites

Casse due au vent

Déracinement

Encoche sèche

Autres

CONTRAINTES: (Mise en place, entretien, exploitation et commercialisation)

DOLEANCES

OBSERVATIONS
(enquêteur)

Signature du planteur ou de son représentant

Signature de l'enquêteur

Annexe 2 : unités cartographiques et des potentialités agronomiques**Tableau 1** : Représentativités des unités cartographiques (a) et de leurs potentialités agronomiques (b) dans le département de Man

UNITES CARTOGRAPHIQUES			POTENTIALITES AGRONOMIQUES		
CODE UC	SUPERFICIE (Ha)	%	CODE POTENTIALITES AGRONOMIQUES	SUPERFICIE (Ha)	%
1	7014,6	3,3	A	38493,1	18,4
18	23,2	0,0	B	59624,1	28,5
18.2a	35992,2	17,2	C	43106,4	20,6
19.2a	467,0	0,2	D	64668,9	30,9
2	76,4	0,0	HABITAT	3019,1	1,4
20	6888,2	3,3	ILE	1,5	0,0
22	19,3	0,0	EAU	557,5	0,3
23	955,2	0,5	TOTAL	209470,7	100
24	44557,9	21,3			
26	1874,8	0,9			
26b	393,0	0,2			
27	24234,3	11,6			
27b	5102,9	2,4			
3	222,0	0,1			
5	13422,0	6,4			
EAU	557,5	0,3			
G	58744,6	28,0			
HABITAT	3019,1	1,4			
ILE	1,5	0,0			
V	5905,0	2,8			
TOTAL	209470,7	100			

Tableau 2 : Représentativités des unités cartographiques (a) et de leurs potentialités agronomiques (b) dans le département de Toumodi

(a)

UNITES CARTOGRAPHIQUES		
CODE UC	SUPERFICIE (Ha) :	%
1	32,0	0,0
11	19870,1	7,4
12	2972,4	1,1
13	7979,5	3,0
15	3168,9	1,2
16	17611,8	6,5
16a	485,1	0,2
18	14117,1	5,2
18.2a	4316,6	1,6
18.2b	1294,4	0,5
19.2b	794,5	0,3
2	967,9	0,4
20	10592,5	3,9
20.2b	10208,3	3,8
22	5694,7	2,1
23	1628,3	0,6
24	12396,6	4,6
26	1756,8	0,7
26b	18113,0	6,7
27	6945,6	2,6
29	2437,1	0,9
3	544,0	0,2
30	7185,7	2,7
31	2379,1	0,9
4	4489,9	1,7
5	2179,8	0,8
8	867,9	0,3
8a	370,3	0,1
9	11787,5	4,4
9a	1260,6	0,5
EAU	724,5	0,3
G	52451,9	19,5
HABITAT	1619,2	0,6
ILE	106,3	0,0
LAC	476,9	0,2

(b)

POTENTIALITES AGRONOMIQUES		
CODE POTENTIALITES AGRONOMIQUES	SUPERFICIE (Ha) :	%
A	79298,8	29,5
B	32191,2	12,0
C	54884,2	20,4
D	99823,0	37,1
HABITAT	1619,2	0,6
ILE	106,3	0,0
EAU	1201,4	0,4
TOTAL	269124,0	100

S	36508,2	13,6
V	2789,1	1,0
TOTAL	269124,0	100

Tableau 3 : Représentativités des unités cartographiques (a) et de leurs potentialités agronomiques (b) dans le département de Prikro

(a)

UNITES CARTOGRAPHIQUES		
CODE UC	SUPERFICIE (Ha) :	%
11	19212,1	7,1
12	37284,1	13,8
13	114777,4	42,5
22	1821,0	0,7
26	3217,4	1,2
26a	21,3	0,0
27	7776,4	2,9
27a	225,7	0,1
29	638,9	0,2
30	3025,0	1,1
31	2377,1	0,9
EAU	885,2	0,3
G	3602,4	1,3
HABITAT	691,4	0,3
ILE	96,7	0,0
LAC	60,3	0,0
S	74187,9	27,5

(b)

POTENTIALITES AGRONOMIQUES		
CODE POTENTIALITES AGRONOMIQUES	SUPERFICIE (Ha)	%
A	126657,2	46,9
B	40309,1	14,9
C	19212,1	7,1
D	81988,5	30,4
HABITAT	691,4	0,3
ILE	96,7	0,0
EAU	945,6	0,4
TOTAL	269900,4	100

PUBLICATIONS



Publication 1

Koffi Antoine, Soro Dogniméton, Diomandé Métangbo, Konan Djézou, Essehi Jean Lopez and Obouayeba Samuel., (2021). Physico-chemical Characterization of the Soils of New Localities of Côte d'Ivoire: Case of the Departments of Man (West) and Toumodi (Centre). *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 7(2): 11-21, 2021; Article no.AJSSPN.65868ISSN: 2456-9682.



Physico-chemical Characterization of the Soils of New Heveicolate Localities of Côte d'Ivoire: Case of the Departments of Man (West) and Toumodi (Centre)

Koffi Antoine^{1*}, Soro Dogniméton¹, Diomandé Métangbo², Konan Djézou³,
Essehi Jean Lopez³ and Obouayeba Samuel³

¹UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon, Laboratoire Amélioration de la Production, Agricole, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

²Université Peleforo Gon Coulibaly, UFR des Sciences Biologiques, B. P. 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire.

³Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Station de Recherche de Bimbresso, 01 BP 1536 Abidjan 01, Côte d'Ivoire.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. Author KA designed the study, performed the statistical analysis, wrote the protocol and wrote the first draft of the manuscript. Authors SD and DM managed the analyses of the study. Authors KD, EJM and OS managed the literature searches. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/AJSSPN/2021/v7i230107

Editor(s):

(1) Dr. Pankaj Kumar, H. N. B. Garhwal Central University, India.

Reviewers:

(1) Shikha Thakur, Mumbai University, India.

(2) Anderson Alves Santos, Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais, Brazil.

Complete Peer review History: <http://www.sdiarticle4.com/review-history/65868>

Received 15 December 2020

Accepted 24 February 2021

Published 13 March 2021

Original Research Article

ABSTRACT

In order to assess the suitability of soils for rubber cultivation in the departments of Man and Toumodi, two new rubber-growing areas, a study was carried out to evaluate the physical, physico-chemical and chemical characteristics of soils under rubber trees (*Hevea brasiliensis*). The methodology used consisted of a physical description of twelve soil pits, coupled with chemical analyses of the soil samples taken. The pedological profiles carried out revealed that these soils belong mainly to the Ferralsol class with distinctive characteristics, except for those of Kimoukro (Toumodi) which belong to the Cambisol class. The Toumodi soils, of silty-clay-sandy texture, are

*Corresponding author: Email: antoinekoffi7@gmail.com;

provided with coarse elements (≥ 30 p.c) with good internal drainage in the surface horizons. More or less deep, depending on the topographical position, Toumodi soils are slightly acidic ($\text{pH} = 6$) and less supplied with nitrogen and exchangeable bases. The soils of Man, on the other hand, have a sandy-clay texture, with more than 30 p.c. of clay from the surface to the depths. The bulk density ($D_a = 1.6 \geq 1.5 \text{ g/cm}^3$) was higher for the soils of this locality compared to those of Toumodi ($D_a = 0.8 \leq 1 \text{ g/cm}^3$). The soils of Man, which are less rich in nitrogen and carbon, are more acidic ($\text{pH} = 5.4$). Exchangeable base contents and CEC are high, mainly in the upper surface horizons.

Keywords: *New rubber growing areas; physico-chemical characteristics; Hevea brasiliensis; Côte d'Ivoire.*

1. INTRODUCTION

Southern Côte d'Ivoire has always been the preferred area for the development of industrial crops [1]. Among these crops, the rubber tree (*Hevea brasiliensis*) was absent for a long time until 1956, when a sector of industrial plantations began [2,3]. According to [4], the first rubber plantations were developed in the Bonoua region in 1953 before spreading to other parts of Côte d'Ivoire. In 1956, experimental plantations were established near Dabou. After independence, the Ivorian state created a rubber estate with three plantations in 1966: Anguédou in the south-east, Bettié in the east and Cavally in the west [4]. Village rubber cultivation was introduced in 1968 on 100 ha [1]. The adoption of rubber trees by family farming through projects in the 1960s, 1980s and 1990s in Côte d'Ivoire can be analyzed as a process of innovation [5]. *Hevea* cultivation was for a long time confined below the 1500 mm isohyet [6]. From the 1990s onwards, the state and donors disengaged themselves for twenty years from the monitoring and financing of rubber cultivation. It was during this period that the farming community became more involved in rubber cultivation [5]. The growth in rubber production was impressive from this period onwards. From 100,000 tonnes in 2000 [5], Ivorian rubber production increased to 780,000 tonnes in 2019 [7]. The determining factors of this rubber boom in Côte d'Ivoire in the traditional production zones, which are favorable to rubber cultivation, are pedological and climatic. Indeed, these localities are subject to a transitional equatorial climate, characterized by an average annual rainfall of 1,710 mm [8]. This situation is an important condition for groundwater recharge [9]. Furthermore, the soil thickness in these areas is greater than 1.5 m, which allows optimal development of the taproots and improves the plant's water supply possibilities during the dry season [10]. In addition, these soils are rich in

phosphorus and organic matter and the pH varies between 5.5 and 6.0 [11].

However, rapid population growth, coupled with the high demand for agricultural land in the traditional area, is reducing the availability of arable land, which is sought after by farmers in general. Indeed, cash crops (rubber, oil palm, coconut, pineapple, etc.), most of which are perennial, and food crops are actively competing for arable land [12]. All these constraints have led actors in the rubber sector to encourage the creation of rubber plantations in so-called marginal areas. According to [13], the practice of sustainable agriculture implies an understanding of the relationship between cultivated plant population and soil quality. According to these authors, these two factors determine the efficiency and sustainability of the cultivation system. This therefore indicates that knowledge and control of the physico-chemical characteristics of the soil of a cropping plot is a prerequisite for good cultivation practice. With this in mind, this study was initiated to determine the physico-chemical characteristics of the soils of two new rubber-growing localities in Côte d'Ivoire, namely Man and Toumodi. The general objective of the study is to assess the suitability of the soils of these two departments for rubber tree cultivation. More specifically, the aim is to evaluate the physico-chemical characteristics of the soils on the one hand, and to identify the different types of soil on the other. All these parameters will make it possible to determine the suitability of these soils for rubber tree cultivation.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Environment

The study was conducted in the departments of Man in the west and Toumodi in the centre of Côte d'Ivoire (Fig. 1).

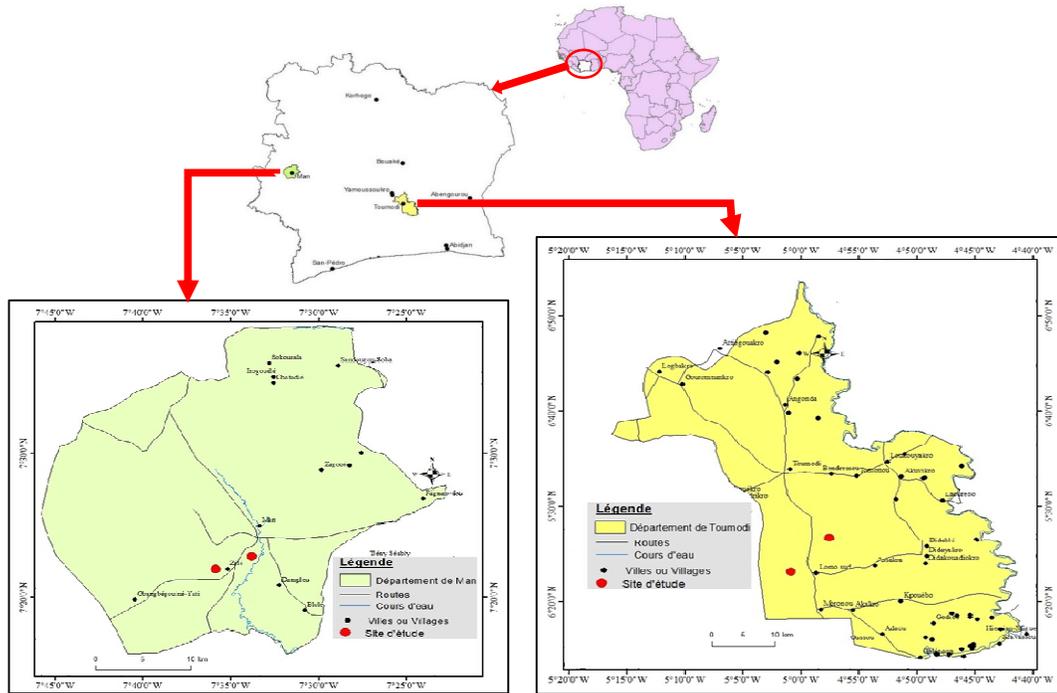


Fig. 1. Location of the departments of Man and Toumodi

The Department of Man is located between 7°20' and 7°30' North latitude and between 7°30' and 7°40' West longitude, in the administrative region of Tonkpi. Climatically, this semi-mountainous area of Man is distinguished from the rest of Côte d'Ivoire by its high rainfall, above 1,500 mm/year, and its very rugged relief [14]. The soils found in this locality are mainly Ferralsols [15].

The Toumodi department is located in the centre of Côte d'Ivoire, in the forest-savanna transition zone between 6°20' and 6°30' north latitude and between 4°55' and 5°10' west longitude. It is characterized by a transitional equatorial climate with two maxima and two minima [11,16]. The average annual rainfall is estimated at 1,200 mm, with an average temperature of 26°C and an average relative humidity of 77 p.c. [17]. The soils, quite varied, are classified among ferralitic soils (Ferralsols) moderately desaturated in bases, hydromorphic soils (Gleysols), tropical brown soils (Cambisols), etc.

2.2 Data Collection

Data collection focused on morpho-pedological and chemical characteristics. Data on the morpho-pedological characteristics of the soils

were collected in the field from soil pits on the selected plots with dimensions of 1 m long, 0.8 m wide and 1.5 m deep without natural obstacles. The pits were opened according to the topographical positions of the upper (HV), mid-slope (MV) and lower (BV) slopes. The physical description focused on vegetation, local slope, topographical position and surrounding micro-relief [18]. A total of twelve soil profiles were described, including six per locality and three per study site.

Soil samples were taken from the most representative profiles in the study area. Thus, eight soil samples, i.e. four samples per locality and two per site, were taken and subjected to physical (granulometry, coarse element rate and bulk density) and chemical (pH, C, N, P, K, Ca, Mg, and CEC) laboratory analyses. Before any analysis, the samples taken and packed in coded plastic bags, were dried in the open air and sieved at 2 mm in diameter.

2.3 Physical Characteristics of Soils

Soil texture was estimated by the tactile method, which consists of forming a coil in the hand after moistening the soil with water [19]. This texture is specified in a textural triangle applied to the

granulometry determined by Robinson's pipette method as described by [20].

2.4 Coarse Element Loading of Floors

The coarse element load of the soils was determined in the laboratory from soil samples taken from the different horizons. The samples were sieved using a 2 mm mesh sieve. The coarse elements ($\varnothing > 2\text{mm}$) were washed with water, dried in an oven at 105 °C for 24 hours and weighed. The mass of the reject was related to the total mass of the sample. The proportion of coarse elements was determined using the following formula:

$$\text{Rate of coarse elements (p.c.)} = \frac{\text{mass of the sieve residue}}{\text{total floor weight}} \times 100$$

2.5 Soil Bulk Density

Apparent density (D_a) makes it possible to determine the nature and organization of the constituents and the porosity of the soil [21]. It thus indirectly assesses permeability, resistance to root penetration [22], cohesion of horizons [23,24] and soil water reserve [25]. The method used for determining bulk density is that of sand [23]. It is determined according to the equation:

$$D_a = \frac{M}{V}$$

D_a = bulk density (g/cm³)

M = dry mass of the sample (g)

V = volume of the sample taken and dried (cm³).

The volume (V) of the sample taken and dried is determined by the following equation:

$$V = (\text{Weight of calibrated sand} - \text{Remaining sand weight}) \times 1,56$$

2.6 Chemical Composition of the Soils Sampled

Soil organic carbon (C) and total nitrogen (N) levels were determined using the methods of Walkley and Black [26] and Kjeldahl [27] respectively. Total phosphorus (P) was determined by colorimetry after extraction with perchloric acid [28]. Exchangeable bases were determined by flame emission spectrometry (K⁺ and Na⁺) and atomic absorption (Ca²⁺ and Mg²⁺) after extraction with ammonium acetate.

2.7 Determination of the Different Types of Soil

The soils were described and named according to the morphological properties of WRB, version 2014. They were named based on texture, color, depth and chemical characteristics.

2.8 Statistical Analysis of the Data

The averages of the various parameters evaluated were compared by an analysis of variance, to observe or not any significant differences between the two localities, at the 5 p.c. threshold. ($p < 0.05$) with the STATISTICA software version 7.1. The difference is significant for values of $p < 0.05$.

3. RESULTS

3.1 Physical Characteristics of Soils

Evaluation of the physical characteristics of the soils at the two sites showed that the average depth is 150 and 116 cm at Man and Toumodi respectively.

In Man, the A horizon is high at a depth of 20 cm with a clay texture with 47.3 p.c. of clay (Table 1). This horizon consists of 5 p.c. of coarse elements. Horizon B has a silty-clay-sandy texture (43.5 p.c. of fine sand) with 33 p.c. of coarse elements. At mid-slope, horizon A is 16 cm thick and is mainly clay (50.8 p.c.); this gives it a Clay texture. It contains 11 p.c. of coarse elements. Horizon B has a silty-clay texture with 34.1 p.c. of fine sand and 22 p.c. of coarse elements. Horizon A on the lower slopes is thicker with 22 cm in depth. It has a sandy-clay texture overall with 42.7 p.c. of clay and consists of 10 p.c. of coarse filler.

At Toumodi, the A horizon at the top of the slope has an average thickness of 7 cm. The texture of this horizon is sandy loam with a dominance of coarse sand (47.5 p.c.). It consists of 15 p.c. of coarse elements. Horizon B has a silty-clay-sandy texture with 37.7 p.c. of coarse sand and 38 p.c. of coarse elements. At mid-slope, horizon A is 5 cm thick and has a sandy loam-clay texture with 42.9 per cent coarse sand. It contains 17 p.c. of coarse elements. Horizon B, with a silty-clay texture and a dominance of coarse sand (30.8 p.c.), is composed of 48 p.c. of coarse elements. At the bottom of the slope, horizon A is 10 cm thick and consists of 16 p.c. of coarse elements. The texture of this horizon is silty-clay with 36.1 p.c. of clay. Horizon B also has a silty-clay texture

with 39.1 p.c. of clay and 53 p.c. of coarse elements.

Evaluation of the physical characteristics of the soils indicates that the soils of Man are deep with a thicker Arabic layer (horizon A) with a sandy-clay texture. The elemental load of these soils is lower. On the other hand, the soils of the Toumodi locality are shallower, as is their A horizon with a silty-clay-sandy texture with a high elemental load.

3.2 Apparent Density of the Soils in Both Localities

The determination of the apparent density of the soils indicates statically significant differences (p -value = 0.001) between the localities of Man and Toumodi. The apparent density of Man is 1.6 g/cm³, that of Toumodi is 0.8 g/cm³.

3.3 Chemical Composition of the Soils Taken from the Two Study Sites

Analysis of the chemical parameters of the soils shows that in Man, the soils are very acidic (pH = 5.4) (Table 2). This acidity is most noticeable on the upper slopes, with a pH between 4.5 and 5.4 (Table 2). On the lower slopes, the first two horizons are more acidic (5.4 and 5.2) than the last horizon (46-76 cm with pH = 5.9). The

average carbon value of 1.8 g.kg⁻¹ is normal. On the other hand, these soils are deficient in nitrogen (0.1 g.kg⁻¹). The average C/N ratio of 14.5 reflects the rapid decomposition of organic matter. They generally have a low organic matter content (OM = 3 g.kg⁻¹). On the other hand, the organic matter content is average (OM = 4.6 g.kg⁻¹) in the first horizons (0-20 cm) of the upper and lower slopes. At the level of the absorbent complex, the soils of Man are characterized by an average cation exchange capacity (CEC = 9.9 cmol.Kg⁻¹) and a low content of exchangeable base (S = 2.5 cmol.Kg⁻¹). In these soils, the exchange complex (V = 26.6 p.c.) is highly desaturated.

At Toumodi, the soils are weakly acidic (pH = 6) and have a low organic matter content (OM = 2.7 g.kg⁻¹). The average carbon content is normal (1.6 g.kg⁻¹), in contrast to the total nitrogen content, which is very low (0.2 g.kg⁻¹). The rate of decomposition of organic matter is acceptable with a C/N ratio = 11.3 < 12. With regard to the absorbent complex, Toumodi soils are characterized by a low cation exchange capacity (CEC = 7.4 cmol.Kg⁻¹). The sum of the exchangeable bases (S = 2 cmol.Kg⁻¹) and the saturation rate (V = 27.8 p.c.) are low in these soils, indicating high desaturation.

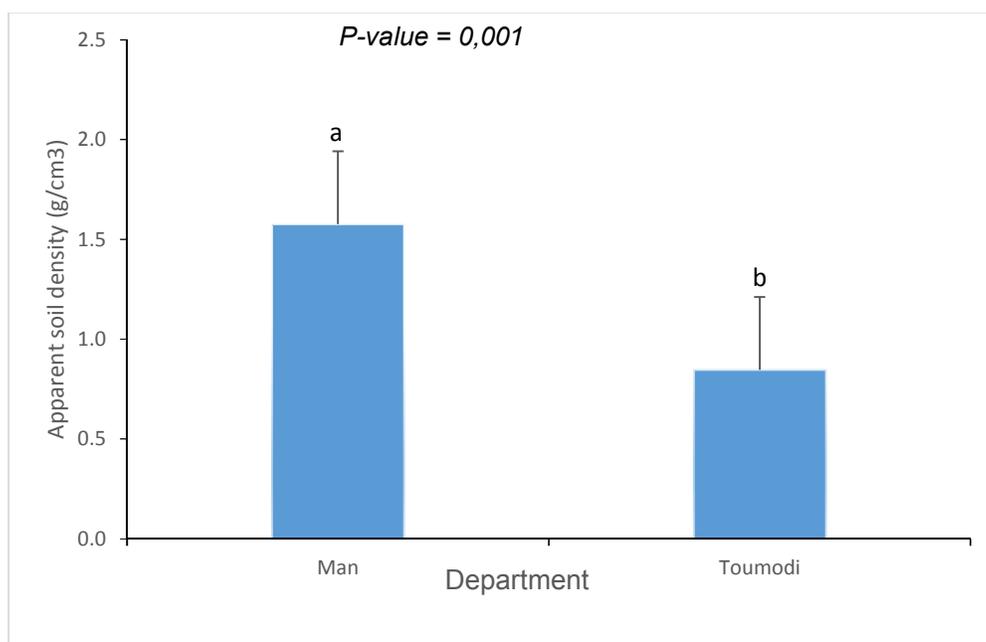


Fig. 2. Apparent soil density at the Man and Toumodi sites

Table 1. Physical characteristics of different soil horizons

Locality	Toposequence	Horizons	Depth (cm)	CEG (p.c.)	Granulometry (p.c)					Texture
					Clay	Fine silt	Coarse silt	Fine sand	Coarse sand	
Man	HV	A	0-20	5c	47,3±3,3a	4,4±0,9b	8,7±1,4a	24,1±0,4b	14,8±1,1ab	Sandy clay
		B	20-150	33a	25,7±3,6b	5,3±0,5b	9,9±1,3a	43,5±3,6a	15,2±1,3ab	Limono-clay-sandy
	MV	A	0-24	11b	50,8±3,4a	3,6±0,9b	6,1±0,8b	24,8±2,1b	14,7±1,7ab	clayey
		B	24-150	22a	29,8±8,2b	6,4±1,2a	10,3±1a	34,1±9,4a	18,9±2,8a	Clay loam
	BV	A	0-22	10b	42,7±3a	5,7±0,9a	9,3±1,1a	25,1±1,5b	17±1,3a	Sandy clay
		B	22-150	19b	29,4±14,6b	6,1±1,6a	11,8±1,8a	33,6±9,8a	18,8±2,4a	Limono-clay-sand
Average value			150	17b	32,9±2,0	5,6±0,5	10,0±1,1	33,9±4,1	17,1±1,8	Sandy clay
Toumodi	HV	A	0-17	15b	12,8±9,7b	8,9±3,9b	7,4±2,1b	22,7±3,7a	47,5±12,3a	sand-loamer
		B	17-122	38a	25,6±4,6b	10,1±8,9b	9,8±5,6a	16,6±2,3ab	37,7±19,5a	Limono-clay-sand
	MV	A	0-21	17b	20,6±6,4b	11,4±2,1b	7±2,6b	15,7±4,3ab	44,2±9,1a	Limono-clay-sand
		B	21-130	48a	35,7±10,1a	11,7±7,7b	11,2±9,8a	10±2,9b	30,8±9a	Clay loam
	BV	A	0-15	16b	36,1±6,3a	18,2±3,5a	11,6±2,5a	14±3,4b	20±7,2ab	Clay loam
		B	15-97	53a	39,1±1a	19,4±1,7a	13,1±1,8a	11±1b	17,3±2b	Clay loam
Average value			116	31a	30,9±8,0	13,5±5,0	10,7±1,8	13,8±3,8	30,8±11,5	Clay loam

CEG: Coarse Element Load; p.c. = percentage; cm = centimete r; p.c.: percent; HV: High Slope; MV: Medium Slope; BV: Low Slope

Table 2. Proportion of chemical elements in the different soil horizons of the two localities

Locality	Topographical level	Depth	Organic material					Complex absorbant (cmol/kg)					
			pH	C (g.kg ⁻¹)	N (g.kg ⁻¹)	C/N	MO (g.kg ⁻¹)	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	S (cmol.Kg ⁻¹)	V (p.c)
Man	High Slope (HV)	0-20	4,5±0,2a	2,7±0,7b	0,2±0,04a	13,5±7,2bc	4,6±0,3a	14,8±1a	1,7±0,2a	1,2±0,3a	0,1±0,02a	3,1±0,1a	20,6±1,2c
		20-49	4,6±0,3a	2,1±0,7a	0,2±0,01a	10,5±5,2b	3±0,4b	10,7±1,4a	1,6±0,2a	0,9±0,3a	0,02±0,03b	2,5±0,1b	23,1±1,2c
		49-95	5,4±0,3b	1,5±0,6a	0,1±0,01a	15±10,2b	2,6±0,9c	10,4±1,4a	0,6±0,4b	0,7±0,3a	0,1±0,02a	1,5±0,02c	14,2±1,1d
	Middle Slope (MV)	0-20	5,7±0,3b	2,7±0,5b	0,1±0,04a	27±7,1bc	4,6±1,9a	10,7±0,3a	2,1±0,2a	1,1±0,8a	0,2±0,02a	3,4±0,8a	31,7±2,3b
		20-40	6,4±0,5c	1,9±0,4a	0,1±0,01a	19±5,3b	3,2±1,8b	9,8±0,2b	1,9±0,2a	0,8±0,8a	0,1±0,02a	2,8±0,01b	28,3±2,2c
		40-70	6±0,5c	1,8±0,5a	0,1±0,01a	18±6,5b	3,1±0,9b	9,2±0,2b	1,7±0,2a	0,5±0,1b	0,01±0,001b	2,2±0,01b	23,6±1,3c
	Bottom of Slope (BV)	0-22	5,4±0,3b	1,5±0,4a	0,2±0,02a	7,5±1,3d	2,6±0,2c	7,2±1c	1,8±0,2a	1±0,4a	0,1±0,02a	2,9±0,01b	40,6±2,7a
		22-46	5,2±0,2b	1,2±0,4a	0,1±0,03a	12±3,6b	2,1±0,1c	8,6±2,2ab	1,8±0,2a	0,8±0,2a	0,01±0,02b	2,6±1,6b	30,3±2,4b
		46-76	5,9±0,3ab	0,8±0,5ab	0,1±0,03a	8±2,2c	1,4±0,4d	7,5±1,4c	1,2±0,2a	0,5±0,2b	0,04±0,02b	1,7±0,5c	23,2±1,2c
	average value		5,4±0,6	1,8±0,6	0,1±0,03	14,5±5,2	3±1	9,9±2,1	1,6±0,4	0,8±0,2	0,1±0,05	2,5±0,6	26,2±7,1
Toumodi	High Slope (HV)	0-17	6,4±0,8c	1,3±0,1a	0,2±0,01a	6,5±5,2b	3,1±0,3b	7,5±1,4c	1,5±0,2a	1,1±0,1a	0,1±0,02a	2,7±1,1b	36,4±2,4b
		17-42	5,3±0,2b	1,6±0,2a	0,2±0,01a	8±7,2b	2,7±0,8c	6,2±1,6d	1,5±0,2a	0,6±0,2b	0,2±0,02a	2,2±1,1b	35,3±2,4b
		42-70	5,1±0,2b	1,8±0,1a	0,1±0,01a	18±19,1a	2,3±0,8c	7,6±1,5c	1,3±0,2a	0,4±0,2b	0,1±0,01a	1,8±0,5c	23,8±1,3c
	Middle Slope (MV)	0-21	6,4±0,4c	1,7±0,2b	0,2±0,01a	8,5±2,1bc	4,4±0,3a	5,7±1d	1,3±0,7a	0,9±0,3a	0,1±0,02a	2,3±1,1b	40,5±2,9a
		21-42	6,4±0,9c	2,6±0,4a	0,2±0,01a	13±5,3b	2,7±0,8c	6,9±0,4cd	0,9±0,5b	0,8±0,3a	0,2±0,02a	1,9±1,6c	27,3±1,6c
		42-65	6,5±0,6c	1,4±0,7a	0,1±0,1b	14±19,1a	2,3±0,3c	7,8±1c	0,7±0,5b	0,5±0,2b	0,1±0,02a	1,3±0,7c	17,1±1,1d
	Bottom of Slope (BV)	0-15	6,2±0,3c	1,5±0,8a	0,2±0,02a	7,5±3,1c	2,6±0,6c	10,4±2,7a	1,7±0,2a	0,9±0,3a	0,1±0,02a	2,7±1,2b	25,8±1,3c
		15-37	6,3±0,2c	1,7±0,5a	0,1±0,1a	17±5,2b	2,9±0,6c	7,9±2,2c	1±0,4a	0,9±0,3a	0,2±0,02a	2,1±1,5b	26,3±1,3c
		37-64	5,5±0,4b	0,9±0,4ab	0,1±0,01a	9±4,7c	1,5±0,4d	6,7±1,8d	0,5±0,4b	0,6±0,3b	0,1±0,1a	1,2±2,1c	17,6±1,1d
	average value		6±0,5	1,6±0,4	0,2±0,03	11,3±10,7	2,7±0,7	7,4±1,2	1,2±0,3	0,7±0,2	0,1±0,04	2±0,5	27,8±7,7

C=Carbon; N=Nitrogen; MO=Organic Matter; CEC=Cation Exchange Capacity; Ca=Calcium; Mg=Magnesium; K=Potassium; S=Sum of Exchangeable Bases; V=Saturation Rate; The letters a, b, c and d indicate significantly different average values in the column at the 0.05 p.c. probability threshold

3.4 Soil Types in Both Localities

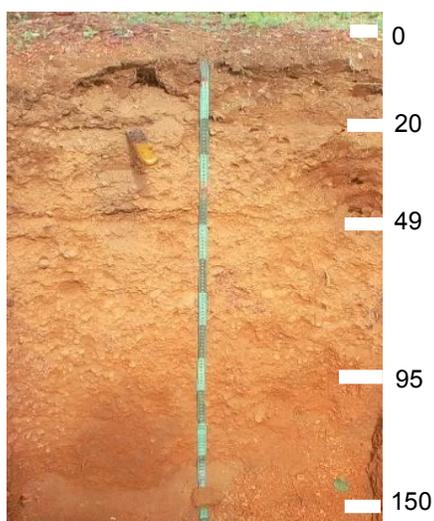
On the basis of morpho-pedological criteria (color, texture, depth, granulometry...) and the chemical characteristics of the soils described above, only one type of soil was observed in the locality of Man. These are ferralsols (Fig. 3A and B). These soils are characterized by a predominantly dark brown coloring ranging from 7.5 YR 3/2 to 7.5 YR 5/8 from the surface to the depth. They are generally highly evolved and moist with fewer coarse elements. Numerous millimeter and centimeter roots are found, mainly in the surface horizons, which are characterized by high biological activity. Their structure is generally subangular polyhedral in the horizons. Its horizons are relatively non-porous to very porous. The humus layer has an average thickness of 20 cm over all the toposequences studied.

In Toumodi, in the centre of Ivory Coast, two types of soil have been identified. These are ferralsols and cambisols (Fig. 3C and D). Toumodi Ferralsols have dark reddish-brown colors ranging from 2.5 YR 3/4 to 5 YR 3/4 with average thicknesses (20 cm). As for the cambisols of this locality, they are mainly characterized by the yellowish-brown color varying from 10 YR 4/6 to 10 YR 5/8 from the surface to the depths. These soils are shallower than those of Man. The structure is generally lumpy in the surface horizons and polyhedral fragmentary in the deeper horizons. These horizons are relatively non-porous to porous. The

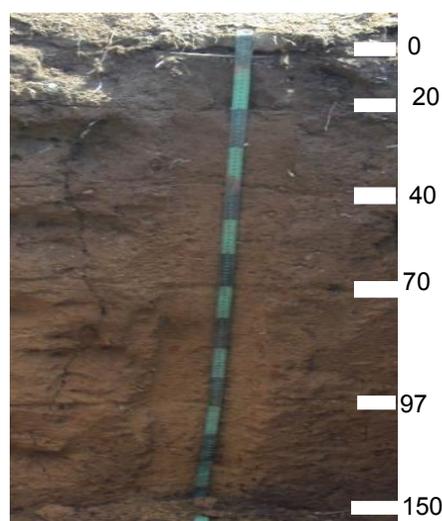
open soil profiles at Toumodi show phenomena of rejuvenation, hydromorphism and deep armoring. Rejuvenation is characterized by ochre and yellowish ochre patches.

4. DISCUSSION

Evaluation of the physical characteristics of the soils indicates that the soils of Man are deep with a thicker Arabic layer with a sandy-clay texture. This texture is found throughout the depth of the profile with at least 30% clay. The elemental load of these soils is lower. This significant depth of the Man soils could be reinforced by the dense vegetation with large trees in this mountainous region, and by a large rainy season of more than three months, with an average rainfall of more than 1600 mm/year. In addition to this, there is a high activity of microorganisms observed in these soils, creating the conditions for a strong and rapid pedogenesis. Indeed, [16,29] confirm the good depth of the soils by these bioclimatic parameters and the intensity of rock weathering. The pronounced alteration of these rocks has strongly reduced the rate of coarse elements in these soils. According to [30], a soil with such a texture, deep and porous, offers very favorable conditions for rubber cultivation. Indeed, due to its large specific surface area and colloidal properties, clay has a high cation-binding capacity, which is responsible for the chemical fertility of the soil.



A: Ferralsol of Man



B: Ferralsol of Man

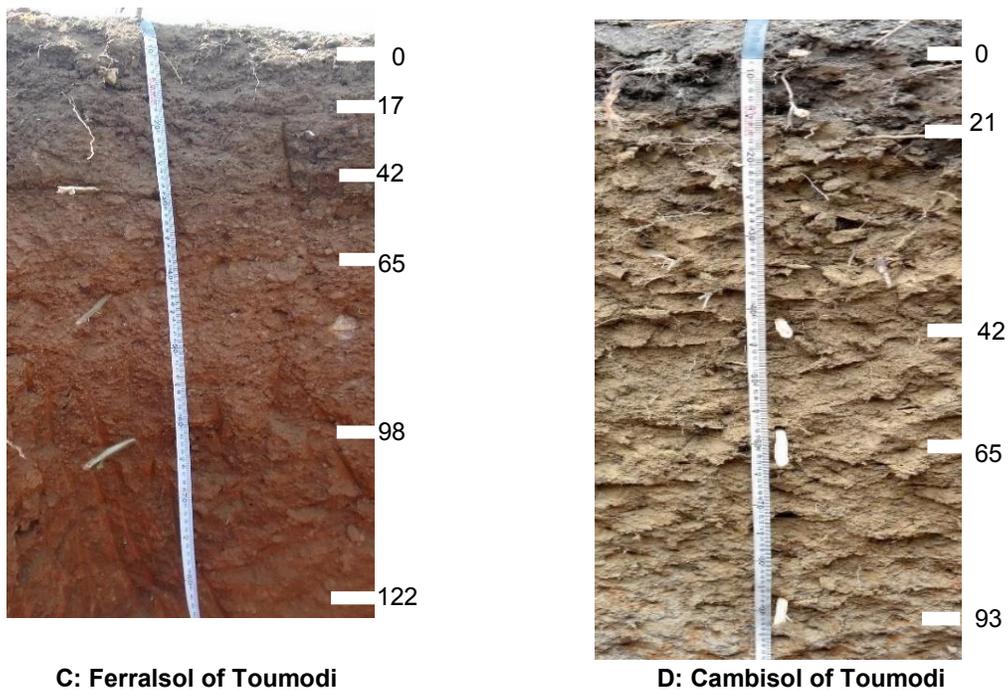


Fig. 3. Some soil types in the study localities (A and B = Man soil; C and D = Toumodi soil)

Unlike the soils in Man, those in the locality of Toumodi are shallower. The surface horizon has a silty-clay-sandy texture with a high elemental load. The formation of these soil types is due to a high proportion of iron oxide, responsible for soil induration [31,18]. The process of induration and hydromorphy observed in the Toumodi soils would have the effect of reducing the volume of exploitable soil by the roots. Also, for soils with horizons whose coarse element load varies from 30 to 50 p.c., fertility could be significantly reduced, especially if this coarse element load is found over 20 to 30 cm in the upper horizons of the profile [32]. This load constitutes an obstacle to the elongation of the rubber tree's taproot [30], whose trajectory could be modified and growth slowed.

The study of the apparent density of the soils, indicates that the soils in the locality of Man are denser (1.6 g/cm³) than those of Toumodi (0.8 g/cm³). The high apparent density values of the soils in Man could be explained by the massive structure observed in connection with the high clay content [33]. On the other hand, the lower bulk density values in Toumodi would reflect good aeration of the soils with a high level of coarse elements [34]. The proportion of coarse sands in Toumodi soils is high (40 p.c. ≤) in the surface horizons (0-20 cm). This high coarse

sand content makes these soils light, filtering and could give them low structural stability, making them highly sensitive to physical and chemical degradation.

The evaluation of the chemical parameters of these soils indicates, although acidic, that the soils of Man have a rapid decomposition of organic matter and are highly desaturated. Based on the analytical data, these are Ferralsols according to WRB [15] with a predominantly dark brown coloring (7.5 YR 3/2). Ferralsols develop on metamorphic rocks (schists, Gneiss and Migmatite) which are the basis of the soil acidity. [35,36] have also shown that the cultivation of these soils activates the mineralisation of organic matter, thus favouring the production of organic acid, nitric acid and the loss of alkaline (K⁺, Na⁺) and alkaline earth cations (Ca²⁺, Mg²⁺). However, [30] reports that the rubber tree is a plant that registers satisfactory growth on soils with acid pH values between 4 and 6.5. In Toumodi, the soils are less acidic and show an equally rapid decomposition of organic matter. Despite the normal cation exchange capacity of Toumodi soils, they are highly desaturated. Indeed, desaturated soils contain a higher or lower proportion of H⁺ ions, which causes a decrease in biological activity in the humus horizons. This decrease in activity

could therefore cause a decrease in nitrification and low nutrient content [37]. Also, work by [31,18] showed that Cambisols are rich in iron oxides which are responsible for soil induration.

5. CONCLUSION

The physico-chemical characterization of the soils of the new rubber-growing areas of the Ivory Coast indicates that the soils of the locality of Man belong to the Ferralsols class. These soils are deep, with a very thick topsoil layer. Its texture is sandy-clay with few coarse elements. These soils are dense, strongly acidic and desaturated with intense biological activity.

In the Toumodi area, Ferralsols and Cambisols can be found. They are shallow with a less thick Arabic layer. The texture is silty-clay-sandy with a high elemental load. The Toumodi soils are less dense, less acidic and highly desaturated with also a strong biological activity.

At the end of this study, the soils of the locality of Man seem to be more favorable to rubber cultivation than those of Toumodi. However, the agronomic characteristics of the rubber plantations, i.e. development, rubber productivity of the rubber trees and latex quality in the localities of Man and Toumodi need to be assessed.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Kouamé ANG, Amani MK, Gnaboa R, Traoré KS, Houenou PV. Analysis of hydrological phenomena in an urbanized watershed: case of the city of Yamoussoukro (central Côte d'Ivoire). LARHYSS Journal. 2014 ;17. P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782
2. Losch B. Village rubber cultivation in the Côte d'Ivoire: Contribution to the study of the evolution of production systems in forest areas. Doctoral Thesis. 1983;153.
3. Hirsch R. Two perspectives on agricultural policies. The West African oilseed sectors: What perspectives in the face of integration and globalization? Oilseeds, Fats, Lipids. 2002;9(6):426-432.
4. Akmel MS. Socio-economic issues and constraints linked to rubber cultivation in djukru country in the region of Dabou (Côte d'Ivoire). European Scientific Journal. 2016;12(35):20.
5. Ruf F. The adoption of rubber in Côte d'Ivoire. Price, mimicry, ecological and social change. Rural economy. Agriculture, Food, Territories. 2012;330-331:103-124.
6. Sangare A, Koffi E, Akamou F, Fall CA. State of plant genetic resources for food and agriculture in Côte d'Ivoire. FAO, second national report; 2009.
7. APROMAC. Rubber production in Côte d'Ivoire. www.Apromac.ci. Consult on June 11, 2020; 2020.
8. Ake GE. Impacts of climate variability and anthropogenic pressures on water resources in the Bonoua region (South-East of Côte d'Ivoire). Doctoral thesis, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire.2010;200.
9. Banton O, Bangoy LM. Hydrogeology: environmental multiscience of groundwater. Montreal; 1997.
10. Essehi JL. Agronomic valuation of farm waste by composting for the improvement of vegetative growth in bagged nurseries of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae) in Ivory Coast. 2019;185.
11. Avenard JM, Brou. Aspect of geomorphology. The natural environment of Côte d'Ivoire, ORSTOM. 1971;391.
12. Yoro G, Godo G. Research on cassava-based cropping systems in farmers' areas in the south - east of the Côte d'Ivoire (Bonoua - Adiaké - Aboisso). Partial observations on family farms in the region. DRSTOM document (Adiopodoumé). 1983;35.
13. N'Guessan KA, Diarrassouba N, Koné B, Alui KA, Yao-Kouamé A. Morphopedological characterization and constraints to the development of *Lippia multiflora* on two tropical soils in Côte d'Ivoire. Journal of Animal and Plant Sciences. 2015;24;3:3814-3828
14. Boyossoro KH, Kouamé KF, Saley BM, Biémi J, Ibrahima T. Climate insecurity and geohazards in Côte d'Ivoire: study of the risk of water erosion of soils in the semi-mountainous region of Man (western Côte d'Ivoire). Science and Planetary Changes/ Drought. 2007;18(1):29-37.
15. WRB. World Reference base for soil of resources. World soil Resources reports N°. 2014;106.

16. Brou T. Climate variability in Côte d'Ivoire: Between social perceptions and agricultural responses. 2005;40.
17. Bakayoko O, Assa AM, Coulibaly B, N'Guessan K. Carbon storage in stands of *Cedrela odorata* and *Gmelina arborea* in Côte D'Ivoire. European Journal of Scientific Research. 2012;121.
18. Yao-Kouamé A. Study of brunified soils derived from materials from the Toumodi volcano-sedimentary complex on average Côte d'Ivoire. PhD thesis in Natural Sciences, University of Cocody / UFR STRM. 2008;210.
19. Yoro GR. Pedology for sustainable soil management. Introductory course for agents of Gabon's Stabilization and Equalization Funds. CNRA; 2002.
20. Anderson JM, Ingram JSI. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. CAB International. 1993; 221.
21. Chauvel A. Research on the transformation of ferrallitic soils in the tropical zone with contrasting seasons. Sci strasbourg thesis, and ORSTOM works and documents. 1977;532.
22. Maertens. Mechanical resistance to the penetration of some ferrallitic soils North of Côte d'Ivoire. 1964;37.
23. Yoro GR. Apparent density measurement methods. Analysis of the dispersion of results over a given horizon. ORSTOM Notebook, Pedology Series. 1992;423-429.
24. Yoro GR, Assa A. Structural modification of two ferrallitic soils in the northwest of Côte d'Ivoire under the effect of trampling by man. 1986;35.
25. Henin S, Gras R, Monier G.. The cultural profile Masson et Cie, Paris; 1969;332.
26. Walkley A, Black IA. An examination of the Degt jareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sciences. 1934;(37):29-36.
27. Mohammad A, Flowers TH. Evaluation of Kjeldahl digestion method. J. Res. (Sci.). 2004;15(2):159-179
28. Olsen SR, Sommers LE. Phosphorus. In Methods of soil analysis. Ed Page et al. Madison, Wisc: ASA and SSSA.1982;403-430.
29. Kassin KE, Koko L, N'Goran KE, Yao-Kouamé A, Yoro GR. Soils favorable to cocoa cultivation in west-central Côte d'Ivoire in a context of drying out Int. J. Biol. Chem. Sci. 2012;6(3):1148-1157.
30. Companion P. Natural rubber. Coste R. ed, G.P. Maisonneuve and Larose, Paris. 1986;595.
31. Boyer J. Ferrallitic soils. Fertility factors and land use. Initiations Documentations Techniques, N°52 X, ORSTOM, Paris. 1982;384.
32. Boa D. Characterization, hydrodynamic properties, constraints and potential of gravelly soils: Case of Booro-Borotou (Touba region, north-west of Côte d'Ivoire). Doctoral thesis. University of Abidjan. Abidjan. 1986;131.
33. Gala BTJ. Determination of the physical, chemical and hydrodynamic characteristics of soils for the optimization of irrigation in sugar cane cultivation. Advanced Agronomy Diploma Thesis, Pedology option. Yamoussoukro Higher School of Agronomy. Côte d'Ivoire. 2000;69.
34. Assi KH, Angui KTP, Tamia AJ. Effects of cultivation and natural constraints on some physical properties of a ferrallitic soil in Central West Côte d'Ivoire: consequences on soil degradation. European Journal of Scientific Research, vol. 23 n°1. 2008;149-166.
35. Dabin B. Study of a method for extracting humic matter from the soil. Soil Sciences. 1971;1:47-63.
36. Delaunois A. Simplified guide for the description of soils. Tarn Chamber of Agriculture. 2006;37. Available:<http://www.agritarn.com>.
37. Landon JR. Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Oxon, UK: Longman. 1991;500.

© 2021 Antoine et al.; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Peer-review history:
 The peer review history for this paper can be accessed here:
<http://www.sdiarticle4.com/review-history/65868>

Publication 2

Koffi Antoine, Essehi Jean Lopez, Soro Dogniméton, Diomandé Métangbo, Kouakou Boukhamy Wilson Lewis, Konan Djézou and Obouayeba Samuel., 2021. Agro-Morpho-Pedological Evaluation of Soils under Hevea in Marginal Zones: The Case of the Departments of Man and Toumodi. International Journal of Plant & Soil Science. 33(16): 156-169, 2021; Article no. IJPSS.70266ISSN: 2320-7035



Agro-Morpho-Pedological Evaluation of Soils under Hevea in Marginal Zones: The Case of the Departments of Man and Toumodi

Koffi Antoine^{1*}, Essehi Jean Lopez², Soro Dogniméton¹, Diomandé Métangbo³, Kouakou Boukhamy Wilson Lewis⁴, Konan Djézou⁵ and Obouayeba Samuel⁵

¹*UFR Agroforestry, University Jean Lorougnon Guédé, Agricultural Production Improvement Laboratory BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.*

²*National Agricultural Research Centre (CNRA), Central Soil, Water and Plant Laboratory 01 BP 633 Bouaké 01, Côte d'Ivoire.*

³*UFR of Biological Sciences, University Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, B.P. 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire.*

⁴*UFR Environment, University Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire.*

⁵*National Agricultural Research Centre (CNRA), Research Station of Bimbresso- Hevea Program, 01 BP 1536 Abidjan 01, Côte d'Ivoire.*

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/IJPSS/2021/v33i1630534

Editor(s):

(1) Dr. Abdelhak Rhouma, University of Sousse, Tunisia.

Reviewers:

(1) Salih Kadhum Alwan, University of Alqasim Green, Iraq.

(2) Samir Hadj-Miloud, Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA, ES1603), Algeria.

Complete Peer review History: <https://www.sdiarticle4.com/review-history/70266>

Original Research Article

Received 27 April 2021

Accepted 02 July 2021

Published 12 July 2021

ABSTRACT

Among the ecological conditions of the environment allowing profitable rubber cultivation, rainfall and the physico-chemical characteristics of the soil are the most important. With this in mind, a study on the adaptability of rubber trees to new agro-morphopedological zones was conducted in the departments of Man and Toumodi. The methodology used to achieve this objective is the realization of pedological pits coupled with physico-chemical laboratory analyses. The open soil profiles reveal that the soils belong mainly to the Ferralsols class with distinctive characteristics, except for those of Kimoukro which belong to the Cambisols class. The Toumodi soils, with a

*Corresponding author: Email: antoinekoffi7@gmail.com;

sandy-clay texture (15-35% clay), have a high content of coarse sand (over 40%) and good internal drainage in the surface horizons. They are less dense ($\leq 1 \text{ g/cm}^3$), with a high coarse element load (40%). These soils are chemically rich with a slightly acidic pH. For the Man soils, the sandy-clay texture, with more than 50% clay, from surface to depth, was the most representative fraction. The coarse element load ($\geq 50\%$) and bulk density ($\geq 1.5 \text{ g/cm}^3$) were more important. These strongly acidic soils are rich in nitrogen and carbon. Exchangeable bases and CEC are important, mainly, in the upper horizons. In addition, the soil profiles observed in these two departments revealed two major pedogenetic processes: reworking and rejuvenation. At the agronomic level, vegetative growth and rubber production of rubber trees were better in Man than in Toumodi. The physico-chemical characteristics of the soils indicate that the departments of Man and Toumodi are favorable for rubber cultivation, although the soils in Man department are more suitable for cultivation.

Keywords: Soils; adaptability; new rubber growing areas; *Hevea brasiliensis*; Côte d'Ivoire.

1. INTRODUCTION

The rubber tree, with the scientific name *Hevea brasiliensis* Muell Arg. (Euphorbiaceae), is a fruit tree, with a height of more than 30 meters and a circumference of 1 to 5 meters at maturity [1]. It originates from the Amazon basin in Brazil [2-3]. This species, which can be continuously tapped, is cultivated for its latex, whose rubber composition makes it easier to process, with a yield that is significantly higher than that of any other known latex plant species [4]. Global natural rubber production in 2018 is estimated at over 13 million tonnes [5], of which 88% is produced in Asia and 6% in Africa. Rubber cultivation in Côte d'Ivoire has developed spectacularly over the past few decades due to the subsidy of rubber plant production by the Hevea Development Fund (FDH), the increase in the purchase price of rubber in the field and, above all, the monthly income that it provides. Rubber occupies an important place in the Ivorian agricultural sector, the "engine of economic development" of the country, as it contributes a high proportion of export earnings. The number of rubber planters increased from 16,500 to 165,000 between 2005 and 2020 [6]. In the same direction, the cultivated area increased from 74,000 ha to 600,000 ha, an increase of 810%. This trend is confirmed by the increase in natural rubber production from 170,000 tonnes in 2005 to 949,000 tonnes in 2020 [6]. This prodigious progress makes the country the leading African producer of natural rubber and the fourth largest in the world, compared to 7th place previously. Despite this performance, rubber cultivation in Côte d'Ivoire is faced with increasing pressure from land and parasites (*Corynespora* spp, Loranthaceae, *Fomès lignosus* spp, etc.) in traditionally favourable areas, and also from the ageing of the

orchard. It should also be noted that the master plan for the development of the rubber sector foresees a production of about two million tons of natural rubber over the next five years, and thus consolidate its dominant position in Africa. To reach this goal and meet the ever-increasing demand for natural rubber, two strategies can be adopted and consider joining the top three producers in the world. The first is to improve rubber productivity in traditional growing areas by optimizing latex harvesting systems in plantations, appropriate replanting techniques and by selecting better performing clones that are better adapted to local environmental conditions. The second strategy consists of extending the rubber cultivation areas to non-traditional zones, described as marginal. These so-called marginal areas are characterized, on the one hand, by a significant annual water deficit ranging from 400 to 600 mm of water and, on the other hand, by soils with coarse elements, armoustone slabs or sound rocks at shallow depths in some places [7-9]. However, rubber is a fairly demanding crop in terms of soil, due to its taproot system, and in terms of climatic factors, notably abundant and well-distributed rainfall (more than 1600 mm/year on average, [4]). The soil and climatic parameters in these new cultivation areas, which are of major importance for rubber, could be detrimental to its establishment, growth and future rubber production. Therefore, knowledge of these (soil and climate) factors is an important prerequisite for sustainable rubber production from an agronomic, economic and environmental point of view. This study was therefore initiated to assess the agricultural potential of soils for rubber cultivation in the administrative departments of Man and Toumodi in order to identify the main constraints to the productivity of these soils. More specifically, the aim was to evaluate the

current physical and chemical characteristics of the soils of the two study sites and to study the behavior of rubber plants on them.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Areas

The study was carried out in the respective localities of Zélé in the West and Kimoukro in the Centre of Côte d'Ivoire. The Zélé site is located between 7°20'00" and 7°30'00" North latitude and 7°30'00" and 7°40'00" West longitude in the administrative department of Man (Fig. 1). Kimoukro is located between 6°20'00" and 6°30'00" North latitude and 5°10'00" and 4°55'00" West longitude in the administrative department of Toumodi (Fig. 1). The climate of Man is tropical and humid [10,11]. Rainfall is monomodal with a long rainy season lasting eight months from March to October. During the decade (2007-2018), this locality received an

average annual rainfall of about 1700 mm. The soils in Man are mainly Ferralsols, according to the working group WRB (2014) classification. Toumodi department is characterized by a transitional equatorial climate with two maxima and two minima [12,10]. The average annual rainfall is estimated at 1,200 mm, with an average temperature of 26° C and an average relative humidity of 77% [13]. The soils of Toumodi are quite varied. Ferralsols, Gleysols and sometimes Cambisols are found [14]. For this study, two types of plots according to age were chosen in order to make a comparative study of the productivity of the soils of the two localities. The cultivation techniques practiced around or within the plot and the types of cultivation guided this choice. All these investigations made it possible to determine two plots in each of these two localities, one of which was young, 2 to 3 years old, and the other, 6 years old or more, was being tapped.

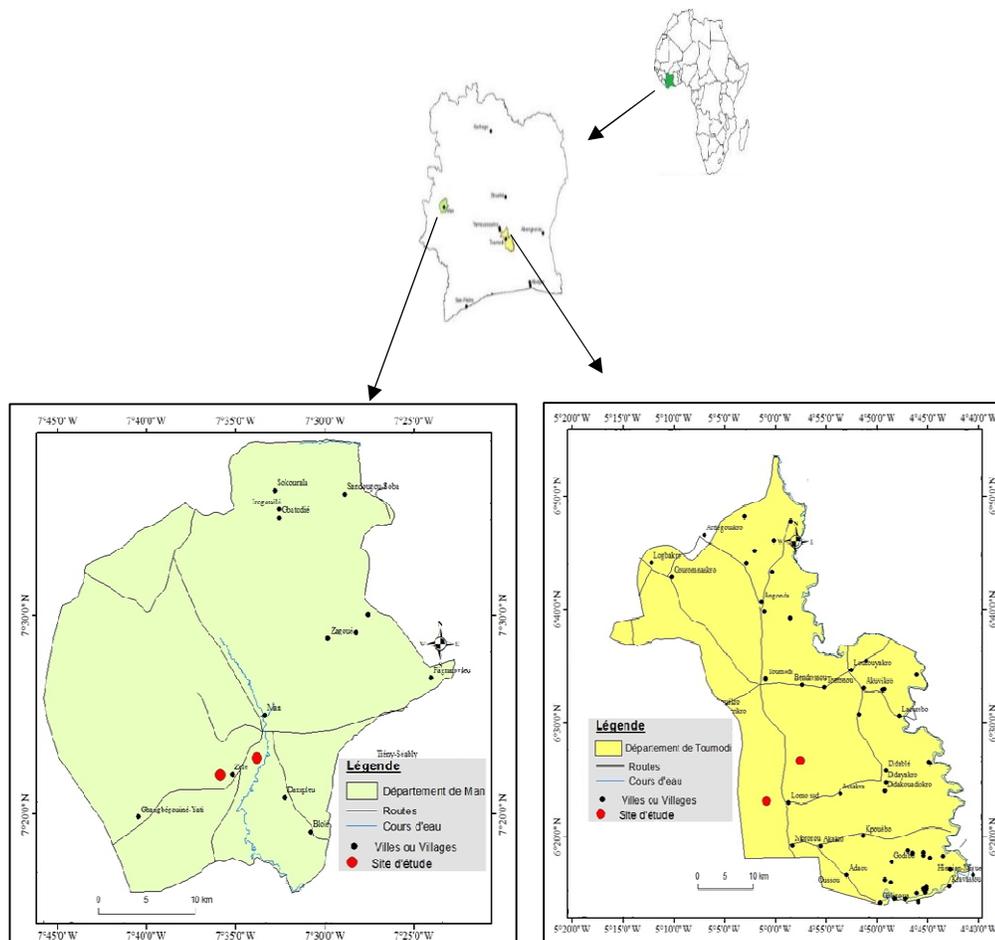


Fig. 1. Study areas

2.2 Plant Material

The plant material consists of *Hevea brasiliensis* clone GT 1. The GT 1 clone, originating from Indonesia, precisely from the Gondang Tapen region from which it takes its name, is a reference clone in Côte d'Ivoire. This clone, the most widely grown in Côte d'Ivoire, is characterized by an excellent grafting success rate and has a moderate to medium radial vegetative growth [15-17].

2.3 Study Methods

2.3.1 Data collection

2.3.1.1 Soil description and sampling under rubber trees

The soil data was collected during the dry season in the months of December to January, to avoid significant soil moisture. The first step was to open and describe the soil pits. A total of eight pits were opened, four per site, two on young plots (2-3 years old) and two on plots undergoing tapping (≥ 6 years old). Secondly, on each test plot, a series of soil samples from different horizons (0 - 20; 20 - 40 and 40 - 60 cm) was taken per pit for physico-chemical analyses in situ and in the laboratory. These analyses included the determination of the coarse element load, the soil texture determined by the Robinson-Köhn pipette method [18], the soil water pH measured on a soil-water suspension distilled in a ratio of 1/2, 5 (electrochemical method known as the "glass electrode" as described by [19] and organic carbon (C-Org) content determined by the Walkley and Black method [20], total nitrogen (Nt) by the universal Kjeldahl method [21]. Assimilable phosphorus (P-ass.), potassium (K) and exchangeable bases (calcium - Ca and magnesium - Mg) were determined by the ammonium acetate method buffered at pH 7.0; cation determinations were carried out by flame photometry for K^+ , Na^+ and Ca^{2+} and by atomic absorption spectrophotometer (AAS) for Mg^{2+} . The cation exchange capacity (CEC) of the soils by the same method as above, but in this case it was the determination of the NH_4^+ ion, after quantitative desorption by K^+ ; in our case, we used the exchange reactions by successive decantation or discontinuous method, as described by [22]; Of these parameters, the organic matter (OM) content, containing on average 58 p. From these parameters, the organic matter (OM) content, containing on

average 58% carbon (C), by the relation: $OM (g.Kg^{-1}) = C \times 1.72$; the ratio (C/N) was deduced.

The analysis of these results was based on the critical levels of interpretation of Boyer [23] and Landon [24].

2.3.1.2 Assessment of water stock in soils under rubber trees

The assessment of the water stock in soils was done by determining hydrodynamic properties of the soil, including parameters such as water storage capacity (SSC) and useful water reserve (Ru). The water storage capacity (SSC) of a soil is the maximum volume of water that it retains against the forces of gravity alone, i.e. after spontaneous drainage [25]. It is calculated from the formula established by GEPPA [26]:

$$CSE = Hv \times E \text{ and } Hv = Hp \times Da$$

With CSE: water storage capacity (mm), Hv: moisture content (%), E: soil thickness in (dm), Hp: moisture content by weight (%) and Da: bulk density.

The useful water reserve (Ru) is the maximum quantity of water retained at a given moment and accessible to the plant. It depends on the structure and texture of the soil, the rooting depth of the plant and the coarse element load. The useful water reserve (Ru) is also calculated from the formula established by GEPPA [26]:

$$Ru = 1/2 \times CSE$$

With Ru: useful water reserve (mm) and CSE: water storage capacity (mm).

2.3.1.3 Measurement of bulk density (Da)

Bulk density (Da) was measured using the sand method [27], this method was used for its ease of use. The sand method consists of digging a cavity in the soil inside a metal plate fixed parallel to the soil surface by stakes. All the soil is collected to determine the dry weight. The cavity is then filled to excess with previously graded sea sand. The surface of the plate is shaved and the excess is collected in a bag. In the laboratory, the residue is weighed and the quantity of sand poured in is determined. The Da is the difference between the initial weight of sand and the weight of the residue. The marine sand was first desalted by soaking in tap water, air-dried and sieved successively with 2.1 and

0.8 mm square-mesh sieves. At the end of this treatment, two dimensional classes (2 - 1 and 1 - 0.8 mm) of dry and flowing sand are obtained. The more abundant class with a density of 1.56 was used for bulk density measurements. Sand packages of 2.5 kg were made up for the field measurements. These measurements were carried out in the surface layer (0 - 20 cm) of the soil, through which most of the absorbing hairs of the rubber tree run. Three (3) measurements (replicates) were made per plot (0.5 - 1 ha). The bulk density (D_a) is determined according to the equation:

$$D_a = P / V$$

D_a : bulk density (g/cm³), P : dry weight of the sample (g) and V : volume of the sample taken and dried (cm³).

The volume (V) of the collected and dried sample is determined by the equation:

$$V = [(Weight\ of\ graded\ sand - Weight\ of\ remaining\ sand)] \times 1.56$$

2.3.2 Agronomic data

2.3.2.1 Radial vegetative growth of rubber trees

The radial vegetative growth of rubber trees was determined by annual measurements of the trunk circumference of the trees at 1 m from the ground for young plots (2 to 3 years old) and at 1.70 m for tapped plots (≥ 6 years old), using a tape measure.

2.3.2.2 Rubber production from tapped plots

Rubber production was estimated from the weighing of rubber per elementary plot, carried out every four weeks. The transformation coefficient per treatment was determined and made it possible to obtain, from the fresh weight (FW), the dry weight (DW) of rubber, in grams per tree per tapping ($g \cdot a^{-1} \cdot s^{-1}$), which reflects the intrinsic value of the tree in producing rubber.

2.3.3 Statistical analysis of the data

The mean values of the different parameters studied per site and per plot were subjected to a one-factor analysis of variance (ANOVA 1) at the 5% probability level, in order to observe possible significant differences or not. When a significant difference was noted between the factors

considered for a given character, the test of the smallest significant difference (LSD) was performed. STATISTICA software version 7.1. was used to carry out all these analyses.

3. RESULTS

3.1 Soil Parameters

3.1.1 Morpho-pedological characteristics of the soils of the two study sites

3.1.1.1 Color of the different horizons of the soil profiles

Determination of the color of the different horizons of the soil profiles revealed variously colored patches of hydromorphism (7.5 YR 5/8; 10 YR 5/6; 10 YR 5/8 and 10 YR 4/6), which can be observed in the lower topographical positions (mid and lower slopes). These soils have been affected by hydromorphy at depth and the consecutive horizons of the observed profile are of type B.

3.1.1.2 Grain size composition of the observed soil profiles

Table 1 presents the physical characteristics of the soil at depths of 0 - 20, 20 - 40 and 40 - 60 cm at the two study sites. The particle size composition of the soils revealed that sand (59.7% on average in Man and 65.05% on average in Toumodi) is, in general, the most representative particle size fraction in the topsoil (0 - 20 cm) regardless of the study site and type of plot. Clay contents (49.05% on average in Man and 36.5% on average in Toumodi) were obtained in the deeper horizons. In these soils, silt is the least represented fraction.

3.1.1.3 Soil coarse matter loadings in the two localities

Fig. 2 shows the distribution of soil coarse matter loadings under rubber cultivation for the Man and Toumodi sites. On the soils of the young plots, the proportion of coarse elements was higher in Man than in Toumodi. These values were 56.59% for the soils in Man compared to 38.25% for those in Toumodi. In the bleeding plots, the coarse element load was relatively low ($\leq 10\%$). Statistically identical, the values the results were 8.45% in the Man soil and 8.04% in the Toumodi soil.

Table 1. Granulometric composition of the different horizons of the soil profiles

Site	Type of plot	H (cm)	Granulometry (%)			Texture
			C	Lf + Lc	Sf + Sg	
Man	Young (2-3 years)	0 – 20	25	14,5	60,5	Silty-Clay-Sandy
		20 – 40	41,1	10,3	48,6	Clay-Sand
		40 – 60	47,3	13,1	39,6	Clay
	Tapping (≥ 6 years)	0 – 20	25,3	15,8	58,9	Silty-Clay-Sandy
		20 – 40	26,2	15,2	58,6	Silty-Clay-Sandy
		40 – 60	50,8	9,7	39,5	Clay
Toumodi	Young (2-3 years)	0 – 20	12,8	16,3	70,9	Silty-Sandy
		20 – 40	21	13,6	65,4	Silty-Clay-Sandy
		40 – 60	25,6	10,2	64,2	Silty-Clay-Sandy
	Tapping (≥ 6 years)	0 – 20	20,6	18,4	61	Silty-Clay-Sandy
		20 – 40	34	16	50	Silty-Clay-Sandy
		40 – 60	47,4	9,9	42,7	Clay

H: Horizon, C: Clay, Sf: fine Sand, SC: Coarse Sand, Lf: fine Loam, Lg: Coarse Loam

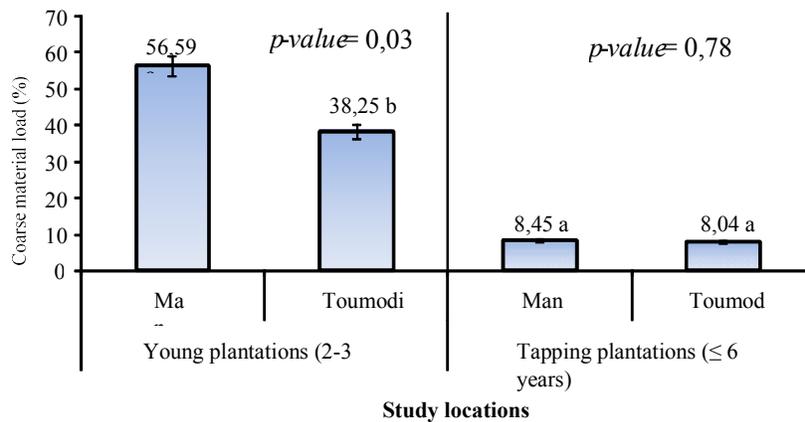


Fig. 2. Distribution of the coarse element load of the soils of the Man and Toumodi sites

3.1.1.4 Evolution of the water storage capacity of the soils of the study sites

The seasonal evolution of water storage capacity (CSE) of soils under rubber cultivation for plots in Man and Toumodi for the periods April to December 2014 is presented in Fig. 3. The analysis of variance (ANOVA) to the two controlled factors, namely locality (Man and Toumodi) and observation period (April to July and October to 2014), showed that there is a significant effect ($p < 0.05$) of these factors on the hydrodynamic parameter (CSE). Analysis of Fig. 3 indicates a seasonal fluctuation in the water storage capacity of the soils at the study sites. The highest values of SSC were obtained at the beginning of the short rainy season (October 2014) and at the end of the long rainy season (July 2014). However, the highest mean values were obtained in October 2014 in Man and are 559.25 ± 40.87 mm for the bleeding plots

(≤ 6 years) and 467.32 ± 67.29 mm for the young plots (2 - 3 years), respectively. In contrast, in July 2014, the highest values were 318.49 ± 11.08 mm and 260.02 ± 13.25 mm in the bleeding and young man plantations respectively. From April to December 2014, mean SSC values were well below 100 mm for all sites.

3.1.1.5 Evolution of the useful water reserve (Ru) of the soils of the two study sites

Fig. 4 shows the evolution of the useful water reserve (Ru) of the soils under rubber cultivation in the Man and Toumodi plots for the period from April to December 2014. The ANOVA with Ru values of the two controlled factors, namely locality (Man and Toumodi) and observation period (April to July and October to December 2014), showed that there is a significant effect ($p < 0.05$) of these factors on this hydrodynamic

parameter (Ru), regardless of the part of the study area. Relative to SSC, Ru showed higher values in October and July 2014. In October 2014, the highest average soil Ru values obtained at the Man site were 219.62 ± 20.87

mm for the bleeding plantations and 122.67 ± 16.58 mm for the young plantations. However, the average Ru values measured in April and December 2014 were below 50 mm at all sites.

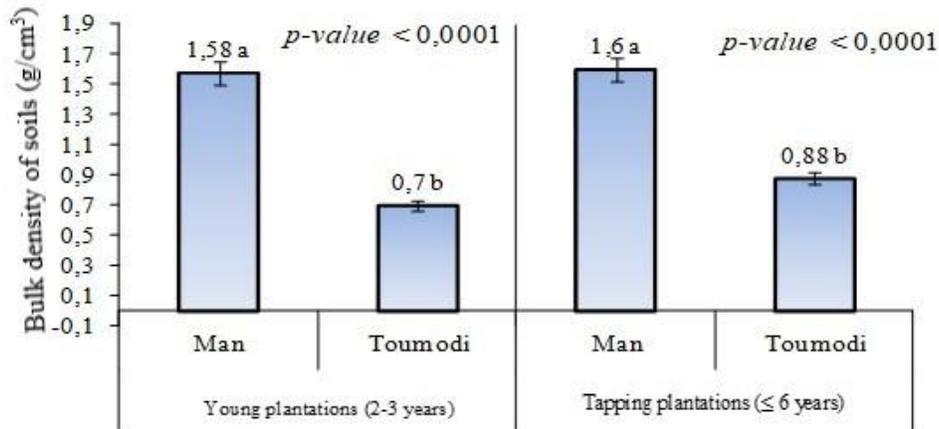


Fig. 3. Evolution of the water storage capacity of the soils of the sites

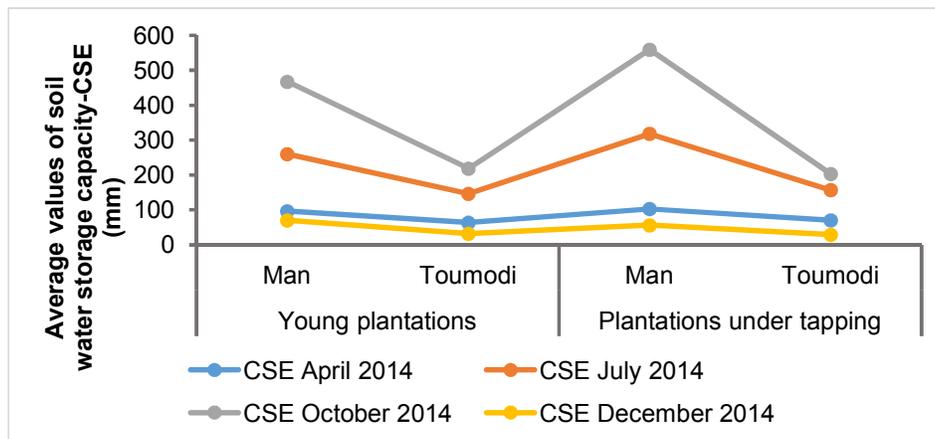


Fig. 4. Evolution of the useful water reserve (Ru) of the soils of the study sites

3.1.1.6 Bulk density of soils at the two study sites

The study of the apparent density (D_a) of soils under rubber trees presented in Fig. 5 shows statically different values (p -value < 0.0001), whatever the locality (Man and Toumodi) and the age of the plot (young or tapped). In young plots, these values are 1.58 g/cm^3 for Man and 0.7 g/cm^3 for Toumodi. For plantations undergoing tapping, the average bulk density values are respectively 1.6 g/cm^3 for the Man soils and 0.88 g/cm^3 for the Toumodi soils.

3.1.1.7 Soil typology of the Man and Toumodi localities

The description of the open cultivation profiles on the different plots has made it possible to identify a soil typology. Thus, in the young plot in Man, Amphiarenic Ferralsol type soils are observed on the upper slope and Endoplinthic Pseudogleyic Ferralsol on the mid-slope. In the bleeding plot, Colluvicarenic Ferralsol soils are found on the mid-slope and Pseudogleyic Ferralsol on the

lower slope. In Toumodi, the soils are of the Amphiarenic Ferralsol manganiferrous type on the upper slope and Endoarenic Ferralsol manganiferrous on the mid-slope for the young plot. In the bleeding plot, Pseudogleyic Cambisol soils were identified in the upper slope and Lixic Pseudogleyic Cambisol in the mid-slope.

3.1.1.8 Chemical composition of the soil samples collected

Table 2 shows that the Man soils are classified as very strongly to moderately acidic with pH values ranging from 4.5 to 6.5. In contrast, the Toumodi soils are moderately acidic, pH (5.1 ≤ pH ≤ 6.5). The organic matter (OM) content was moderately higher at the Man sites (0.91 ≤ OM ≤ 2.93) than at Toumodi (0.56 ≤ OM ≤ 2.68). Moreover, this content decreases with soil depth regardless of the study site. Table 2 also reveals that the total nitrogen content is very low (N < 1%) in both the Man and Toumodi soils. Nevertheless, in the surface layer (0-20 cm), the Man soil is relatively rich in nitrogen (0.14%). A similar correlative variation in the rate of organic matter mineralisation (C/N) is observed, irrespective of the locality and depth of the soil. The adsorbent complex of the soils of the Man and Toumodi plots is characterised by a cation exchange capacity qualified as very low (CEC ≤ 5) to low (5 ≤ CEC ≤ 10) which is fairly constant over all the samples analysed. On tapped plots (≤ 6 years old), this complex is moderately

supplied with calcium (1 ≤ Ca²⁺ ≤ 2.5), and is deficient in magnesium (Mg²⁺), whose recommended optimum content for tapped rubber trees is (1 ≤ Mg ≤ 1.5 cmol.kg⁻¹). The potassium content is very low (0.1 < K⁺), regardless of the plot and the locality.

3.2 Agronomic Parameters

3.2.1 Vegetative growth of rubber trees

The analysis of variance of the vegetative growth of the rubber trees observed through the average annual circumference indicates statically different values regardless of the locality and age of the plot (Fig. 6). For young plots of 2 to 3 years old, the average tree circumference is 16.40 cm in Man compared to 7.29 cm for the Toumodi plot. In the tapped plantations, Man still has the best average circumference values (59.47 cm), while Toumodi has a value of 52.18 cm.

3.2.2 Average annual production of rubber plantations

The average annual rubber production expressed in grams per tree and per tapping (g.a⁻¹.s⁻¹), over the five years of the experiment (tapping carried out in a half-spiral every three days) was 65.93 g in Man and 43.94 g in Toumodi (Fig. 7).

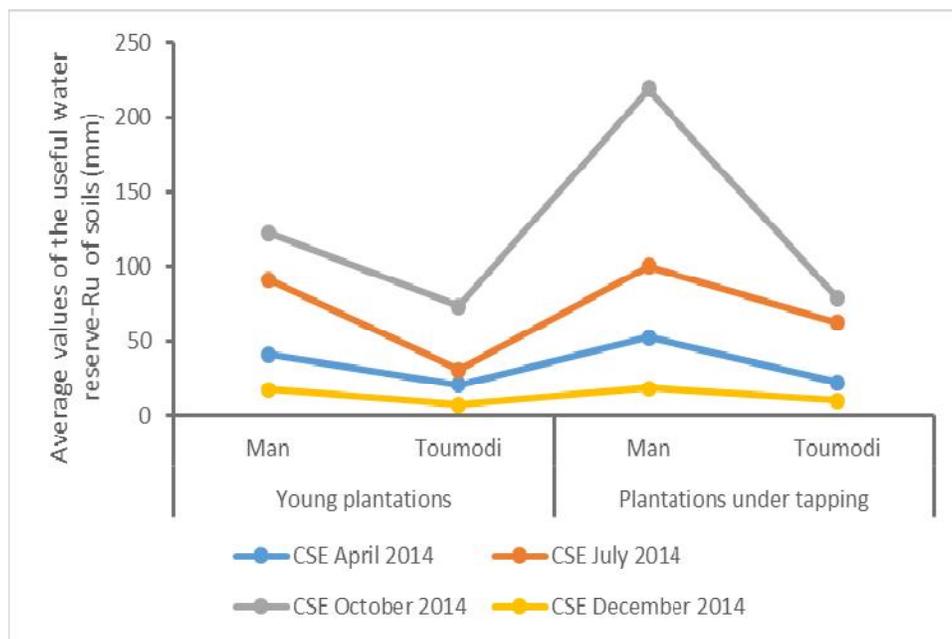


Fig. 5. Apparent soil density at Man and Toumodi sites

Table 2. Proportion of chemical elements in different soil horizons

Locality	Type and age of plots	Horizons (cm)	MO (p.c.)				Absorbent complex (cmol/kg)			
			pH	C	N	C/N	CEC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Man	Young (2 - 3 years)	0 – 20	4,5	1,70	0,14	12,14	9,84	0,52	1,21	0,01
		20 – 40	4,6	0,72	0,07	10,28	9,20	0,64	0,44	0,02
	Tapping (≥ 6 years)	0 – 20	5,4	0,53	0,06	8,83	10,40	1,59	0,87	0
		20 – 40	5,7	1,70	0,14	12,14	5,20	1,29	0,74	0,02
		40 – 60	6,4	0,88	0,08	11	3,20	1,69	0,47	0,01
		40 – 60	6,0	0,78	0,07	11,14	4,80	1,94	0,77	0,01
Toumodi	Young (2 - 3 years)	0 – 20	6,4	0,78	0,08	9,75	5,68	0,99	0,55	0,18
		20 – 40	5,3	0,59	0,06	9,83	6,88	0,69	0,19	0,04
	Tapping (≥ 6 years)	40 – 60	5,1	0,33	0,03	11	7,84	0,57	0,41	0,04
		0 – 20	6,4	1,56	0,14	11,14	10,08	5,76	0,85	0,17
		20 – 40	6,4	0,59	0,06	9,83	6,48	1,67	0,42	0,10
		40 – 60	6,5	0,35	0,03	11,66	12,48	1,03	0,54	0,14

%; percentage; C: Carbon; N: Nitrogen; C/N: carbon/nitrogen ratio; CEC: Cation exchange capacity; Ca²⁺: Calcium ion; Mg²⁺: Magnesium ion; K⁺: Potassium ion

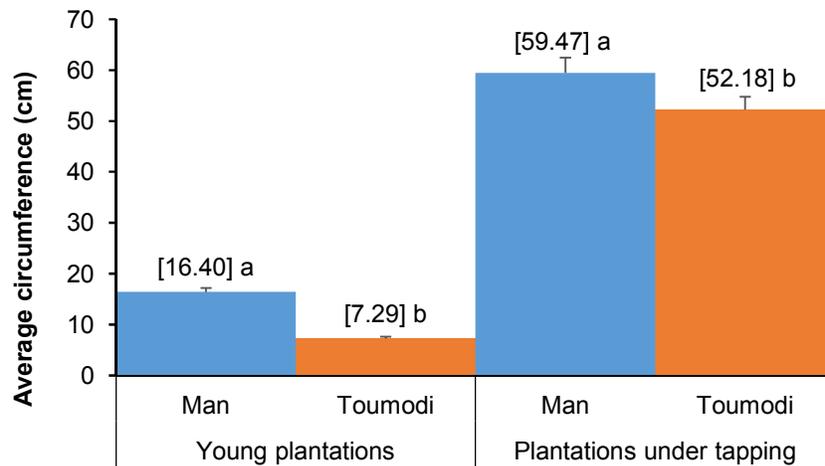


Fig. 6. Average circumference (cm) of rubber trees in both locations

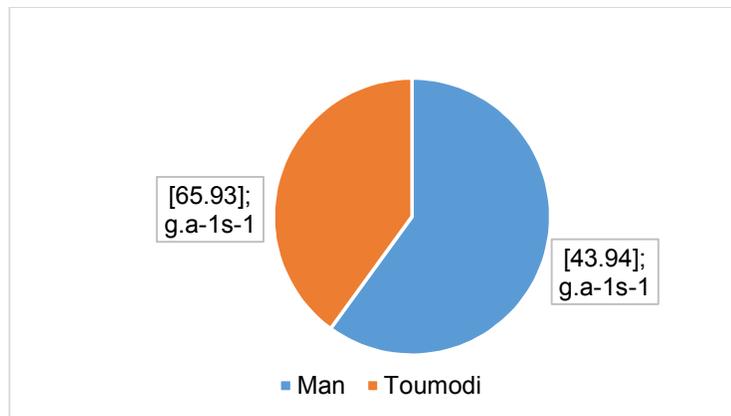


Fig. 7. Average annual rubber production (g.a⁻¹.s⁻¹) of Man and Toumodi rubber plantations

4. DISCUSSION

4.1 Physical and Chemical Characteristics and Agricultural Potential of Man and Toumodi Soils for Rubber Cultivation

The pedological study carried out on the experimental sites (young plot and tapped plot) reveals that the majority of the open soil profiles belong to the Ferralsols class (according to the WRB version 2014 [28]) with distinctive characters, except for the soils observed at Kimoukro (Toumodi) of the Cambisols class. The soils observed in Toumodi are very rich in sand and mainly in coarse sand (up to more than 40%) in the surface horizons (0 -20 cm and 20 - 40 cm). This high content of coarse sands makes the soil light and filtering, which could give it a low structural stability, thus inducing a high sensitivity of this soil to physical (erosion) and chemical degradation. This result corroborates the conclusions of Koné *et al* [29] on the quality of soils in the humid savannah of Côte d'Ivoire. However, on the surface of the soils encountered, lateritic cuirasses can, in places, form a natural protective layer, reducing evaporation and slowing down erosion by breaking up the surface flow [30,31]. It should be noted that in rubber trees, a sandy-clay texture (15 to 25% clay) corresponds to borderline or even mediocre conditions for the plant. For Man soils, the sandy-clay texture, sometimes with more than 50% clay, from the surface to the depth, was the most representative fraction. This high clay content in the surface horizons of soils could be due to a colluvium phenomenon and consequently induce a much more compact structure, thus making the soil asphyxiating. Also, Hénin *et al* [30] report that clay, a plastic, water-hungry and binding substance, is a cohesive element unlike sand. Another disadvantage of clay soils is the reduction of the available water domain or space when the fine elements increase [32]. However, according to [4,3], a clay soil with more than 55% clay throughout its depth offers very favorable conditions for rubber trees, provided that the soil is well aerated, porous and very deep. The high clay content of Man's soils is therefore not an obstacle to the development of rubber trees. On the different study sites (Man and Toumodi), two major pedogenetic processes were highlighted: reworking (coarse element load) and rejuvenation in the deeper horizons. Reworking, which is much more pronounced in the Man soils

(≥ 50 p.c.), is the presence of a horizon rich in coarse elements (cuirass debris, ferruginous gravels, more or less blunt and ferruginised quartz gravels and pebbles). According to Avenard *et al* [12], Boyossoro *et al* [33] and Akanza [34], most of the Man plantation is established on soils characterized by the presence of a gravelly horizon close to the surface, which mark the soil dynamics not only by their number and size, but also by their composition and shape. According to Compagnon [4], the abundant coarse elements could constitute obstacles to root development and, by their volume, reduce the water reserves of the soil. Also, for soils with horizons whose coarse element load varies from 30 to 50%, fertility could be significantly reduced, especially if the stony layers contain more than 30% coarse elements over more than 20 to 30 cm in the upper horizons of the profile [35-37]. Furthermore, outcrops of lateritic cuirasses are frequent in Toumodi and give the cultivation profile a very high degree of heterogeneity. These soils are low in humus, very acidic and rather poor in chemical elements. They are therefore suitable for relatively undemanding crops. Their relatively shallow depth and low clay content give them a low water retention capacity. These edaphic characteristics, which are really limiting factors for agricultural activity in this area, require certain precautions for rubber cultivation. Rejuvenation is expressed by the presence of variously colored spots (7.5 YR 5/8; 10 YR 5/6; 10 YR 5/8 and 10 YR 4/6) in the soils, which indicate poor internal drainage at depth. This poor internal drainage would be linked to the fact that the water in the soil does not circulate correctly and this can create redox phenomena, which can cause asphyxiation of the plants, as has been reported [38]. In addition, the depth of the soil, mostly greater than 1 m, does not appear to be a limiting factor for the growth and development of rubber trees on these two sites. The apparent density of soils under rubber trees (in young plots or in tapping) shows statically different values whatever the locality. Soils in Man (1.6 g/cm³) are denser than those in Toumodi (0.88 g/cm³). This implies a tendency for the Man soils to be compacted, hence the high clay and coarse element content. On the other hand, the lower bulk density values at Toumodi reflect good soil aeration [39,40]. From a chemical point of view, the majority of the observed soils have a strongly acidic pH (4.5 ≤ pH ≤ 5.5) to acidic (5.5 ≤ pH ≤ 6.5). According to Landon, [41], at low pH values (very acidic soil), many adverse phenomena could occur in the

soil, such as: decreased nitrification, phosphorus deficiency, aluminium or manganese toxicity, low mobility of organic pollutants and high availability of some heavy metals. These phenomena could be an obstacle to the vegetative growth and future production of young rubber plants. However, Compagnon [4] reports that the rubber tree is a very hardy plant, capable of great adaptability, which gives it tolerance to soil pH, to the extent that the rubber tree grows satisfactorily even at pH values between 4 and 6.5. Furthermore, the lack of chemical elements in the soil cannot be an obstacle to the establishment of the rubber tree, if good physical conditions are also achieved [4]. In rubber, the physical properties of the soil (depth, texture, aeration, water retention capacity, etc.) are more important than the chemical fertility of the soil itself. Indeed, compared to other crops (cocoa, coffee, tobacco, etc.), rubber trees are better able to tolerate soils with low fertility potential.

4.2 Vegetative Behavior of Rubber Trees

The vegetative behavior of the trees was assessed by comparing the average values of the isodiametric circumference of the trunk at 1 m and 1.70 m from the ground in each of the plots in the two localities (Man and Toumodi). It was found that in young plantations of 2 to 3 years old, the average circumference of the trees was 16.40 cm in Man compared to 7.29 cm in Toumodi. In the tapped plantations, Man still has the best average circumference values (59.47 cm). These results show that the rubber trees develop better in Man than in Toumodi. This difference in tree behavior could be explained by the different soil types in the two localities, from a physical and chemical point of view, and also by the high and well-distributed rainfall in Man. Indeed, as mentioned above, the soils observed in Toumodi are very rich in sand, particularly coarse sand. This high content of coarse sand makes the soil filtering and light, which could give it low structural stability, thus making it highly sensitive to physical (erosion) and chemical degradation. This coarse fraction therefore corresponds to borderline or even mediocre conditions, with medium dry seasons (one to two months) for rubber trees. In contrast, at Man, clay was the most representative fraction along the entire length of the open profiles. Compagnon [4] reports that a high clay content ($\geq 55\%$) in the soil throughout the depth of the profile does not hinder the development of rubber trees. Furthermore, although rubber is generally considered to be a hardy crop that can adapt to

many situations, its growth and yield level are nevertheless conditioned by certain climatic, environmental and soil characteristics. Climatically, a rainfall regime averaging between 1500 mm and 3000 mm per year is considered suitable for the growth and yield requirements of the rubber tree. Below 1500 mm per year, the survival of seedlings may be compromised, and tree growth may be significantly slowed. Above 3000 mm per year, the frequency of rainfall can be a limiting factor for yield because of the production losses caused. Here, there is a relative homogeneity of rainfall levels within the two study areas. The annual rainfall totals are, in fact, within the range of the rubber tree's needs. In terms of soil characteristics, there are also significant differences between the two areas. Thus, climatic variability in these two agro-zones (Man and Toumodi) could also contribute to explain this difference in growth observed. This explains and confirms the results obtained on the production of tapped rubber trees in Man ($65.93 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$) and Toumodi ($43.94 \text{ g.a}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

5. CONCLUSION

The results obtained at the end of the study on the characterization of the physico-chemical parameters of the soils of the departments of Man and Toumodi allow the following conclusions to be drawn.

1. The soil profiles reveal that the soils belong mainly to the Ferralsols class with distinctive characteristics, except for those in Toumodi, particularly in Kimoukro, which belong to the Cambisols class.
2. The Toumodi soils, with a sandy-clay texture (15-35% clay), have a high sand content and good internal drainage in the surface horizons. These soils are less dense than those observed in Man. Toumodi soils are slightly acidic and have a high nitrogen and exchangeable base content.
3. Despite some variability, the edaphic characteristics of Man (richness, texture, depth) seem compatible with sedentary agriculture.
4. For the Man soils, the sandy-clay texture was the most representative fraction. The coarse element load ($\geq 50 \text{ p.c.}$) and bulk density ($\geq 1.5 \text{ g/cm}^3$) were more important. The soils in this department, rich in

nitrogen and carbon, are strongly acidic. Exchangeable bases and CEC are important, mainly, in the upper horizons.

5. Agronomically, the development of rubber trees and rubber production are important in the department of Man.

Given the agroedaphoclimatic requirements of rubber for good plant development, the soils of Man and Toumodi Departments are compatible with rubber cultivation, although those of Man Department appear to be more favorable to rubber farming.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Coulibaly LF, Traore MS, Soumahin EF, Obouayeba S, Keli JZ. Impact of d3, d4 and d6 bleeding frequencies at low hormone stimulation regimes on the descendant panel of rubber tree clone PB 235 in Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2017;11(4):1655-1668.
2. Soumahin EF, Elabo AAE, Okoma KM, Atsin OGJ, Dick AE, Obouayeba S. Yield response of low frequency upward tapping by increasing the tapping cut length in *Hevea brasiliensis* (clone GT 1) in South-Eastern Côte d'Ivoire. *Rubber Science*. 2014;27(2):193-201.
3. Essehi JL. Agronomic valorisation of farm waste by composting for vegetative growth improvement in bagged nursery of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae) in Côte d'Ivoire. 2019;185.
4. Compagnon P. *Naturel Rubber*. Coste R. ed, G.P. Maisonneuve et Larose, Paris. 1986;595.
5. ANRPC. The association of natural rubber producing countries. *Annual Report*. 2019;47.
6. APROMAC. Rubber production in Côte d'Ivoire; 2021. Available:www Apromac.ci. Retrieved 11 May 2021
7. Poss R. Morpho-pedological study of the Katiola region, Côte d'Ivoire: Maps of landscapes and morpho-pedological units. ORSTOM. Adipodoumé. 1982;186.
8. Yoro G. Pedological study and agricultural perspectives of the Touba region (northwestern Ivory Coast). Adipodoumé. 1983;32.
9. Yao-Kouamé A. Study of burnt soils derived from materials of the Toumodi volcano-sedimentary complex in the middle of Ivory Coast. PhD thesis in Natural Sciences, University of Cocody/UFR STRM. 2008;210.
10. Brou YT. Climate, socio-economic changes and landscapes in Côte d'Ivoire. Thesis of synthesis of scientific activities presented for the Habilitation to supervise research, University of Science and Technology of Lille, France. 2005;212.
11. Sery DJM, Bonsson B, Gnogbo R, Gbedie N, Ouattara Y, Legnate H, Keli ZJ. Influence of genotype and number of leaves on the nursery growth of cuttings of colatier (*Cola nitida* [Vent.] Schott and Endlicher.). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2019;13(7):3144-3156.
12. Avenard JM, Brou. Aspect of geomorphology. The natural environment of Côte d'Ivoire. ORSTOM. 1971;391.
13. Bakayoko O, Assa AM, Coulibaly B, N'Guessan K. Carbon storage in *Cedrela odorata* and *Gmelina arborea* stands in Côte D'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*. 2012;121.
14. Yao-Kouamé A. Physical characteristics of brown soils derived from the Kanhankro (Toumodi) volcano-sedimentary complex in mid-Côte d'Ivoire. *Rev. CAMES-Serie A*. 2007;05:76-86.
15. CIRAD. Collection of Hevea clone sheets. CIRAD-Perennial crops, publishing Montpellier, France. 1993;20.
16. Obouayeba S, Boa D, Ake S. Critical age, bark growth and latex vessel formation as attributes for determination of tapping norms. *Indian Journal of Natural Rubber Research*. 2000;13(1,2):38-45.
17. Obouayeba S. Contribution to the determination of the physiological maturity of the bark for the bleeding of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. (Euphorbiaceae): Opening standards. D. thesis, University of Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire. 2005;223.
18. Gee GW, Bauder JW. Particle-size analysis. In : *Methods of soil analysis. Part 1 : Physical and mineralogical methods* (ed. A Klute). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI. 1986 ;383-411.

19. Thomas GW. Soil pH and soil acidity. In: Methods of soil analysis. Part 3 -Chemical methods. Sparks D L, Page AL, Helmke PA et Loeppert RH. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, USA. SSSA Book Series. 1996;5:475–490.
20. Nielson DW, Sommers ME. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods. Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, USA. SSSA Book Series. 1996;5:961–1010.
21. Bremner JM. Nitrogen-total. In methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods. Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, USA. SSSA Book Series. 1996;5:1085–1122.
22. Sommers ME, Miller WP. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods. Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH. (Eds.). American Society of Agronomy, Madison, USA. SSSA Book Series. 1996;5:1201-1230.
23. Boyer J. Ferralitic soils: Fertility factors and land use. Tome X, Initiation-Documentations Techniques n°52, ORSTOM, Paris, France. 1982;384.
24. Landon JR. Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Booker Agriculture International Limited. 1984;450.
25. Baize D. Clay soils depleted of clay under humid temperate climate. Soil investigation and management. 1995;2(4):227-240.
26. GEPPA (Study Group on Applied Soil Science Problems). Synthesis of the work of the mapping commission 1970-1981, Doc. Multi-copy. 1981;20.
27. Yoro G. Methods of measuring bulk density. Analysis of the dispersion of results within a given horizon. Notebook of l'ORSTOM, pedology section. 1992;423-429.
28. WRB. World reference base for soil of resources. World soil resources reports N°106; 2014.
29. Koné B, Ettien JB, Amadji G. Characterisation of nERICA tolerance to mid-season drought in rainfed rice. African Crop Science Journal. 2008;16:2.
30. Henin S, Gras R, Monier G. The crop profile Masson and Cie, Paris. 1969;332.
31. Boyer J. Ferralitic soils, fertility factors and land use, Volume X, Eds. ORSTOM, Paris. 1982;384.
32. Tran TD. The role of the microstructure of clay soils in shrink-swell processes: From the scale of the test piece to the scale of the environmental chamber (Doctoral dissertation, Paris, ENMP); 2014.
33. Boyossoro KH, Kouamé KF, Saley BM. Climate insecurity and geohazards in Côte d'Ivoire: Study of the risk of soil erosion in the semi-mountainous region of Man (western Côte d'Ivoire). Science and Global Change / Drought. 2007;18(1):29-37.
34. Akanza KP. Effects of manures on fertility, yield components and diagnosis of soil deficiencies under cassava cultivation on Ferralsols in Côte d'Ivoire. Revue CAMES. 2015;3(1):9. ISSN 2424-7235.
35. Boa D. Characterisation, hydrodynamic properties, constraints and potentiality of gravel soils: Case of Booro-Borotou (Touba Region, North-West of Côte d'Ivoire). PhD thesis. University of Abidjan. 1986;131.
36. Yao-Kouamé A, Koné B, Gala Bi TJ. Morphopedological characterisation of eutrophic brown soils developed on West African Birimian volcano-sedimentary complexes in Blafo, Côte d'Ivoire. Africa Geoscience Review. 2011;18(1):23-32.
37. Nestor KYK, Fernand YG, Yves NK, Derving B, Achille A, Yao-Kouamé A. Macromorphological characteristics of soils developed on volcano-sedimentary bottoms in blafo-gueto (toumodi) in south-central Côte d'Ivoire. European Scientific Journal. 2013;9(9).
38. Koko LK, Kassin KE, Yoro G, Ngoran K, Assiri AA, Yao-Kouamé A. Correlations between early ageing of cocoa trees and morpho-pedological characteristics in southwestern Côte d'Ivoire. Journal of Applied Biosciences. 2009;24:12.
39. Yeboua K, Ballo K, Dembele O. Effect of restoration of a short duration fallow with *Chromolaena odorata* on soil structure under oil palm cultivation in Côte D'Ivoire. Bioterre, Rev. Inter. Sci. of Life and Earth. University Editions of Côte d'Ivoire. 2008;8:10.

40. N'Guessan KA, Diarrassouba N, Alui KA, Nangha KY, Fofana IJ, Yao-Kouame A. Indicators of physical soil degradation in northern Côte d'Ivoire: The case of Boundiali and Ferkessédougou. *Afrique Science. International Journal of Science and Technology*. 2015;11(3):115-128.
41. Landon. Remote heterogeneous database access system US patent. 1991;53.

© 2021 Antoine et al.; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Peer-review history:
The peer review history for this paper can be accessed here:
<https://www.sdiarticle4.com/review-history/70266>

RESUME

Pour étendre l'hévéaculture à des zones dites marginales, une étude de caractérisation au plan pédologique et agronomique des départements de Man, Toumodi et Prikro a été entreprise. Elle a été conduite, à travers une enquête diagnostique, la création et le suivi de plantations immatures, le suivi et la collecte de données agrophysiologiques de plantations matures. Cette étude a révélé l'engouement certain des populations pour l'hévéaculture avec plus de 900 plantations établies sur plus de 3000 ha. Sur le plan pédologique, il a été noté que les sols décrits à partir des profils pédologiques ont des aptitudes différentes. Les sols de Man et Prikro ont été de la classe des Ferralsols contrairement à ceux de Toumodi qui ont été des Cambisols. L'étude morphopédologique des sols a permis d'identifier quatre contraintes morphologiques à l'hévéaculture : i) l'induration à moins de 100 cm de profondeur, ii) le taux d'éléments grossiers supérieur à 50 % en haut de versant, iii) la texture sableuse et iv) l'hydromorphie au bas de versant. Les sols favorables à l'hévéa ont été observés sur les positions inférieures de mi-versant et de bas versant, exondés et non sableux. L'étude cartographique des sols a montré qu'à Man 18,4 % des sols sont d'aptitude culturale bonne à l'hévéaculture soit 38493 ha et ont principalement été localisés au sud-ouest, centre et centre-est. A Toumodi, 79299 ha soit 29,5 % de la localité ont présenté des aptitudes culturales bonnes à la culture de l'hévéa. Ils ont été répartis sur tout le territoire mais beaucoup plus condensés au sud, au centre et au nord. A Prikro, les sols dites à aptitude bonne ont concerné 46,9 % de la superficie totale soit 126657 ha et sont répartis sur toute l'étendue du territoire. La capacité de stockage de l'eau (CSE) a été significativement influencée par le site et la période d'observation, quelle que soit la partie de la zone d'étude. La réserve en eau des sols a été plus importante à Man et Prikro qu'à Toumodi. Les plants se sont mieux développés sur des sols à textures argileuses avec une bonne profondeur. Ainsi, les productions de Man et Prikro ont été les plus importantes avec respectivement 2300 et 1834 kg.ha⁻¹an⁻¹. Globalement, les plantations se sont bien établies avec un comportement agrophysiologique satisfaisant malgré un écart surmontable par rapport à celui des régions traditionnelles de culture. Dans les conditions pédoclimatiques actuelles, l'extension de l'hévéaculture pourrait se faire avec des clones résistants à la sécheresse. Ces clones devraient être associés, soit aux légumineuses arborées, soit aux bananiers, pour réduire leur taux de mortalité en période sèche.

Mots-clés : Caractérisation agro-pédologique, sol, extension, hévéaculture, zone marginale, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

To extend rubber cultivation to so-called marginal areas, a soil and agronomic characterization study of the departments of Man, Toumodi and Prikro was undertaken. It was conducted through a diagnostic survey, the creation and monitoring of immature plantations, the monitoring and collection of agrophysiological data from mature plantations. This study revealed the certain enthusiasm of the populations for rubber growing with more than 900 plantations established on more than 3000 ha. On the pedological level, it was noted that the soils described from pedological profiles had different aptitudes. The soils of Man and Prikro were of the Ferralsols class unlike those of Toumodi which were Cambisols. The morphopedological study of the soils identified four morphological constraints to rubber cultivation: i) induration at less than 100 cm depth, ii) coarse element content greater than 50% at the top of the slope, iii) sandy texture and iv) hydromorphy at the bottom of the slope. Soils favorable to rubber trees were observed on the lower positions of mid-slope and lower slope, exposed and not sandy. The cartographic study of the soils showed that in Man 18.4% of the soils are of good cultural suitability for rubber cultivation, ie 38,493 ha and were mainly located in the south-west, center and center-east. In Toumodi, 79,299 ha or 29.5% of the locality presented good cultural aptitudes for the cultivation of rubber. They were distributed throughout the territory but much more condensed in the south, center and north. In Prikro, the so-called good suitability soils concerned 46, 9% of the total area is 126657 ha and are spread over the entire extent of the territory. The water storage capacity (CSE) was significantly influenced by the site and the observation period, regardless of the part of the study area. The soil water reserve was greater in Man and Prikro than in Toumodi. Plants grew best on clay-textured soils with good depth. Thus, the productions of Man and Prikro were the most important with respectively 2300 and 1834 kg.ha⁻¹year⁻¹. Overall, the plantations have established themselves well with satisfactory agrophysiological behavior despite a surmountable gap compared to that of traditional growing regions. Under current pedoclimatic conditions, the extension of rubber cultivation could be done with clones resistant to drought. These clones should be associated, either with tree legumes or with banana trees, to reduce their mortality rate during the dry period.

Keywords: Agro-pedological characterization, soil, extension, rubber farming, marginal zone, Ivory Coast.