



**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 : 2021-2022

N° D'ORDRE : 058

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et foresterie tropicale

Spécialité : Agro-Pédologie

**Impact de la fertilisation minérale sur l'activité
biologique et le stock de carbone dans les sols sous
cacaoyers au Centre-Sud et Sud-Ouest de la Côte
d'Ivoire**

CANDIDAT

Nom : KOUADIO

Prénoms : Koffi Hypolith

JURY

**Président : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Directeur : M. BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Rapporteur : M. ZO-BI Irié Casimir, Maître de Conférences,
Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny**

**Examineurs : M. CAMARA Mameri, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)**

**Mme. YAPO Sopia Edwige-Salomé, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Soutenue publiquement
le : 24 Septembre 2022**



**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 : 2021-2022

N° D'ORDRE : 058

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et foresterie tropicale

Spécialité : Agro-Pédologie

**Impact de la fertilisation minérale sur l'activité
biologique et le stock de carbone dans les sols sous
cacaoyers au Centre-Sud et Sud-Ouest de la Côte
d'Ivoire**

CANDIDAT

Nom : KOUADIO

Prénoms : Koffi Hypolith

JURY

**Président : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Directeur : M. BAKAYOKO Sidiky, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Rapporteur : M. ZO-BI Irié Casimir, Maître de Conférences,
Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny**

**Examineurs : M. CAMARA Mameri, Directeur de Recherche,
Centre National de Recherche Agronomique (CNRA)**

**Mme. YAPO Sopia Edwige-Salomé, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Soutenue publiquement
le : 24 Septembre 2022**

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	vi
AVANT-PROPOS	vii
REMERCIEMENTS	ix
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES.....	xvi
LISTE DES ANNEXES.....	xix
INTRODUCTION.....	1
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	6
1.1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	7
1.1.1. Synthèse bibliographique sur le cacaoyer	7
1.1.1.1. Origine et aire géographique du cacaoyer (<i>Theobroma cacao</i> L.).....	7
1.1.1.1.1. Origine du cacaoyer	7
1.1.1.1.2. Aire de distribution du cacaoyer dans le monde	7
1.1.1.2. Description et diversité génétique du cacaoyer.....	8
1.1.1.2.1. Description du cacaoyer	8
1.1.1.2.2. Diversité génétique du cacaoyer	10
1.1.1.3. Exigences écologiques du cacaoyer	11
1.1.1.4. Importance de la production du cacao en Côte d'Ivoire	12
1.1.1.5. Système de culture du cacaoyer en Côte d'Ivoire	13
1.1.1.5.1. Système de cacaoculture extensif.....	13
1.1.1.5.2. Système de cacaoculture intensif	13
1.1.2. Notions de fertilisation minérale	14
1.1.2.1. Définition	14
1.1.2.2. Principes de la fertilisation.....	14
1.1.2.3. Différents types d'engrais minéraux et leurs origines	15
1.1.2.4. Éléments nutritifs du cacaoyer	16
1.1.2.5. Importance de la fertilisation minérale du cacaoyer	17
1.1.2.6. Conséquences de l'apport de fumure minérale	19
1.1.3. Notion d'activité biologique dans les sols.....	20
1.1.3.1. Indicateurs de l'activité biologique du sol	21
1.1.3.1.1. Bio-indicateurs microbiologiques	21
1.1.3.1.2. Bio-indicateurs faunistiques	21
1.1.3.2. Fonctions et services écosystémiques de la pédofaune.....	23
1.1.3.2.1. Actions sur la structure du sol	23

1.1.3.2.2. Rôle de la pédofaune dans la décomposition de la matière organique.....	25
1.1.3.3. Facteurs affectant la population et l'activité des organismes du sol	25
1.1.3.3.1. Facteurs naturels.....	26
1.1.3.3.2. Facteurs anthropiques.....	27
1.1.4. Notion de stockage de carbone du sol	29
1.1.4.1. Définition	29
1.1.4.2. Cycle du carbone organique du sol	30
1.1.4.3. Dynamique du carbone organique dans les sols.....	31
1.1.4.4. Puits de carbone	32
1.1.4.5. Facteurs influençant le stockage de carbone dans les sols	32
1.1.4.5.1. Facteurs naturels.....	32
1.1.4.5.2. Facteurs anthropiques.....	33
1.1.4.6. Différentes approches de mesure du carbone du sol	34
Conclusion partielle.....	35
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES	36
2.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA ZONE D'ETUDE.....	37
2.1.1. Localisation géographique	37
2.1.2. Climat	37
2.1.3. Végétation	39
2.1.5. Géologie	39
2.1.6. Sol.....	40
Conclusion partielle.....	41
2.2. MATÉRIEL.....	42
2.2.1. Matériel végétal.....	42
2.2.2. Matériel édaphique	42
2.2.3. Matériel chimique	42
2.2.4. Matériel technique.....	43
2.3. MÉTHODES	45
2.3.1. Choix des parcelles cacaoyères	45
2.3.2. Dispositif expérimental et application des engrais utilisés	45
2.3.3. Choix des doses d'engrais, périodes d'épandage et mode d'application	47
2.3.4. Entretien des parcelles.....	47
2.3.5. Collecte des données	48

2.3.5.1. Phase de terrain	48
2.3.5.1.1. Donnée climatique.....	48
2.3.5.1.2. Caractéristiques morpho-pédologiques	48
2.3.5.1.3. Humidité volumique du sol	49
2.3.5.1.4. Température du sol.....	50
2.3.5.1.5. Echantillonnage de la macrofaune du sol.....	51
2.3.5.1.6. Collecte de données sur la quantité et la vitesse de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers.....	52
2.3.5.1.7. Echantillonnage pour la mesure du stock de carbone dans le sol	53
2.3.5.2. Phase de laboratoire.....	54
2.3.5.2.1. Détermination de la matière sèche des échantillons des litières de feuilles de cacaoyers et des vitesses de décomposition.	54
2.3.5.2.2. Détermination des propriétés physiques	55
2.3.5.2.3. Détermination des propriétés chimiques	55
2.3.6. Analyse statistique des données	57
Conclusion partielle.....	58
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION	59
3.1. RÉSULTATS	60
3.1.1. Caractéristiques climatique et pédoclimatique des sites d'étude	60
3.1.1.1. Pluviométrie	60
3.1.1.2. Humidité et température des sols dans la Nawa.....	60
3.1.1.3. Humidité et température des sols dans le Lôh-Djiboua	61
3.1.2. Caractéristiques morphologiques des sols des sites d'étude	65
3.1.2.1. Caractéristiques morphologiques des sols de la Nawa.....	65
3.1.2.2. Caractéristiques morphologiques des sols du Lôh-Djiboua.....	65
3.1.3. Caractéristiques physiques et chimiques des sols des sites d'étude.....	66
3.1.3.1. Caractéristiques physiques des sols de la Nawa.....	66
3.1.3.2. Caractéristiques physiques des sols du Lôh-Djiboua.....	67
3.1.3.3. Caractéristiques chimiques des sols de la Nawa	68
3.1.3.4. Caractéristiques chimiques des sols du Lôh-Djiboua	69
3.1.4. Production de litière de feuilles de cacaoyers	70
3.1.4.1. Cas des cacaoyères de la région de la Nawa	70
3.1.4.2. Cas des cacaoyères de la région du Lôh-Djiboua	72
3.1.5. Espèces fauniques recensées sur les sites d'étude.....	75

3.1.5.1. Cas des sites de la région de la Nawa.....	75
3.1.5.2. Cas des sites de la région du Lôh-Djiboua.....	76
3.1.6. Effets de la fertilisation minérale sur la macrofaune du sol.....	79
3.1.6.1. Effet de la fertilisation minérale sur la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols de la Nawa	79
3.1.6.2. Effet de la fumure minérale sur la densité et la diversité de la macrofaune des sols du Lôh-Djiboua	81
3.1.6.3. Cas particulier de l'effet de la fumure minérale sur la densité des vers de terre.....	82
3.1.6.4. Effet de la fumure minérale sur l'évolution de la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols de la Nawa	84
3.1.6.5. Effet de la fumure minérale sur l'évolution de la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols du Lôh-Djiboua.....	86
3.1.7. Effet de la fertilisation minérale sur l'activité biologique du sol.....	87
3.1.7.1. Effet de la fertilisation minérale sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa.....	87
3.1.7.2. Effet de la fumure minérale sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua	90
3.1.8. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers	92
3.1.8.1. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa	92
3.1.8.2. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua.....	93
3.1.9. Effet de la fumure minérale sur le stock de carbone du sol	96
3.1.9.1. Stock de carbone des sols en fonction des traitements dans la Nawa.....	96
3.1.9.2. Stock de carbone des sols en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.....	96
3.1.9.3. Stock de carbone des sols en fonction des sites dans la Nawa.....	97
3.1.9.4. Stock de carbone des sols en fonction des sites dans le Lôh-Djiboua	97
3.1.10. Relation entre les traitements et les groupes taxonomiques.....	99
3.1.10.1. Cas de la région de la Nawa	99
3.1.10.2. Cas de la région du Lôh-Djiboua	100
3.1.11. Relations entre traitements, décomposition de litière, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol.....	102
3.1.11.1. Relations entre traitements, activité biologique, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol dans la Nawa	102
3.1.11.2. Relations entre traitements, décomposition de litière, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol dans le Lôh-Djiboua.....	103

3.1.12. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol.....	104
3.1.12.1. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans la Nawa	104
3.1.12.2. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans le Lôh-Djiboua.....	104
3.1.13. Discrimination des sources et des formulations des fertilisants minéraux.....	108
3.1.13.1. Cas de la région de la Nawa	108
3.1.13.2. Cas de la région du Lôh-Djiboua	109
3.2. DISCUSSION	112
3.2.1. Effet de la fertilisation minérale sur la densité de la macrofaune du sol, sa diversité et son évolution à court et moyen termes	112
3.2.2. Effet de la fertilisation minérale sur la vitesse de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers	115
3.2.3. Effet de la fertilisation minérale sur le stock de carbone dans le sol	117
CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	120
CONCLUSION	121
PERSPECTIVES	122
RÉFÉRENCES	124
ANNEXES	xx

DÉDICACE

C'est, avant tout, à Dieu mon Père miséricordieux, à qui il a plu que je réalise ce travail, que cette thèse est dédiée.

Ce travail est ensuite dédié à M. KASSIN Koffi Emmanuel et M. KOTAIX Acka Jacques Alain, en reconnaissance de leur soutien moral tout au long de ce travail, à mon père, ESSEY Kouadio, à qui l'honneur revient de voir son fils, atteindre ce niveau intellectuel, et à ma mère, feu KONAN Amenan Solange, rappelée à Dieu le 30 Août 2016.

Cette thèse est aussi dédiée à ma grande soeur KOUADIO Affoué Brigitte et à ma petite soeur KOFFI Amino Anna, pour leurs incessantes prières à Dieu pour que je réussisse dans ce projet de Thèse de Doctorat.

Enfin, je voudrais dédier ce travail à tous ces hommes de Dieu qui m'ont soutenu spirituellement en intercédant pour moi auprès du Tout-Puissant pour que je trouve grâce à ses yeux.

AVANT-PROPOS

L'aboutissement de cette thèse a été possible grâce aux appuis techniques et financiers de plusieurs institutions. Il s'agit de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, particulièrement l'Unité de Formation et de Recherche en Agroforesterie (UFR-Agroforesterie), du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) et de l'industrie de l'engrais, notamment l'Office Chérifien du Phosphate (OCP-Africa). Outre l'appui technique et financier de ces institutions, ce travail de recherche a été marqué par une franche collaboration avec le monde paysan. En effet, les paysans ont contribué foncièrement et humainement, en mettant à ma disposition, des portions de leur patrimoine foncier pour la réalisation des essais et en consacrant de leur temps pour me faire des observations constructives. Ils ont accepté l'application stricte de l'itinéraire technique que nécessitaient nos expérimentations au détriment de leurs pratiques habituelles.

Ce travail de recherche fait suite à l'élaboration d'une nouvelle carte des sols des régions de cacaoculture du pays à la demande de l'**Initiative pour l'engrais cacao** à travers l'**Initiative pour la Durabilité du Commerce** (IDH). L'Initiative pour l'engrais cacao est un groupement public-privé qui vise à restaurer la fertilité des sols dans les régions de cacaoculture de la Côte d'Ivoire afin d'assurer la viabilité à long terme de l'industrie nationale du cacao. Or le paysage du cacao en Côte d'Ivoire a profondément changé en ce qui concerne la localisation et l'âge des exploitations. Une cartographie des sols actualisée, permettra à la filière café-cacao de fournir aux planteurs des directives précises sur les engrais nécessaires à l'amélioration des sols qu'ils cultivent et à l'obtention d'un rendement de culture plus important. C'est dans cette optique que de nouvelles formules d'engrais cacao ont été proposées par région de production. Avant leur promotion par les industries d'engrais, des essais de validation ont néanmoins été nécessaires. Le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) ayant à charge cette activité, a jugé utile de conduire des recherches sur la durabilité environnementale de ces engrais cacao outre la production et la rentabilité des exploitations cacaoyères.

La durée de ces essais de validation a nécessité 3 années. C'est également dans cette fourchette de temps qu'a duré l'expérimentation sur la durabilité de ces engrais cacao.

Dans une étude d'impact sur l'environnement, le pas de temps étant un facteur très important à considérer, le nôtre pourrait ne pas être suffisant pour déceler certains résultats attendus.

C'est pourquoi, les résultats de cette étude doivent être considérés comme un prélude à la connaissance de la durabilité environnementale des engrais minéraux issus du diagnostic sol.

En présentant ce document, nous espérons contribuer à lutter contre la dégradation des sols agricoles, caractérisés par la perte de diversité biologique et le faible stockage du carbone organique dans ces sols. Cette thèse donne des résultats succincts et clairs de l'impact du mode de gestion de la fertilité des sols agricoles, à travers l'usage des fertilisants minéraux.

REMERCIEMENTS

Je ne peux présenter ce travail de Thèse de Doctorat, sans exprimer ma gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation. Je souhaiterais, avant tout, remercier :

- Professeur TIDOU Abiba Sanogo, Épouse KONÉ, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, pour avoir autorisé mon inscription dans l'institution qu'elle dirige ;
- Docteur YTÉ Yomgbé, Directeur général du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), pour m'avoir accepté comme stagiaire dans cette structure de recherche mondialement reconnue ;
- Professeur KONE Tidiani, Vice-président chargé de la pédagogie, de la Vie Universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique, pour le travail qu'il abat pour la formation des étudiants.
- Professeur AKAFFOU Doffou Sélastique, Vice-Président chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures de l'UJLoG, pour le travail qu'il abat pour la formation des étudiants.

J'associe à ces remerciements Docteur TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Directrice de l'UFR Agroforesterie qui a accepté mon intégration dans l'Unité de Formation et de Recherche qu'elle dirige et Docteur AYOLIÉ Koutoua, Maître de Conférences, Responsable du laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole, cadre de réalisation de cette recherche.

Au Professeur BAKAYOKO Sidiky qui a assuré la direction scientifique de cette thèse, j'exprime mon infinie gratitude. Malgré, ses multiples occupations, sa sollicitude pour les questions administratives n'a jamais failli. Il a toujours facilité mon inscription à l'université en s'investissant personnellement. Aussi a-t-il permis en un temps record la finalisation de ce mémoire en instruisant toute l'équipe de pédologie de l'UFR Agroforesterie de rester à mon écoute.

Mes sincères remerciements aux membres du jury :

- Monsieur DONGUI Bini Kouamé, Professeur titulaire, pour avoir accepté de présider le jury ;
- Monsieur ZO-BI Irié Casimir, Maître de Conférences, pour avoir accepté d'instruire ce mémoire et de faire parti du jury en tant que rapporteur ;

- Monsieur CAMARA Mameri, Directeur de recherche, CNRA, pour avoir accepté de prendre part au jury en tant qu'examineur ;
- Madame YAPO Sopie Edwige-Salomé, Maître de Conférences, pour avoir accepté de prendre part au jury en tant qu'examinatrice.

Il me plaît de remercier très sincèrement Docteur SORO Dogniméton, Maître de Conférences, Chef du service de la pédagogie et Docteur ZRO Bi Gohi Ferdinand, Maître de Conférences, Directeur du département d'Agro-pédologie de l'UJLoG, pour avoir contribué à l'amélioration de cette thèse. Ces remerciements vont aussi aux Docteurs GUÉI Arnauth Martinez, KONATÉ Zoumana, ABOBI Akré Hebert Damien, N'GANZOUA Kouamé René, BAYALA Roger, KONAN Kouamé Firmin et KOUAME Amany Guillaume, pour leur contribution remarquable à la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier aussi très sincèrement :

- Docteur KOTAIX Acka Jacques Alain, encadrant de ce mémoire au CNRA, pour s'être engagé corps et âme dans l'accomplissement de ce travail. En effet, Docteur KOTAIX Acka Jacques Alain a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour réaliser les travaux ;
- Docteur KASSIN Koffi Emmanuel, qui a proposé le thème de la présente étude et qui, ensuite, m'a orienté à l'UJLoG en sollicitant l'encadrement scientifique de Professeur BAKAYOKO Sidiky.

Que Professeur TRAORÉ Karidia, anciennement Directrice de l'UFR Agroforesterie qui s'était impliquée personnellement pour que j'obtienne l'autorisation d'inscription en thèse à UJLoG trouve ici la preuve de ma reconnaissance.

Je ne saurais oublier :

- Docteur TAHI Gnion Mathias, Directeur de la station du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Divo, qui m'a toujours considéré comme un chercheur ;
- Docteur KOKO Louis Anselme et le groupe OCP Africa, pour avoir initié et financé le projet qui a été l'objet de notre thèse ;
- Docteur N'DOUFFOU Gnosseith Huberson Claver, pour les conseils prodigués et pour son soutien financier tout au long de cette Thèse de Doctorat ;

- M. AÏDARA Sékou, dont l'enseignement sur les analyses statistiques m'a permis de traiter avec aisance les informations recueillies sur le terrain ;
- Docteurs KOULIBALY Klotioma, ASSI Evelyne, GUIRAUD Brigitte, GOGBÉ Françoise, KOUAMÉ N'Dri Norbert et N'GUESSAN Wallet Pierre, tous chercheurs au programme cacao au CNRA, pour leurs conseils avisés ;
- Et tous les stagiaires qui travaillent sans relâche au centre de calcul du CNRA pour parfaire les mémoires ; ce sont : M. YAYA Ouattara, M. CAUDOU Trébissou, M. Mahama Ouattara, M. ÉHOUNOU Jean-Noël, M. TCHÉRÉWA Stanislas, M. KOUAKOU Koffi Stanislas, M. KOUAKOU Ives Maturin, M GORÉ-BI Firmin, Mme TCHÉRÉWA Yapi Diane, Mlle ASSO Ohouo Bernadette, Mlle OKAYO Minakou Sandrine.

Ma reconnaissance va l'égard des producteurs qui ont mis à ma disposition leurs parcelles pour la réalisation de cette étude. Je veux citer : M. WOLLET Célestin, M. GIGBE Didiga Benjamin, M. BOBIA Okehi, M. PAFORNAME Souleymane, M. SERY Dagou williams et M. GNIEPA Touagui Michel.

A messieurs MILOGO Narcisse, KUILBI Hamidou et GRAH Mabo Innocent, techniciens au programme cacao du CNRA, je leur réitère mes remerciements pour le travail effectué lors de cette thèse.

Enfin je remercie, la grande famille ESSEY, en particulier mon père ESSEY Kouadio pour sa contribution morale et financière.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACP	: Analyse en Composantes Principales
ADN	: Acide DésoxyriboNucléique
AFC	: Analyse Factorielle des Correspondances
AFD	: Analyse Factorielle Discriminante
ANOVA	: Analyse de Variance
C	: Carbone
CCC	: Conseil du Café-Cacao
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CEDEAO	: Communauté Economique Des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CILSS	: Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
COP-21	: Conférence de Paris sur le climat pour l'année 2021
COS	: Carbone Organique du Sol
FAO	: Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GES	: Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLM	: Modèle Linéaire Généralisé
Gt	: Gigatonne
GtC	: Gigatonne de carbone
ICCO	: Organisation Internationale du Cacao
ICRAF	: Centre International de Recherche en Agroforesterie
IDH	: Initiative pour la Durabilité du Commerce
IFDC	: Centre International pour le Développement des Fertilisants
IIFA	: Association internationale de l'industrie des engrais
INS	: Institut National de la Statistique
MOS	: Matière Organique du Sol
N	: Azote
OCP	: Office Chérifien du Phosphate
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
OPVT	: Observatoire Participatif des Vers de Terre
Pass	: Phosphore assimilable
PIB	: Produit Intérieur Brut

p	: p-value
Pg	: Picogramme
RP	: Phosphate réactif
S	: Somme des bases échangeables ou cations échangeables
SAS	: Système d'Analyse Statistique
SODEFOR	: Société de Développement des Forêts
TDR	: Réflectométrie dans le Domaine Temporaire
TSP	: Triple Super Phosphate
UNIFA	: Université de Fondation Dr Aristide
USAID	: Agence des Etats Unis pour le Développement Internationale
USDA	: Agence des Etats Unis pour le Développement des Sols
V	: Taux de saturation en bases échangeables
WRB	: Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques optimales d'un sol pour la culture du cacaoyer.....	12
Tableau II : Eléments minéraux essentiels à la croissance des cacaoyers.....	17
Tableau III : Caractéristiques chimiques des turricules et des horizons 0 - 20 et 20 - 40 cm du sol	24
Tableau IV : Liste de matériel technique utilisé	44
Tableau V : Traitements effectués	46
Tableau VI : Types et doses d'engrais appliqués par zone agroécologique.....	47
Tableau VII : Espèces fauniques recensées dans la région de la Nawa et leur répartition par site	77
Tableau VIII : Espèces fauniques recensées dans la région du Lôh-Djiboua et leur répartition	78
Tableau IX : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Soubré	84
Tableau X : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Méagui.....	85
Tableau XI : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Mayo.....	85
Tableau XII : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Divo.....	86
Tableau XIII : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Lakota	87
Tableau XIV : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Guitry	87
Tableau XV : Taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa en fonction des séquences périodiques	94
Tableau XVI : Taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua en fonction des séquences périodiques.....	95
Tableau XVII : Stock de carbone en $gC.m^{-2}$ en fonction des traitements dans la Nawa	96
Tableau XVIII : Stocks de carbone en $gC.m^{-2}$ en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua	97
Tableau XIX : Stocks de carbone en $gC.m^{-2}$ en fonction des sites dans la Nawa.....	98
Tableau XX : Stocks de carbone en $gC.m^{-2}$ en fonction des sites dans le Lôh-Djiboua.....	98
Tableau XXI : Résultat de la corrélation de Spearman entre vitesse de décomposition de la litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques des sols dans la Nawa.....	106

Tableau XXII: Résultat de la corrélation de Spearman entre vitesse de décomposition de la litière, variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques des sols dans le Lôh-Djiboua 107

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Zones de production et principaux pays producteurs de cacao dans le monde.	8
Figure 2 : Schéma descriptif d'un cacaoyer issu de semence	9
Figure 3 : Schémas de la fleur et du fruit du cacaoyer	10
Figure 4 : Aspect de 3 espèces de cacao cultivées	11
Figure 5 : Illustration de la loi de Mitscherlich	15
Figure 6 : Impact de la fertilisation sur le rendement des cacaoyers avec ou sans ombrage source	19
Figure 7: Différentes catégories écologiques de lombricien	22
Figure 8 : Exemples d'insectes sociaux terricoles sous cacaoyère.	23
Figure 9 : Cycle du carbone du sol.....	31
Figure 10 : Cartes de la Côte d'Ivoire et des régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua présentant les sites d'étude	38
Figure 11 : Fertilisants minéraux utilisés	43
Figure 12 : Dispositif expérimental en bloc de Fisher	46
Figure 13 : Détermination de l'humidité et de la température du sol	50
Figure 14 : Méthode d'échantillonnage de la macrofaune du sol	51
Figure 15 : Pose de cadre grillagé sur une placette de 1 m ²	53
Figure 16 : Variabilité pluviométrique des régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua au cours des années 2018, 2019 et 2020	60
Figure 17 : Humidité et température des sols de la région de la Nawa.....	63
Figure 18 : Humidité et température des sols de la région du Lôh-Djiboua	64
Figure 19 : Profils pédologiques des sols de la Nawa.....	65
Figure 20 : Profils pédologiques du Lôh-Djiboua.....	66
Figure 21 : Litières de feuilles de cacaoyers produites semestriellement en fonction des traitements dans la Nawa.....	71
Figure 22 : Litières de feuilles de cacaoyers produites en fonction des traitements durant 30 mois dans la Nawa.....	72
Figure 23 : Litières de feuilles cacaoyers produites semestriellement en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.	74
Figure 24 : Litières de feuilles de cacaoyers produites en fonction des traitements durant 30 mois dans le Lôh-Djiboua	75
Figure 25 : Densité de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans la Nawa	79

Figure 26 : Richesse spécifique de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans la Nawa.....	80
Figure 27 : Valeurs de l'indice de Shannon en fonction des traitements dans la Nawa	80
Figure 28 : Densité de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua	81
Figure 29 : Richesse spécifique de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua	82
Figure 30 : Valeurs de l'indice de Shannon en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.....	82
Figure 31 : Densité des vers de terre en fonction des traitements dans la Nawa	83
Figure 32 : Densité des vers de terre en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.....	83
Figure 33 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois à Soubré, Méagui et Mayo.	89
Figure 34 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois dans la Nawa	90
Figure 35 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois à Divo, Lakota et Guitry.....	91
Figure 36 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois dans le Lôh-Djiboua.	92
Figure 37 : ACP réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa.....	99
Figure 38 : AFC réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa.....	100
Figure 39 : ACP réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.	101
Figure 40 : AFC réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.	101
Figure 41 : ACP réalisée à partir des traitements, des variables caractéristiques de la macrofaune, de l'activité biologique et du stock de carbone du sol dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa.	102
Figure 42 : ACP réalisée à partir des traitements, des variables caractéristiques de la macrofaune, de l'activité biologique et du stock de carbone du sol dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.....	103

Figure 43 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologiques et du stock de carbone du sol et AFD des sources des fertilisants minéraux dans la région de la Nawa.	109
Figure 44 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol et AFD des formulations des fertilisants minéraux dans la région de la Nawa.....	109
Figure 45 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol et AFD des sources des fertilisants minéraux dans la région du Lôh-Djiboua.	111
Figure 46 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol et AFD des formulations des fertilisants minéraux dans la région du Lôh-Djiboua.	111

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de description de profil pédologique	xxi
Annexe 2 : Méthode de détermination de la texture du sol	xxii
Annexe 3 : Dispositifs expérimentaux sur les différents sites.....	xxiii
Annexe 4 : Frise temporelle des activités de collectes de données.....	xxv
Annexe 5 : Fiche de collecte de données sur la macrofaune du sol.....	xxvi
Annexe 6 : Méthodes de collecte de données de la macrofaune du sol et de la litière de feuilles de cacao.....	xxvii
Annexe 7 : Quelques représentants de la macrofaune recensés sur les différents sites d'étude.....	xxviii
Annexe 8 : Caractéristiques d'une intense activité biologique du sol	xxix
Annexe 9 : Décomposition de la litière de feuilles de cacao.....	xxx
Annexe 10 : Description des sols de la région de la Nawa.....	xxxi
Annexe 11: Description des sols de la région du Lôh-Djiboua.....	xxvi
Annexe 12 : Caractéristiques physiques des sols de la Nawa.....	xl
Annexe 13 : Caractéristiques physiques des sols du Lôh-Djiboua.....	xli
Annexe 14 : Caractéristiques chimiques des sols de la Nawa.....	xlii
Annexe 15 : Caractéristiques chimiques des sols du Lôh-Djiboua.....	xliii

INTRODUCTION

La séquestration du carbone se définit comme un processus correspondant à un stockage de carbone dans le système sol-plante qui contribue à atténuer les émissions de gaz à effet de serre, responsable du changement climatique (Sperow *et al.*, 2003 ; Chenu *et al.*, 2014). On estime que les sols peuvent stocker plus de 10 % des émissions anthropiques (Metz *et al.*, 2005). La séquestration du carbone est donc un service écosystémique permettant la régulation du climat (Janzen, 2006). En outre, la séquestration du carbone a des liens avec beaucoup d'autres services, notamment le contrôle de l'érosion et le maintien de la biodiversité. En effet, la matière organique du sol joue un important rôle dans l'approvisionnement en nutriments pour la plante, l'amélioration de la capacité d'échange cationique et la stabilité structurale des sols et même de source d'énergie pour la biodiversité (Bunker *et al.*, 2005). Aussi, la séquestration du carbone est-elle fortement dépendante de l'abondance, de la diversité et de l'activité de la faune et des microorganismes du sol en ce sens que les organismes du sol agissent à la fois sur les mécanismes de protection du carbone (protection physique dans les agrégats, protection chimique par la libération de molécules récalcitrantes) et de la minéralisation de matières organiques (Ouedraogo *et al.*, 2005 ; Lavelle *et al.*, 2006 ; Kibblewhite *et al.*, 2008). Une optimisation des matières organiques des sols apparaît donc comme une mesure centrale de durabilité des agrosystèmes susceptibles d'améliorer les productions agricoles (West & Post, 2002 ; FAO, 2013). C'est ainsi que, le stockage de carbone et l'activité biologique dans les sols agricoles font l'objet d'une attention particulière de la part du monde de la recherche aujourd'hui.

L'agriculture constitue pour la majorité des pays Africains la base de leur économie. De ce fait, pour booster leur économie, la plupart de ces pays ont adopté un système d'exploitation agricole extensif pour la mise en place des principales cultures de rente. Ce système d'exploitation n'est pas sans conséquence sur le patrimoine forestier réputé pour sa haute capacité à séquestrer le carbone (Norris *et al.*, 2010 ; Gockowski & Sonwa, 2011). Des études détaillées, fondées sur des données satellitaires, mettent en évidence la responsabilité majeure de l'agriculture dans la déforestation en Afrique, occasionnant la dégradation des sols (CILSS, 2016). Les pratiques culturelles inappropriées associées aux événements climatiques extrêmes (sécheresses, baisse de la pluviosité, températures extrêmes) modifient la croissance végétale et la dynamique des matières organiques, et accentuent les problèmes de dégradation des sols, notamment ceux qui ont été défrichés pour y pratiquer l'agriculture ou le pâturage (Jagoret, 2011). Ces dégradations se traduisent par des phénomènes d'érosion hydrique et éolienne, d'acidification et de salinisation, par de fortes diminutions de la teneur en carbone et éléments nutritifs et de la

biodiversité qui affecte la production et le rendement agricole (Six *et al.*, 2004). Le taux de dégradation des sols varie selon les études et les formes prises en compte. Sans tenir compte des terres non-productives (déserts, étendues salées, lacs et reliefs escarpés), on peut estimer que 22 % des sols du continent africain sont dégradés (Jones *et al.*, 2013).

La Côte d'Ivoire, première productrice mondiale de fèves de cacao, n'échappe pas à la réduction drastique des ressources forestières du fait des pratiques agricoles. En effet, elle exploite plus de 2 millions d'hectares de ses terres cultivables pour la cacaoculture dont plus des 2/3 ont été mis en place suivant le modèle extensif sur fronts pionniers (Ruf & Zadi, 1998 ; CCC, 2017). Avec l'avènement des changements climatiques et la dégradation des sols suivie de la baisse de la fertilité des sols et/ou doublé du vieillissement du verger cacaoyer, on assiste de plus en plus à une baisse considérable des rendements de cacaoyer dans les principales régions productrices en Côte d'Ivoire (Kébé, 2003 ; Brou *et al.*, 2005 ; Assiri, 2007 ; Koko, 2008 ; N'Guessan, 2013 ; Kouakou, 2014). La cacaoculture ivoirienne pilier de son économie se trouve ainsi menacée.

Pour faire face au défi d'améliorer la production du cacaoyer tout en préservant l'environnement et les ressources naturelles, il convient, soit d'initier de nouvelles techniques culturales (fertilisation des sols) et/ou la sélection de variétés améliorées plus productives entreprises par la recherche-développement, soit d'augmenter les superficies de terres mises en valeur pour la cacaoculture. Or, dans le contexte actuel des changements de climat et de dégradation des conditions environnementales, aucune des régions productrices du cacao n'est capable de supporter une augmentation significative des superficies dévolues à la cacaoculture. Aussi, la dégradation avancée des sols destinés à la cacaoculture et leur état d'appauvrissement en nutriments essentiels (l'azote, le phosphore et le potassium) font que la nécessité d'améliorer la productivité des cacaoyers par l'intermédiaire de la fertilisation des sols agricoles existants devient un objectif primordial, évident et urgent (Kassin *et al.*, 2016 ; N'Guessan, 2017).

En effet, la fertilisation minérale des sols a l'avantage de mettre à la disposition des plantes des nutriments directement assimilables. Elle constitue de ce fait la principale voie d'apport rapide de nutriments qui permettrait de garantir la production à court, moyen et long terme (Schöl, 1998). Cependant, leur apport continu peut causer l'altération des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Boli & Roose, 2000 ; Chen *et al.*, 2001 ; Bado, 2002 ; Strudley *et al.*, 2008 ; Cakmak *et al.*, 2010 ; Akanbi *et al.*, 2014 ; Crusciol *et al.*, 2016). En outre, les systèmes cacaoyers dépendant de produits agrochimiques synthétiques constituent

des menaces pour la santé des sols, des animaux et des humains et leur durabilité est discutable (Barrios *et al.*, 2015). Aussi, l'utilisation de ces produits agrochimiques de synthèse peut modifier les caractéristiques du sol et constituent une menace pour les processus de décomposition de la matière organiques (Domínguez *et al.*, 2014 ; Barrios *et al.*, 2015). Vu que les pratiques agricoles visant à maintenir la fertilité des sols sous cacaoyers s'orientent de plus en plus vers la fertilisation minérale (Ruf *et al.*, 2014 ; IFDC, 2015), des engrais minéraux ont été formulés selon la méthode diagnostic sol par la recherche - développement (Kassin *et al.*, 2016) dans le but est d'adapter la formule d'engrais au contexte pédoclimatique précis de la parcelle. Ainsi, on peut éviter les fertilisations inadaptées qui dégradent les sols et par voie de conséquence l'écologie et l'environnement (Barrios *et al.*, 2015). Si de nombreux travaux indiquent que la fertilisation minérale est nécessaire pour accroître les rendements (Uribe *et al.*, 2001 ; Koudjega & Tossah, 2009 ; Koko *et al.*, 2011 ; Koko, 2014 ; Kotaix *et al.*, 2021), rares sont ceux qui traitent de son impact sur le stockage du carbone et l'activité biologique du sol (Gryndler *et al.*, 2006 ; Cakmak *et al.*, 2010). C'est dans ce contexte que l'Office Chérifien du Phosphate (OCP), industrie d'engrais, en collaboration avec le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), mènent des investigations sur la durabilité des engrais formulés par la méthode diagnostic sol suite à la cartographie des sols en zone de production cacaoyère en Côte d'Ivoire. L'objectif de cette étude vise à identifier des fertilisants minéraux susceptibles d'enrichir les sols sous cacaoyers, d'impacter positivement l'activité biologique et le stockage de carbone du sol. De façon spécifique, l'étude vise à :

- déterminer l'effet de la fertilisation minérale sur l'abondance de la macrofaune du sol sous cacaoyers, sa diversité et son évolution à court et moyen termes ;
- déterminer l'effet de la fertilisation minérale sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers ;
- déterminer l'effet de la fertilisation minérale sur le stock de carbone dans les sols sous cacaoyers.

Les tests d'engrais minéraux sur les sols sous cacaoyers sont fondés sur les hypothèses suivantes:

- une fertilisation minérale adaptée au contexte pédoclimatique des cacaoyères favorise, à travers l'amélioration du pH et de la production des litières, la prolifération de la macrofaune des sols ;

- l'engrais minéral NPK suscitant une forte activité biologique par son enrichissement en cations basiques favorise la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer ;
- une bonne pratique de la fertilisation minérale par sa contribution à la production d'abondante litière de cacaoyer augmente le stock de carbone dans les sols.

La présente thèse comporte trois grandes parties :

- la première partie est consacrée aux généralités sur le cacaoyer et sur les notions de fertilisation minérale, d'activité biologique du sol et de stock de carbone sol.
- la deuxième partie intitulée matériel et méthodes situe le cadre de l'étude, présente l'ensemble du matériel utilisé et décrit la méthodologie mise en œuvre pour réaliser l'étude ;
- la troisième partie traite des résultats obtenus et de leur discussion. Une conclusion générale, assortie de recommandations et de perspectives, ainsi qu'une liste de références bibliographiques et des annexes complètent le document.

PREMIÈRE PARTIE :
GÉNÉRALITÉS

1.1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

La cacaoculture est l'une des cultures d'exportation en Afrique de l'Ouest et la principale en Côte d'Ivoire. Cependant, son développement requiert des conditions naturelles et anthropiques particulières. C'est pourquoi, la première partie du document portant sur la bibliographie est destinée à donner des indications sur le cacaoyer, sa zone de répartition géographique, son mode de culture et ses exigences écologiques. Elle définit aussi l'importance du cacao en Côte d'Ivoire. En outre, les notions de fertilisation minérale, de stock du carbone et d'activité biologique sont également définies.

1.1.1. Le cacaoyer

1.1.1.1. Origine et aire géographique du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.)

1.1.1.1.1. Origine du cacaoyer

Le cacaoyer cultivé est l'espèce *Theobroma cacao* L., appartenant à la famille des Malvacées (Oro, 2011). Il est cultivé à des fins commerciales et en particulier pour ses fèves qui servent principalement à la fabrication du chocolat et dans une moindre mesure, à l'industrie cosmétique et pharmaceutique. Les 22 espèces du genre *Theobroma* ont toutes pour origine géographique, les forêts humides d'Amérique tropicale dans lesquelles elles sont cultivées comme arbres de sous-bois (Deheuvels, 2011). Le cacaoyer a encore aujourd'hui, pour les populations indiennes, une origine divine. Les Aztèques accompagnaient les étapes de sa culture par des cérémonies religieuses (Touzard, 1993).

1.1.1.1.2. Aire de distribution du cacaoyer dans le monde

Le cacaoyer se rencontre à l'état naturel dans les forêts humides d'Amérique tropicale, entre 20° de latitude Nord et 20° de latitude Sud à une altitude généralement inférieure à 1250 m. Les premières plantations cacaoyères avec les Aztèques s'étendaient d'abord dans les Îles Caraïbes, ensuite au Venezuela et enfin en Equateur et en Colombie entre le 13^{ème} et le 16^{ème} siècle. Ce n'est qu'au 19^{ème} siècle, avec les grandes plantations cacaoyères mises en place par le Brésil dans la région de Bahia, que le cacaoyer a pris véritablement la direction de l'Afrique de l'Ouest où d'importantes plantations ont été créées entre le 19^{ème} et le 20^{ème} siècle au Cameroun, au Nigeria, au Togo, au Ghana et en Côte d'Ivoire (Oro, 2011) et ensuite en Malaisie et en Indonésie pour l'Asie (Figure 1a). Le cacaoyer se retrouve aujourd'hui sur quatre des cinq continents avec une part importante de la production en Afrique durant la campagne 2015 -

2016 où un volume de plus de 3,2 millions de tonnes de cacao marchand a été produit (ICCO, 2017) (Figure 1b).

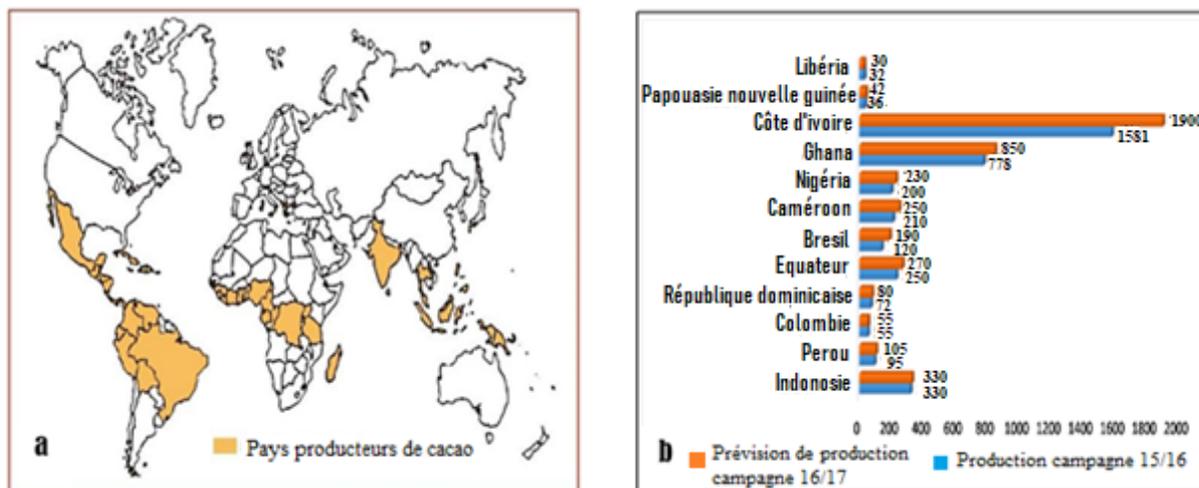


Figure 1 : Zones de production (a) et principaux pays producteurs de cacao (b) dans le monde.

1.1.1.2. Description et diversité génétique du cacaoyer

1.1.1.2.1. Description du cacaoyer

Le cacaoyer est une plante ligneuse pérenne, d'une hauteur de 5 à 10 mètres, qui atteint son plein développement à l'âge de 10 ans (Oro, 2011). Il est constitué d'une partie souterraine et d'une partie aérienne (Figure 2).

La partie souterraine du cacaoyer développe un système racinaire pivotant orthotrope allant jusqu'à 2 m de profondeur selon le type de sol et un chevelu de racines latérales superficielles et plagiotropes (environ 85 % des racines). Ce dernier est situé dans les 20 à 25 premiers centimètres du sol et s'étend sur un rayon de 5 à 6 mètres autour du pied de l'arbre mature (Mossu, 1990). Cette description fait référence au cacaoyer produit à l'aide de semence car celui produit à partir de bouture n'émet que des racines latérales (Mossu, 1990).

La partie aérienne comprend la tige et les rameaux, les feuilles, les fleurs et les fruits. La croissance en hauteur de la tige se fait par poussées successives jusqu'à l'âge de 18 mois. A environ 1,5 m de hauteur, il y a la formation d'un verticille de 5 rameaux plagiotropes qui constitueront la couronne du cacaoyer. Les bourgeons axillaires du tronc, souvent à la base de la première couronne forment alors un ou plusieurs axes orthotropes, aussi appelés gourmands, qui se comportent comme la première tige. Lorsque la seconde couronne est bien formée, la première disparaît progressivement et ainsi de suite. Les gourmands se forment également depuis la base du tronc jusqu'aux rameaux plagiotropes de la couronne. La croissance de ces rameaux est discontinue et se fait selon 4 ou 5 poussées foliaires

(flushes) annuelles, séparées par des périodes de dormance des bourgeons terminaux (Deheuvels, 2011).

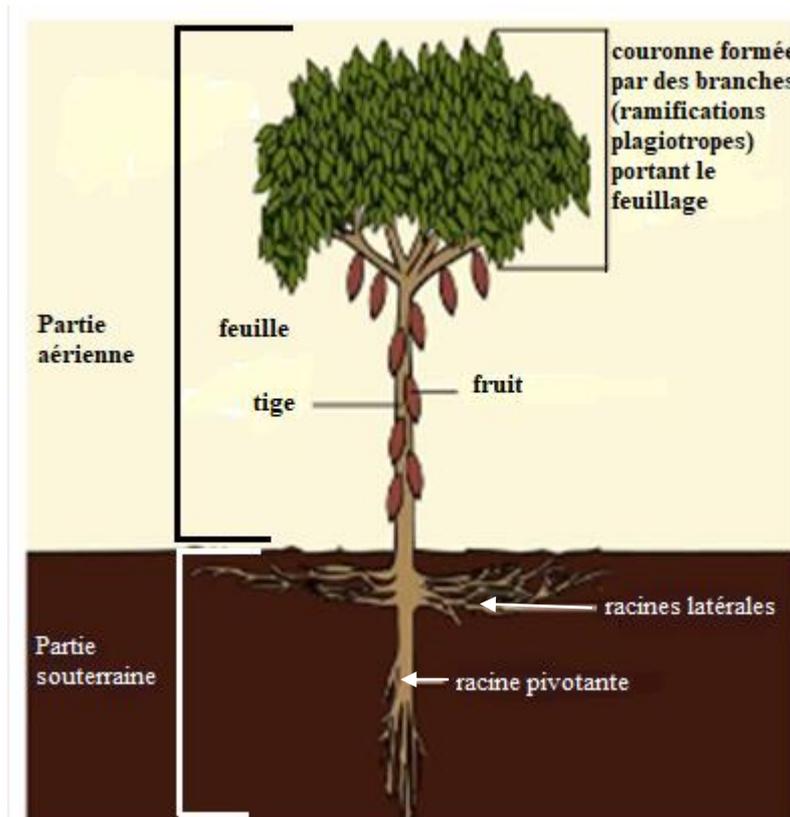


Figure 2 : Schéma descriptif d'un cacaoyer issu de semence (Johann, 2017)

La feuille comprend deux parties, le pétiole et le limbe qui comprend une nervure principale et plusieurs nervures secondaires. La période d'activité photosynthétique optimale de la feuille, qui va jusqu'à 5 mois après le flush, décroît ensuite jusqu'à sa chute à un an d'âge. De ce fait, le cacaoyer porte toujours des feuilles d'âge différent, issues des 4 ou 5 flushes annuels.

Les fleurs hermaphrodites sont groupées en inflorescences issues de la croissance des bourgeons axillaires après la chute des feuilles et de leur différenciation définitive sous forme de boursoufflures de l'écorce baptisées coussinets floraux (Figure 3a). A chaque période d'induction florale, la production de fleurs est simultanée sur tous les coussinets floraux d'un même arbre. La floraison peut survenir toute l'année (Deheuvels, 2011). Elle est synchrone pour les cacaoyers d'une même région et a lieu par périodes successives d'amplitude variable selon les pieds. Les cacaoyers d'une même région et de la même variété ont des pics de floraison au cours de l'année. L'apparition de ces pics est favorisée par des températures moyennement élevées et des pluies abondantes. Le fruit du cacaoyer est appelé "chérelle" pendant les 5 à 6 premiers mois de sa croissance, puis "cabosse" lorsqu'il

atteint sa maturité (Niemenak *et al.*, 2012). La cabosse indéhiscente et semblable à une baie, contient des graines couramment appelées fèves. Ces fèves sont entourées d'une pulpe mucilagineuse et imbriquées dans une seule cavité qui renferme en moyenne 30 à 40 fèves par 5 rangées longitudinales (Figure 3 b) selon les travaux de Mossu (1990) et de Deheuvels (2011). Le taux de remplissage des cabosses est en réalité variable et dépend du taux de fécondation de l'ovule et des caractéristiques variétales du cacaoyer (Enriquez, 1985). Très souvent, certains fruits dessèchent sur les cacaoyers avant l'âge de la maturité. Ce phénomène résulte des mécanismes de régulation physiologique dus à un seuil de flétrissement différentiel, à une incompatibilité ou une limitation de la fructification par effet de compétition entre les fruits.

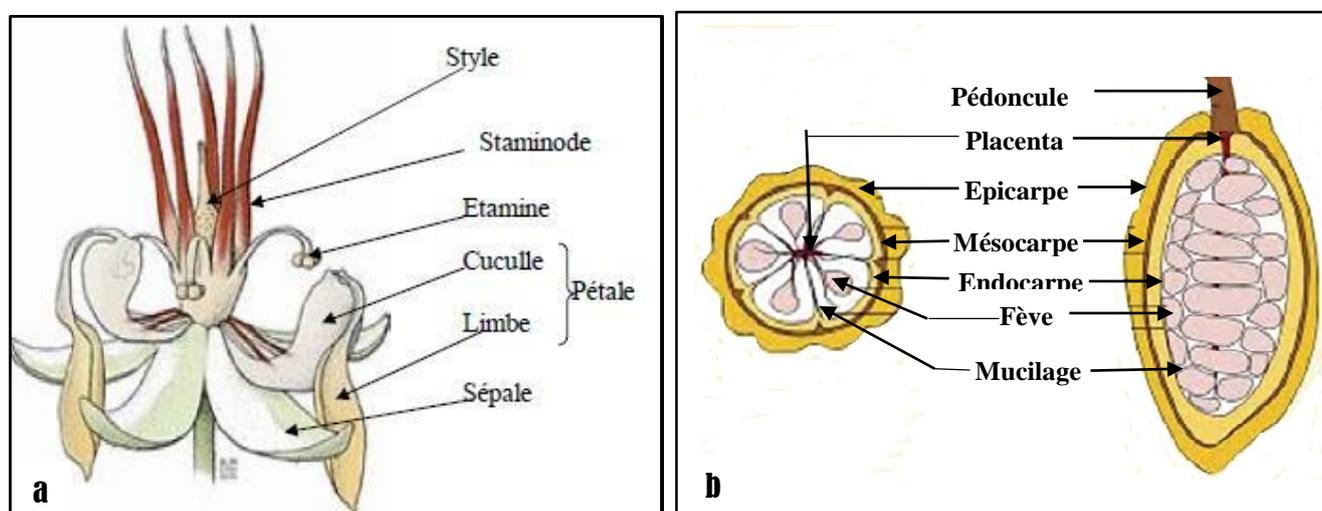


Figure 3 : Schémas de la fleur (a) et du fruit (b) du cacaoyer (b1 : coupe horizontale ; b2 : coupe transversale)

1.1.1.2.2. Diversité génétique du cacaoyer

La classification de la diversité génétique de l'espèce *Theobroma Cacao* L. a été proposée en 1882 par Morris en référence à trois variétés morpho-géographiques de cacaoyers traditionnellement cultivés dans le monde : *Criollo*, *Forastero* et *Trinitario* (Figure 4). Bien que les variétés *Criollo*, *Forastero* et *Trinitario* aient servi de base à la première classification du cacaoyer, ces variétés ne reflètent plus actuellement la vraie structuration génétique du cacao. Cependant, la représentation globale de la diversité génétique chez *Theobroma cacao* a été maintenue, et elle est encore largement utilisée malgré son imprécision et toutes les améliorations génétiques qui se sont produites, et qui rendent difficile cette classification (Motamayor, 2001). La grande diversité de l'espèce *Theobroma cacao* justifie une nouvelle analyse de la classification de sa diversité génétique.



A) Variété Criollo



B) Variété Forastero



C) Variété Trinitario

Figure 4 : Aspect de 3 espèces de cacao cultivées

1.1.1.3. Exigences écologiques du cacaoyer

Le cacaoyer est aujourd'hui cultivé dans environ 70 pays, tous situés dans la zone intertropicale (ICCO, 2012). Les cacaoyers demandent des conditions écologiques particulières. Ils doivent être cultivés dans des zones où la température, les précipitations et l'humidité sont relativement élevées (Oro, 2011). De plus, le cacaoyer étant humicole, la teneur en matière organique des 20 premiers centimètres de sol doit être élevée (Loor-Solorzano, 2007). Les climats tropicaux humides sont favorables à la culture du cacaoyer, car le cacaoyer exige une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 1 500 et 2 500 mm de pluies (Kébé *et al.*, 2009). Dans les sols riches et profonds, il peut cependant végéter correctement avec seulement 1 100 à 1 200 mm. La répartition des pluies et la durée de la saison sèche sont également deux facteurs à considérer. Une répartition uniforme des pluies est souhaitable et la saison sèche ne doit pas dépasser deux à trois mois. Une saison sèche de plus de trois mois conduit dans des terrains moyennement fertiles, à des mortalités élevées (Braudeau, 1969).

Le cacaoyer supporte des températures maximales moyennes comprises entre 30 °C et 32 °C et des températures minimales moyennes comprises entre 18 et 21 °C (Crane *et al.*, 2013). La température moyenne annuelle optimale se situe aux environs de 25 °C (Braudeau, 1969).

La culture du cacaoyer est possible sur une très large gamme de sols et ce n'est qu'en combinant le facteur sol aux autres facteurs du milieu qu'il sera possible de déterminer si un sol lui convient dans des conditions particulières (Wood & Lass, 1985). En conditions idéales de pluviométrie et sur terrain plat, les caractéristiques d'un bon sol pour la culture du cacaoyer sont résumées dans le tableau I.

Tableau I : Caractéristiques optimales d'un sol pour la culture du cacaoyer.

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

Source : FAO (2009)

1.1.1.4. Importance de la production du cacao en Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire est le premier pays producteur de cacao au monde avec plus de 2 millions d'hectares de superficie emblavées pour une production annuelle de plus 2,1 millions de tonnes en 2020 (ICCO, 2020). Le cacao génère à lui seul 35 % des recettes totales d'exportation et contribue à 15 % du produit intérieur brut (PIB) et 20 % des recettes fiscales (Kouamé, 2012). Mieux, cette filière occupe 40 % des activités du secteur bancaire du pays (Keho *et al.*, 2008). L'importance que revêt cette culture aussi bien pour les secteurs liés directement ou non à elle, en fait un levier de développement économique important et de réduction de la pauvreté. La progression de la production du cacao en Côte d'Ivoire a été encouragée par la politique gouvernementale des années 1970 jusqu'à nos jours qui favorisait le secteur agricole, et plus particulièrement, celui du binôme cacao-café. Malgré ces remarquables performances et la

place de choix occupée par le cacao dans l'économie nationale, la cacaoculture ivoirienne est pratiquée, de manière générale, par les petits exploitants, avec du petit matériel agricole.

1.1.1.5. Système de culture du cacaoyer en Côte d'Ivoire

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

1.1.1.5.1. Système de cacaoculture extensif

Le système de cacaoculture extensif est un système traditionnel de culture itinérant du cacaoyer sur défriche forestière. Ce système consiste à défricher la forêt et à effectuer un brûlis avant la mise en place des cultures vivrières (manioc, igname, bananier, maïs, taro, riz, arachide et légumes), choisies selon les habitudes alimentaires des producteurs (Boni, 1978). Les bananiers, *Musa* spp. (Musaceae), ont essentiellement pour rôle de fournir un ombrage temporaire aux jeunes cacaoyers. Après l'installation des vivriers, les graines ou fèves de cacao sont directement semées, généralement à fortes densités (2 000 à 2 500 graines par hectare), sans aucun alignement (Freud *et al.*, 2000). Avant la fin des cycles vivriers, c'est-à-dire, durant les deux à trois premières années, les jeunes cacaoyers bénéficient des entretiens apportés aux cultures vivrières. Certains arbres sont souvent conservés pour procurer de l'ombrage aux jeunes cacaoyers ou à cause de leur valeur alimentaire, médicinale ou culturelle (Kouadio, 2016). Toutefois, les planteurs effectuent des éliminations sélectives par anelage ou au moyen de feux allumés aux pieds des arbres. À l'âge adulte, la majorité des plantations est conduite en plein soleil, ou sous un ombrage permanent, plus ou moins dense (Assiri, 2007). Le système extensif est caractérisé par une faible productivité des vergers, liée à la forte utilisation de matériel végétal non sélectionné, au faible recours aux intrants (engrais, pesticides) et à l'insuffisance d'entretien des plantations. Les rendements moyens à l'hectare oscillent entre 260 et 600 kg de cacao marchand par an (Assiri, 2007). En outre, après quelques années d'exploitation, les vergers deviennent sénescents et peu rentables. Ils sont alors abandonnés et de nouvelles plantations sont créées suivant le même système traditionnel de culture, sur défriche et brûlis de la forêt.

1.1.1.5.2. Système de cacaoculture intensif

Le système de cacaoculture intensif, mis au point par la recherche agronomique, repose sur un bon choix des sols, l'utilisation d'un matériel végétal performant et le respect d'un itinéraire technique bien précis, comportant l'établissement de la pépinière, la préparation du terrain, la mise en place des cacaoyers, l'entretien et la fertilisation de la plantation (Kébé *et al.*, 2005). Cette sorte de cacaoculture exige l'utilisation effective des techniques scientifiques approuvées

de culture, de protection et de traitements post-récoltes du cacao (Kébé *et al.*, 2009). Le rendement à l'hectare avoisine 3000 Kg an⁻¹ en station de recherche et oscille entre 1500 et 2000 Kg an⁻¹ en milieu paysan (CCC, 2017).

1.1.2. Notions de fertilisation minérale

Au 21^{ème} siècle, la recherche et développement prônent aussi bien une agriculture intensive (usage des fertilisants minéraux) qu'une agriculture qui préserve l'état sanitaire des consommateurs et la biodiversité. Ces systèmes de production respectueux de l'environnement reposent en majeure partie sur la séquestration du carbone qui limite l'émission dans l'atmosphère de gaz à effet de serre. La connaissance de toutes ces notions est nécessaire pour mieux appréhender les relations qui découlent entre elles.

1.1.2.1. Définition

Castillon *et al.*, (1995) ont défini la fertilisation comme étant un ensemble de techniques agricoles utilisant des matières fertilisantes. C'est une pratique nécessaire pour maintenir ou améliorer la fertilité des sols et apporter les éléments nutritifs nécessaires à la culture (Busson *et al.*, 2012). Selon IIFA (2014), la fertilisation des sols appauvris, en éléments nutritifs, associée aux meilleures pratiques culturales et à des conditions de croissances végétales favorables, permet d'augmenter la productivité végétale. Les matières utilisées peuvent être organiques ou minérales (N'Guessan, 2017). Ainsi, la fertilisation minérale est un concept clair, lié aux matières fertilisantes sous forme exclusivement minérale d'origine naturelle ou synthétique qui sont mises à la disposition de la plante (Abga, 2013).

L'objectif final de toute fertilisation minérale est d'optimiser la production agricole, maximiser les interactions positives et les rendements nets et minimiser l'épuisement du sol et les pertes de nutriments de même que les dommages environnementaux (Elalaoui, 2007). Ainsi, les éléments minéraux doivent satisfaire les besoins de la plante tout au long de son cycle dans un objectif de rendement quantitatif et qualitatif. Selon la richesse du sol, la fertilisation permet non seulement de compléter la fourniture du sol en éléments minéraux pour des cultures au potentiel plus élevé, mais aussi restituer ce qui a été exporté pour conserver la fertilité du milieu.

1.1.2.2. Principes de la fertilisation

Les principes de la fertilisation découlent de trois lois fondamentales :

- **Loi de restitution ou des avances**

A la notion de restitution, il est préférable de substituer celle des avances, en recherchant une alimentation optimale des cultures. Cette loi fondamentale intéresse, dans le cadre de la rotation des cultures, l'aspect statique du maintien de la fertilité. Les exportations d'éléments minéraux par les récoltes doivent être compensées par des restitutions pour éviter l'épuisement du sol.

➤ **Loi des accroissements moins que proportionnels ou loi de Mitscherlich**

Quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, les augmentations de rendement obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les quantités apportées s'élèvent. Cette loi se traduit par une courbe dont le sommet représente le rendement maximum possible. Mais, auparavant, on atteint un niveau de rendement où le supplément de récolte obtenu couvre juste la dépense supplémentaire en engrais : le rendement optimum est atteint. Au-delà de la dose d'engrais optimale, la valeur du supplément de récolte obtenu ne paie pas la valeur du supplément d'engrais utilisé (Figure 5).

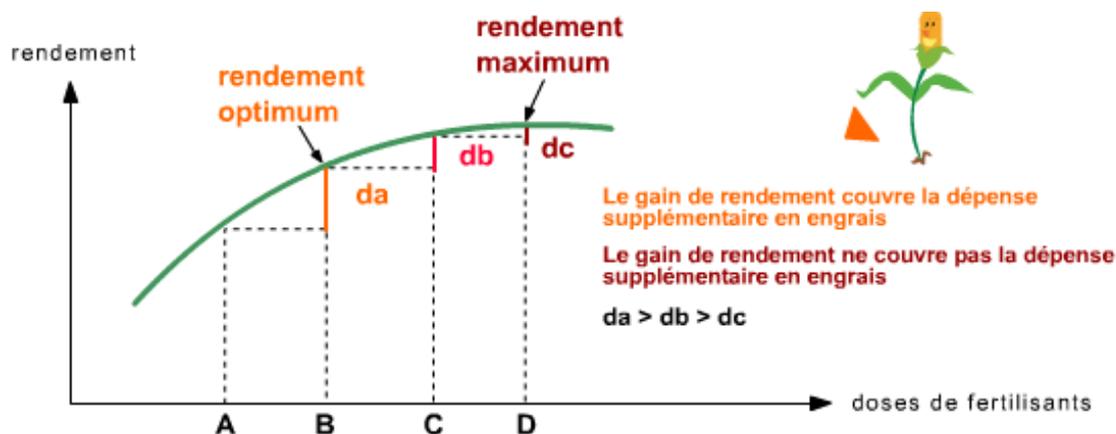


Figure 5 : Illustration de la loi de Mitscherlich (1909)

➤ **Loi du minimum ou d'interaction**

La loi du minimum ou loi des facteurs limitants, conceptualisée et popularisée en 1850 par Justus von Liebig, est le fondement de cette agriculture minéraliste. Elle énonce que : « le rendement d'une culture est limité par celui des éléments fertilisants qui le premier, vient à manquer, et qu'il convient de compenser le manque par un apport, sous forme d'engrais minéral, complétant le ou les éléments en quantité suffisante ». Dans un sol déséquilibré en éléments minéraux, le rendement de la culture est limité au niveau permis par l'élément présent en plus faible quantité, même si tous les autres se trouvent en quantités suffisantes.

1.1.2.3. Différents types d'engrais minéraux et leurs origines

Les engrais sont des substances organiques ou minérales, souvent utilisées en mélanges, destinés à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, de façon à améliorer leur

croissance, et à augmenter le rendement et la qualité des cultures (Abga, 2013). Les engrais minéraux sont quant à eux formés de substances d'origine minérale, donc produits par l'exploitation de gisements naturels de différentes roches. On distingue entre autres les engrais minéraux qui proviennent de gisements sédimentaires, éruptifs ou salins, qui sont obtenus par des processus de transformation industrielle. Cela dit, la plupart des engrais minéraux sont obtenus par la mise en œuvre de réactions chimiques pour isoler un ou plusieurs éléments (UNIFA, 2014). Ces engrais chimiques contiennent des éléments nutritifs primaires, les NPK, que sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Ces engrais sont produits massivement et déclinés en d'infinies combinaisons et sous diverses formes (granulé, poudre, liquide, bâtonnet ou en plante). Ils sont pour la plupart à libération rapide, dans ce cas, utilisés comme engrais de couverture et d'entretien, et quelques-uns seulement sont à libération lente, utilisés comme engrais de fond (UNIFA, 2014).

Les engrais minéraux composés obtenus par réaction chimique utilisent le plus souvent la liqueur de nitrate d'ammonium comme source d'azote. Quant à la source de P_2O_5 , elle peut être pour partie le superphosphate simple pour sa grande vertu à granuler, mais la majeure partie (dans le cas de NPK à fort dosage en P_2O_5) vient du phosphate d'ammonium (phosphate mono ou di-ammoniaque) fabriqué in-situ par neutralisation de l'acide phosphorique (H_3PO_4) par l'ammoniac (NH_3). La source de K_2O est plus souvent le chlorure de potassium (KCl), mais parfois, pour des formulations pauvres en chlore, le sulfate de potassium (K_2SO_4) est utilisé (UNIFA, 2014).

1.1.2.4. Éléments nutritifs du cacaoyer

Les éléments nutritifs sont des éléments essentiels à la croissance et à la reproduction des plantes. Singh *et al.* (2015) définissent seize éléments nutritifs N, P, K, Fe, Co, Mo, Cu, S, Mg, Ca, Na, Mn, Zn, B, Cl, Al, dont quelques-uns, essentiels à la nutrition du cacaoyer (Snoeck *et al.*, 2016 ; N'Guessan, 2017), sont représentés dans le tableau II.

Tableau II : Eléments minéraux essentiels à la croissance des cacaoyers

Importance	Eléments nutritifs	Formes absorbées par la plante	Rôles
Macro-éléments (éléments majeurs)	Azote	NH_4^+ , NO_3^-	Croissance de la plante (photosynthèse)
	Phosphore	H_2PO_4^- , HPO_4^-	Croissance (développement des racines, des fleurs et des cherelles) synthèse des protéines, transports des sucres
	Potassium	K^+	Croissance (développement des racines, des fleurs et des cherelles), absorption de l'eau, respiration, renforce la rigidité de la tige
	Magnésium	Mg^{2+}	Photosynthèse, synthèse des sucres, tolérance à la chaleur
	Calcium	Ca^{2+}	Développement racinaire, tolérance de la plante au stress hydrique, résistance contre les maladies
	Soufre	SO_4^{2-}	Photosynthèse, formation des graines, fixation d'azote
Micro-éléments (éléments mineurs)	Fer	Fe^{2+}	Photosynthèse, fixation d'azote et respiration
	Zinc	Zn^{2+}	Photosynthèse, croissance, synthèse des protéines et des glucides
	Manganèse	Mn^{2+}	Photosynthèse, synthèse des protéines et réduction des nitrates
	Cuivre	Cu^{2+}	Photosynthèse, Fertilité (pollinisation), synthèse des protéines, de la lignine et des glucides, fixation d'azote et respiration
	Bore (B)	H_3BO_3	Croissance, fertilité (pollinisation), synthèse des protéines et des glucides et migration des sucres
	Molybdène	(MoO_4^{2-})	Fixation d'azote, réduction des nitrates

1.1.2.5. Importance de la fertilisation minérale du cacaoyer

En Côte d'Ivoire, les sols comme l'ont montré Kassin *et al.* (2016) et N'Guessan (2017), ne remplissent pas tous les critères définis pour l'installation de cacaoyers et sont quelques fois la cause des faibles rendements et de la dégradation des vergers (Koko *et al.*, 2009). En effet, par application de la méthode diagnostic sol, Kassin *et al.* (2016) et N'Guessan (2017) ont montré que 82 %, 57 % ; 81 % ; 34 % ; 61 % et 37 % des sols étudiés étaient pauvres en azote, carbone organique, phosphore, potassium, calcium et magnésium, respectivement. Au niveau de leur acidité, environ 22,7 % de ces sols ont un pH inférieur à 5,5. Pour ces auteurs, ces sols seraient trop acides pour le cacaoyer alors que, FAO (2009) établit le seuil d'acidité aux pH inférieurs à 5.

En outre, ces auteurs ont montré que 37 % des sols sous cacaoyers répondraient positivement à un apport d'engrais azoté et 96 % à un apport d'engrais riche en phosphate. Aussi, ont-ils mentionné que 68 % des sols échantillonnés présentaient un rapport K/Ca/Mg équilibré, montrant ainsi que l'état des sols pourrait aisément être corrigé par une fertilisation adaptée.

Ces éléments minéraux sont fournis soit par le sol, soit par la fertilisation, mais pour des rendements élevés, la fourniture par le sol de ces éléments est insuffisante et il est généralement nécessaire d'appliquer des fertilisants. En apportant peu ou pas du tout de nutriments, l'exportation sans remplacement d'éléments nutritifs dans une culture continue entraîne une baisse des rendements due à l'épuisement des sols en éléments fertilisants (Mills & Fey, 2003) et contribue à leur dégradation (IIFA, 2014). Selon Afrifa *et al.* 2006, l'engrais minéral permet de restaurer la fertilité des sols et d'améliorer les rendements (Figure 6). Toutefois la fumure ne doit être épandue que dans une plantation bien conduite ; c'est-à-dire nettoyer, égourmander et traiter (Assiri *et al.*, 2009). Les besoins et les types d'engrais sont déterminés par la méthode de « diagnostic sol » en cacaoculture, en tenant compte du potentiel chimique réel de la couche 0 - 20 cm du sol et des équilibres optimaux favorables à la croissance ou à la production du cacaoyer (Snoeck, 2010). Elle permet donc de renforcer l'effet des pratiques culturales et de leur donner un caractère plus durable.

Outre l'effet positif sur la productivité des cacaoyers, les éléments nutritifs permettent aussi d'améliorer la résistance des cacaoyers aux maladies, aux ravageurs, à la concurrence avec les mauvaises herbes, et d'améliorer la qualité et la vigueur des fruits (Jadin, 1985). En particulier, les cacaoyers présentant des carences en calcium et magnésium sont particulièrement sensibles à la pourriture des cabosses (Tarjot, 1971).

Au Burkina Faso, Compaoré *et al.* (2003), à travers une étude sur l'influence des modes d'utilisation des terres sur le phosphore isotopiquement échangeable, ont d'une part confirmé que le phosphore est l'un des principaux facteurs limitants de la production agricole et, d'autre part, que l'apport d'engrais phosphatés était l'unique moyen pour lever ladite contrainte et d'améliorer le bilan en phosphore des sols.

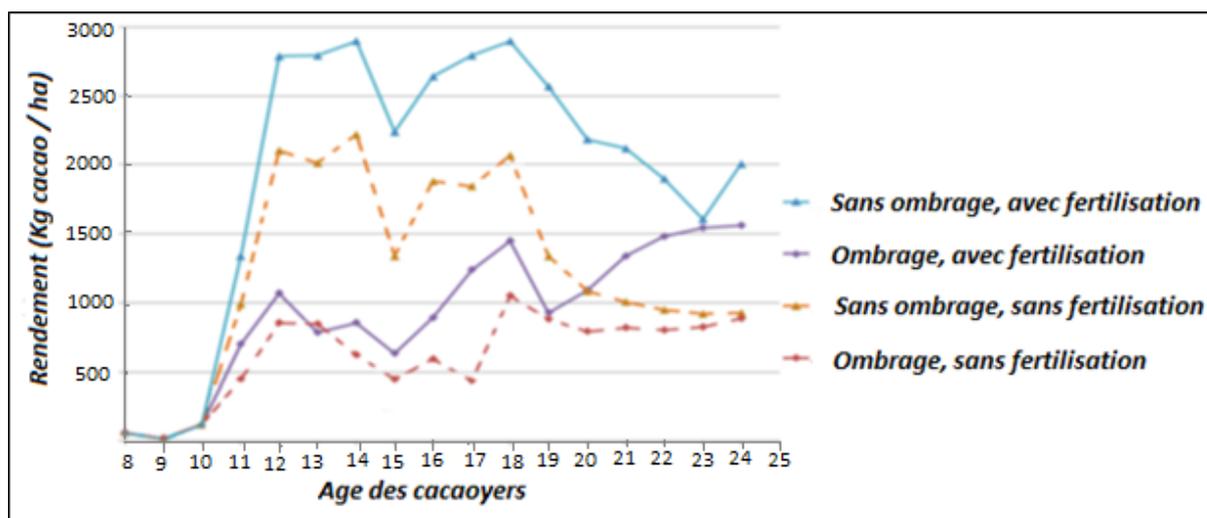


Figure 6 : Impact de la fertilisation sur le rendement des cacaoyers avec ou sans ombrage source : (Ahenkorah *et al.*, 1974).

1.1.2.6. Conséquences de l'apport de fumure minérale

L'apport des engrais minéraux présente des avantages immédiats :

- les éléments nutritifs sont solubles et directement disponibles pour les plantes, par conséquent l'effet est généralement plus rapide ;
- les engrais minéraux sont très riches en éléments nutritifs et sont très efficaces sur la croissance des cultures même en quantité relativement faible.

Cependant, les travaux de Barlog & Grzebisz (2004) ont montré qu'une faible efficacité dans l'absorption des engrais est un facteur majeur qui aggrave les effets environnementaux négatifs. En relation avec ce point, des inconvénients liés à l'utilisation d'engrais chimiques peuvent être observés :

- une sur-application d'engrais minéraux peut avoir des effets négatifs tels que la perte des nutriments des sols par lixiviation, émission de gaz à effet de serre et par ruissellement, notamment, l'azote et le phosphore, qui conduisent à la dégradation de l'environnement par eutrophisation des cours d'eau (Gyaneshwar *et al.*, 2002) ;
- un sur-approvisionnement de l'azote peut conduire à un ramollissement des tissus végétaux et rendre certaines plantes plus sensibles aux maladies et aux ravageurs (Chen, 2006) ;
- les engrais minéraux réduisent la colonisation des racines des plantes par les champignons mycorhiziens et peuvent inhiber la fixation symbiotique de l'azote par les Rhizobia (Chen, 2006) ;

- les engrais azotés accélèrent la décomposition de la matière organique du sol, ce qui conduit à la dégradation de la structure du sol (Chen, 2006).

Les raisons pouvant expliquer ces problèmes sont l'utilisation anarchique de ces engrais qualitativement et quantitativement dans le temps (Adesemoye & Kloepper, 2009). Des cas de pollution des ressources en eau, d'effets négatifs sur les micro-organismes et insectes utiles, de sensibilité des cultures à l'attaque des maladies, d'acidification ou alcalinisation du sol ou de cuirassement du sol, ont également été aussi évoqués par Chen (2006). De plus, des travaux antérieurs ont confirmé que la plupart des engrais azotés ont tendance à acidifier le sol (Saha *et al.*, 2008). Cette acidification entraîne l'apparition de conditions défavorables à de nombreux types de micro-organismes, notamment, les bactéries appartenant au groupe des actinomycètes (Kaur *et al.*, 2008). En outre, Hati *et al.* (2008) et Liu *et al.* (2010) ont montré que l'ajout d'engrais azotés uniquement peut entraîner un déséquilibre chimique qui réduit l'assimilation d'autres éléments nutritifs et un déclin des propriétés chimiques, biologiques et physiques du sol. De même, lorsque le phosphore est appliqué en quantité élevée, il limite la croissance des plantes et est précipité par des complexes métalliques qui dans le sol, plus tard peut conduire à la formation de complexes phosphatés non assimilables par la plante (Sharpley *et al.*, 2003).

1.1.3. Notion d'activité biologique dans les sols

La plupart des transformations d'intérêt agronomique dans le sol sont d'origine biochimique. Leur déroulement est conditionné par la présence de microorganismes et par leurs enzymes. Ces réactions biochimiques conditionnent la formation des sols (pédogenèse) et la nutrition des plantes. En effet, les microorganismes, loin d'être répartis de manière homogène dans le sol, forment autour des racines une sorte de film continu (la rhizosphère). C'est à ce niveau qu'ont lieu les échanges entre les matières organo-minérales du sol et la plante.

La connaissance de l'activité biologique d'un sol permet donc d'approcher la dynamique d'évolution du sol et les échanges entre le sol et la plante. Les sols renferment de très nombreux êtres vivants (microflore, micro, méso et macrofaune) dont l'activité est en lien plus ou moins direct avec leur fonctionnement.

La biomasse microbienne, le pool de matières organiques du sol, la minéralisation du carbone et de l'azote et les activités enzymatiques du sol constituent les outils fondamentaux qui renseignent sur l'évolution du statut biologique du sol (Wu *et al.*, 1990). L'état biologique du sol peut être appréhendé soit directement par l'observation des organismes ou de marqueurs de leur présence (ADN), soit par la mesure de l'activité enzymatique.

Des observations plus macroscopiques peuvent aussi fournir une appréciation qualitative de l'état du sol. Les indicateurs biologiques permettent de caractériser l'état et de révéler les modifications d'un écosystème (Blandin, 1986). Ces indicateurs biologiques peuvent être utilisés avec les principaux objectifs de (Bispo *et al.*, 2017) :

- décrire et surveiller la qualité du sol ;
- rendre compte de l'évolution des pratiques de gestion des sols ;
- déterminer la présence et le degré de risque des organismes nuisibles ;
- quantifier et surveiller la dégradation du milieu.

1.1.3.1. Indicateurs de l'activité biologique du sol

Il existe des bio-indicateurs microbiologiques et des bio-indicateurs faunistiques.

1.1.3.1.1. Bio-indicateurs microbiologiques

La mesure de l'activité biologique par des indicateurs microbiologiques peut se faire de plusieurs manières. Elle peut concerner la mesure de la minéralisation de la matière organique via le CO₂ produit et/ou l'O₂ consommé par la respiration microbienne du sol (respirométrie) (Bispo *et al.*, 2009). Elle peut aussi se déterminer par l'étude de la biomasse microbienne du sol, la minéralisation du carbone et de l'azote, du pool de matière organique du sol et de l'activité des enzymes (Bourgeois, 2015).

1.1.3.1.2. Bio-indicateurs faunistiques

➤ Lombriciens

Les vers de terre également appelés lombriciens sont, selon Lavelle (1983), des organismes invertébrés du sol connus de tous et sont reconnus comme ingénieurs du sol par leurs rôles dans diverses fonctions des sols. Ce sont la décomposition et le transfert de la matière organique, la stimulation des activités microbiennes, l'agrégation et la structuration des sols, l'infiltration des fluides et la rétention en eau (Figure 7). Les conséquences de ces bioturbations lombriciennes permettent la réduction de l'érosion, l'augmentation de la production végétale ainsi que la réduction des risques de pollution. Ce sont des bio-indicateurs reconnus et pertinents en termes d'indicateurs d'effet et d'impact qui rendent compte de l'état des sols, de leur occupation ainsi que de l'évolution des pratiques de gestion.

A) Ver épigé (*Lumbricus rubellus*)B) ver anécique (*Lumbricus terrestris*)C) Ver endogé (*Millsonia omodeoi*)

Figure 7: Différentes catégories écologiques de lombricien (OPVT, 2015)

➤ Nématofaune

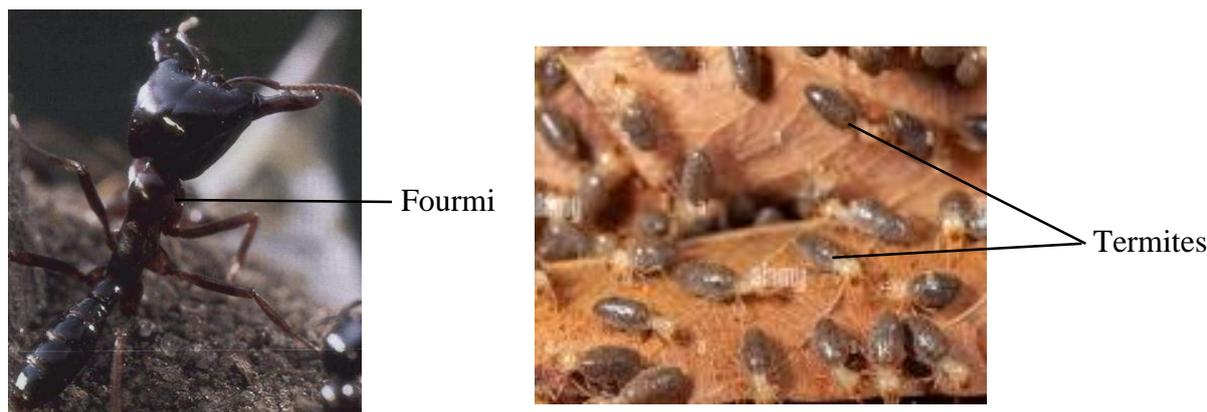
La contribution de la communauté de nématodes dans le fonctionnement du sol est très importante du fait de son abondance et de sa diversité trophique. Décomposeurs secondaires, les nématodes déterminent les flux de nutriments ou de phytoparasites et aussi bien la productivité végétale. De plus, les différentes espèces de nématodes présentent des sensibilités variables aux polluants et aux perturbations anthropiques, en particulier agricoles. La connaissance de la structure de la communauté nématologique et des valeurs prises par les indices nématofauniques selon Bourgeois (2015), renseignent sur :

- - l'intensité de différents processus se déroulant dans le sol, tels que la décomposition de la matière organique, la minéralisation, la détoxification de polluants,
- - la structure du réseau trophique dans le sol ; et
- - l'état de stabilité du système, les capacités de résistance et de résilience du sol.

Les caractéristiques des nématodes du sol font de la structure des communautés de nématodes un bio-indicateur pertinent pour l'étude des changements environnementaux.

➤ Arthropodes du sol

Les arthropodes sont des décomposeurs, agissant sur les cycles biogéochimiques et sont aussi considérés comme des régulateurs (Lavelle & Spain, 2001). Ils sont très actifs au niveau des litières, car ils facilitent la dispersion des microorganismes et permettent également une décomposition plus rapide en transformant la ressource initiale en boulettes fécales. C'est pourquoi, les représentants des arthropodes sont souvent appelés « transformateurs ». La figure 8 montre quelques représentants des arthropodes.



A) Fourmi (*Dorylus nigricans*)

B) Termites (*Coptotermes intermedius*)

Figure 8 : Exemples d'insectes sociaux terrioles sous cacaoyère.

1.1.3.2. Fonctions et services écosystémiques de la pédofaune

Dans les années 1960 - 1970, l'écologie était à son apogée. La notion d'écosystème prend de l'importance. Depuis cette période, on ne se contente plus de décrire les organismes du sol (faunes et microflore du sol), mais on cherche à caractériser leurs activités. Les écologues identifient deux rôles importants joués par les organismes du sol : une action physique sur le sol et un rôle dans la dégradation de la matière organique.

1.1.3.2.1. Actions sur la structure du sol

Les organismes ingénieurs (fourmis, lombrics et termites des régions tropicales) jouent un rôle prépondérant dans la structuration du sol par la formation de galeries, l'apport d'éléments profonds en surface et, inversement, l'insertion d'éléments organiques en profondeur, et enfin la production d'agrégats organo-minéraux stables (Lavelle *et al.*, 2016). Ces animaux participent au maintien de la porosité du sol (Lavelle *et al.*, 2016). C'est un facteur essentiel non seulement pour la survie de la pédofaune, mais aussi pour le développement des systèmes racinaires des plantes, notamment, avant l'installation d'une végétation abondante. Les vers de terre, en particulier, les endogés créent un réseau de galeries profondes en avalant la terre devant eux et en la rejetant derrière sous forme de déjections. Quant aux vers anéciques, ils présentent

un mode de vie mixte. Ceux-ci se nourrissent la nuit en surface et descendent profondément dans le sol le jour pour échapper au réchauffement des horizons superficiels. Par leurs mouvements verticaux, ils agissent fortement sur la structure du sol. En creusant leurs galeries, les vers fousseurs augmentent la porosité du sol (Mickael & Marine, 2020). Ils facilitent ainsi la pénétration de l'air. Cela joue également sur la capacité du sol à drainer l'eau. De plus, les vers anéciques déposent à la surface du sol des turricules, bien visibles. Ces turricules sont constitués d'éléments ayant transité par le tube digestif des vers, tout comme leurs déjections souterraines. Ces déjections, contrairement à celles des autres organismes, sont des mélanges de matière organique et de matière minérale (Brown *et al.*, 2000). Dans les huit jours environ suivant la formation d'un turricule de ver de terre ou d'une crotte de termite, explique Lavelle & Spain (2001), beaucoup d'éléments minéraux sont encore disponibles et l'activité microbienne est forte. On y trouve de l'azote minéral, de l'ammonium et du phosphore assimilable (Tableau III). Puis l'ensemble sèche, bloquant la matière minérale dans une structure en agrégat plus compacts et durables. Lombrics et termites jouent donc un rôle dans la séquestration de la matière organique dans les sols, en particulier dans la fixation du carbone (Decäns *et al.*, 2006). Ils régulent ainsi, les processus biologiques se déroulant dans le sol. Une biomasse moyenne de vers de terre, environ une tonne par hectare, ingère en un an, selon Bouché *et al.*, (1997), 400 tonnes par hectare de terre et de matière organique mêlées, soit un dixième d'un sol complet de 3 500 tonnes. Cela peut aller jusqu'à 1 000 tonnes dans les zones tropicales (Deprince, 2003). Lavelle & Spain (2001) soulignent qu'il existe une espèce tropicale de ver de terre dont les jeunes avalent trente fois leur poids en terre chaque jour.

Tableau III : Caractéristiques chimiques des turricules et des horizons 0 - 20 et 20 - 40 cm du sol

Caractéristiques	Turricules	0 - 20 cm du sol	20 - 40 cm du sol
Azote global (%)	0,35	0,25	0,081
Carbone organique (%)	5,2	3,32	1,1
Rapport C/N	14,7	13,8	13,8
NO-N (mg.l ⁻¹)	22,0	4,7	1,7
PO (mg.l ⁻¹)	150,0	20,8	8,3
pH	7,0	6,4	6,0
Humidité (%)	31,4	27,4	21,1

Source : (Menard, 2005)

1.1.3.2.2. Rôle de la pédofaune dans la décomposition de la matière organique

La décomposition est un processus complexe qui réduit la matière organique morte ou la litière en nutriments minéraux, en eau et en dioxyde de carbone (Kaba, 2017). Le taux de décomposition de la litière dans un écosystème comme l'ont montré Naik *et al.* (2018), dépend de l'interaction de divers facteurs, à savoir :

- la qualité de la litière (la concentration d'azote, de phosphore, de lignine, de polyphénols et leurs ratios) ;
- la diversité, la composition et les activités des décomposeurs ;
- les conditions climatiques (notamment la température et l'humidité) ;
- la teneur et la disponibilité des nutriments du sol ;
- l'âge de la végétation ou de la plantation ;
- les types de végétation et de gestion.

La matière organique morte qui arrive sur le sol subit des transformations biochimiques. Les animaux saprophages, en se nourrissant des débris animaux et végétaux, fragmentent la matière organique. On passe ainsi de morceaux de plusieurs centimètres, avalés par les cloportes, les gros myriapodes et les coléoptères à des fractions de quelques microns dans les boulettes fécales des microarthropodes. Ce faisant, ils augmentent la surface attaquable par les bactéries, champignons et autres éléments de la microflore. En effet, la matière organique qui arrive dans le sol, en majorité d'origine végétale, peut être difficilement assimilable. Seuls les organismes microbiens sont capables de digérer certains composés organiques. À l'intérieur des boulettes fécales des saprophages, les conditions sont optimales pour la microflore : chaleur, humidité et matière organique fragmentée. L'activité microbienne y est intense, les bactéries dégradent les fragments organiques en un substrat plus facilement assimilable.

La décomposition de la matière organique renvoie des nutriments au sol, contribuant ainsi à leur fertilité (Costa *et al.*, 2017 ; Asigbaase 2019). De plus, la décomposition de la matière organique améliore les propriétés physiques et biologiques des sols (Bünemann *et al.*, 2018).

1.1.3.3. Facteurs affectant la population et l'activité des organismes du sol

A l'échelle du globe, la répartition des différentes catégories écologiques est étroitement liée aux conditions climatiques. Cependant, à l'échelle locale, l'abondance des lombrics semble être influencée par les caractéristiques naturelles et anthropiques (Lavelle, 1983).

1.1.3.3.1. Facteurs naturels

Les facteurs naturels qui affectent l'activité de la faune du sol peuvent se décliner en six contraintes.

➤ **Difficulté de se mouvoir**

Edwards & Lofty (1979) ont montré un effet positif de la texture du sol sur l'abondance des lombrics. En effet, les déjections des vers de terre sont principalement composées de particules fines avec une teneur en limons et argiles plus importante que celle du sol environnant (Bolton & Phillipson, 1976).

➤ **Nutrition**

Les déjections des animaux épigés et leurs cadavres, sources très localisées, à la répartition spatiale et temporelle fortement aléatoire, et réservées aux consommateurs spécialisés (coprophages et nécrophages), ne représentent qu'un faible taux. La majeure partie est d'origine végétale : ce sont les racines, source de nourriture pour les espèces phytophages, et les débris végétaux qui tombent sur le sol. Cependant en forêt, par exemple, cette matière organique fraîche, très riche en lignine et pauvre en nutriments, n'est pas facilement assimilable. À la mort des feuilles, les vacuoles libèrent les produits secondaires du métabolisme des plantes, qui bloquent les protéines en formant des complexes tanins-protéines. Très peu d'organismes sont capables de les digérer. La qualité et l'abondance de la matière organique sont des facteurs limitants pour la faune (Dawoe *et al.*, 2010).

➤ **Variabilité de l'hygrométrie**

Selon les conditions climatiques, la porosité du sol est tantôt remplie d'eau, tantôt remplie d'air. Les organismes vivant dans le milieu interstitiel doivent s'adapter à cette situation : beaucoup présentent des formes de résistance (vie ralentie, enkystement) à la sécheresse et sont ainsi capables d'attendre le retour des conditions favorables. En effet, les travaux de Phillipson & Bolton (1976) ont montré que les lombrics étaient plus sensibles à une sécheresse qu'à une immersion temporaire.

➤ **Présence d'oxygène**

La présence d'oxygène liée à la diffusion des gaz dans le sol, est un facteur important pour la faune. Cela explique la rareté des organismes animaux dans le sol profond selon Deprince, 2003.

➤ **Acidité du sol**

Le pH influence l'activité biologique et conditionne aussi dans une large mesure, la disponibilité de l'azote minéral à partir des réserves organiques minéralisable.

➤ **Température du sol**

La température est un facteur qui influe sur l'activité d'un écosystème (Six, 2014). En effet, le métabolisme de certaines espèces, certaines réactions chimiques et la circulation des fluides sont directement liés à la température du milieu. En dessous de 6°C et au-dessus de 28°C, l'activité lombricienne est ralentie, voire stoppée (Six, 2014). De plus, les vers étant poïkilothermes, ils ne régulent pas leur température corporelle et sont donc sensibles aux variations de températures. Peu d'espèces survivent à des températures inférieures à 0°C ou supérieures à 28°C (Curry, 1998).

1.1.3.3.2. Facteurs anthropiques

Certaines activités humaines sont susceptibles de dégrader le cadre de vie de la faune du sol. Ici, elles ont été scindées en deux groupes dont le premier est constitué de l'ensemble des pratiques agricoles autres que l'usage des engrais et le second est utilisation de fertilisants minéraux.

➤ **Pratiques agricoles autres que l'utilisation d'engrais minéraux**

Les pratiques culturales tels que le labour, le mulching, l'usage répété des produits phytosanitaires (pesticides, herbicides, fongicides) influencent la densité et la diversité biologique des sols cultivés (Goor *et al.*, 2006). En effet, la préparation des lits de semence par un labour mécanique réduit l'activité des organismes du sol par la destruction de leurs habitats et la création d'un régime hydrique et de température inadéquats. On observe, par contre, une activité biologique intense dans les sols non labourés ou soumis à un labour minimum et où les résidus post-récoltes sont laissés sur place, avec parfois deux à cinq fois plus d'activité de vers de terre sur sol non labouré que sur sol labouré (Grigera *et al.*, 2007). Le tassement du sol crée la compaction du sol. Les systèmes de culture assurant une couverture permanente et retournant systématiquement les résidus post-récolte au sol favorisent la prolifération des invertébrés. Ces systèmes rendent alors la nourriture disponible et créent un pédoclimat propice au développement des animaux du sol. Par ailleurs, la macrofaune est plus abondante et diversifiée en culture associée qu'en monoculture dont la ressource en carbone plus faible (Lal, 2011). La mauvaise qualité de la litière dans les plantations de cacao, indiquée par les valeurs élevées du rapport C/N comprise entre 32,7 et 33,1, couplés à un faible contenu de N explique l'impact

négatif sur la diversité des vers de terre selon Tondoh *et al.* (2011). Ces auteurs ont montré la sensibilité des vers de terre aux activités agricoles à travers les paysages. C'est dans la même ligne d'idées que Moço *et al.* (2010) ont signalé au Brésil que la qualité de la litière dans le cadre de différents systèmes agroforestiers de cacao rend compte de la variation de la diversité de la faune du sol. La fumure organique a un effet positif sur les populations des macro-invertébrés. Pérès *et al.* (1996) ont montré un effet positif de la fertilisation organique (compost, fumier, lisier) sur l'ensemble des communautés lombriciennes. Les pesticides peuvent supprimer l'activité de la biologie du sol. On observe, par exemple, une élimination complète de la vie du sol par application du carbofuran et autres carbamates pesticides (Brown *et al.*, 2002). Romans & Robertson (1975) ont montré qu'une acidification et même un lessivage des sols entraînaient la diminution voire la disparition des lombrics. En effet, le seuil de viabilité des vers est évalué à un pH de 4,4 pour un sol acide et à un pH de 10 pour un sol alcalin (Bachelier, 1979). Une intensification agricole, comme le travail du sol et l'application de produits phytosanitaires, et la simplification du paysage entraînent généralement une perte de biodiversité (Foley *et al.*, 2005). En plus, un apport continu ou ponctuellement massif d'énergie au sein de l'agrosystème peut durablement le perturber et favoriser des changements faibles ou drastiques des propriétés fonctionnelles de l'écosystème, pouvant conduire à d'importants « dysfonctionnements » sur le long terme (Pimentel, 2006). Ceci renvoie à la notion de résilience écologique des écosystèmes (Griffiths & Philippot, 2013). C'est le cas des fertilisants chimiques.

➤ **Usage de fertilisants minéraux**

Pour pallier les baisses de rendements, des engrais chimiques sont utilisés pour améliorer les propriétés physico-chimiques des sols et compenser les carences en azote, en phosphore et en potassium (Roose *et al.*, 2008). Cependant, les engrais minéraux seuls ne suffisent pas, sur le long terme, à maintenir la fertilité des sols ou augmenter le rendement des cultures (Bado, 2002). En effet, leur utilisation excessive et exclusive entraîne (i) une augmentation de l'acidité, une dégradation du statut physique et une baisse de la matière organique du sol (Boli & Roose, 2000) et (ii) une minéralisation accrue de la matière organique des sols, conduisant, entre autres, à une diminution de l'abondance relative de certaines souches mutualistes au profit de souches pathogènes (Gryndler *et al.*, 2006). Ces pratiques, bien qu'initialement mises en place pour augmenter et maintenir la productivité des agrosystèmes, tendent à nuire à la durabilité de la fourniture des services agrosystémiques y compris celui de production. De nombreuses recherches sur les propriétés chimiques (Cakmak *et al.*, 2010) ont montré qu'une fertilisation

minérale, notamment l'apport de l'azote à long terme, peut causer des altérations des propriétés du sol. L'action des engrais est à juger non seulement sur les bénéfices immédiats qu'ils procurent avec l'augmentation des récoltes, mais aussi sur l'évolution pédologique qu'ils entraînent à plus longue échéance. Leur action sur la vie du sol est notamment essentielle. Les décomposeurs tels que les termites, les vers de terre, les acariens, les bactéries et champignons agissent dans la structuration du sol ce qui améliore la rétention des éléments nutritifs dans le sol (Mickael & Marine, 2020). Ils agissent également dans la minéralisation. Pour que les éléments nutritifs contenus dans les végétaux soient disponibles, ces derniers doivent subir une minéralisation grâce à l'interaction des décomposeurs et des autres organismes. Quand le nombre de décomposeurs diminue dans le sol, un nombre plus important d'éléments nutritifs se perd dans l'eau souterraine et de surface. Des traitements exagérés à l'engrais chimique peuvent tuer les décomposeurs et autres organismes du sol, ce qui entraîne une réduction de la rétention des éléments nutritifs (USAID, 2004). L'apport de nitrates, par exemple, accroît la productivité des cultures, mais il contrecarre la fixation biologique de l'azote atmosphérique effectuée naturellement dans le sol par diverses bactéries, plusieurs algues et de nombreux champignons (Prevot, 1970). Les engrais minéraux ont une influence sur la microflore et la faune des sols. Muller (1957) a observé que, dans des sols sableux, des apports de NPK + Ca ou NK + Ca augmentaient à la fois la microflore et la faune. En outre, Kipewarlic (1963) a constaté que, dans des sols argilo-sableux acides (lehm), la plus forte augmentation de la faune s'observait dans les parcelles ayant reçu à la fois du calcaire et du fumier ; les vers de terre y étaient 2, 3 à 9 fois plus nombreux que dans les parcelles témoins ou les parcelles à fumure NPK. Les insectes saprophages y étaient aussi plus nombreux et plus diversifiés, alors que dans les parcelles NPK leur développement se trouvait freiné. Weissen (1973) en étudiant l'évolution d'une litière de hêtres, a trouvé que les apports de scories potassiques, avec ou sans urée, augmentaient considérablement les activités de la faune ; les vers de terre et les larves de diptères devenaient plus nombreux et permettaient une transformation bien plus rapide de la litière avec amélioration notable de l'horizon supérieur.

1.1.4. Notion de stockage de carbone du sol

1.1.4.1. Définition

Il est nécessaire de distinguer la séquestration de carbone dans les sols du stockage de carbone dans les sols. Ces notions sont couramment confondues, y compris dans la littérature scientifique où l'expression « soil carbon sequestration » remplace souvent « soil carbon storage » (Krna & Rapson 2014). Le stockage du carbone dans le sol est l'augmentation du stock de

carbone sous une forme organique dans le compartiment sol dans le temps (Bernoux *et al.*, 2005 ; GIEC, 2013). La séquestration de carbone dans le sol est le retrait net de CO₂ de l'atmosphère résultant du transfert de son carbone dans des compartiments à temps de renouvellement lent du carbone organique du sol (Olson *et al.*, 2014). Ainsi, Bernoux *et al.* (2005) proposent la définition suivante : « La séquestration du carbone dans le sol pour un agro-écosystème donné, en comparaison avec un agro-écosystème de référence, et pour une période et une surface donnée, doit être considérée comme le résultat du bilan net, exprimé en équivalents C-CO₂ ou en équivalents CO₂, de tous les flux directs de gaz à effet de serre à l'interface sol-plante atmosphère, mais aussi de tous les flux indirects (combustibles, émissions animales) ».

Grâce aux plantes et aux organismes vivants, le sol est le plus grand réservoir de carbone terrestre. On estime que 1500 Gt de carbone, ou environ trois fois le montant présent dans l'atmosphère, est stocké dans le mètre supérieur du sol (Houghton 2007). Plus de carbone dans le sol signifie plus de matière organique et donc amélioration de la production agricole. Dans cette optique, en 1999, une étude de Jérôme Balesdent et Dominique Arrouays a indiqué un chiffre d'une augmentation annuelle de ce stockage de 0,4 % (quatre pour mille), à l'échelle globale. Elle permettrait une compensation des émissions résiduelles de gaz à effet de serre d'origine anthropique. En effet, à l'échelle planétaire, le stock de carbone organique des sols représente de l'ordre de 2 400 Gt de C, soit le triple de la quantité de carbone contenue sous forme de CO₂ dans l'atmosphère (860 GtC). Le rapport entre les émissions anthropiques annuelles de C (9,4 GtC) et le stock de C des sols (2 400 GtC) est de l'ordre de 4‰, ce qui suggère qu'une augmentation de 4‰ par an du stock de C des sols permettrait théoriquement de compenser les émissions anthropiques de CO₂ (Minasny *et al.*, 2017).

Le carbone des sols étant un levier très intéressant pour diminuer l'impact du changement climatique, l'initiative "4 pour mille : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat" a été portée par la France en 2015 à l'occasion de la COP-21. Elle vise à promouvoir l'augmentation des teneurs en carbone organique dans les sols, au nom des bénéfices attendus en termes d'atténuation du changement climatique, mais aussi de préservation des sols et de sécurité alimentaire du fait des effets positifs du carbone des sols sur leurs propriétés et sur les rendements agricoles.

1.1.4.2. Cycle du carbone organique du sol

Le cycle du carbone organique du sol correspond à l'entrée de carbone organique dans le sol, à sa transformation et sa dissipation. De nombreux processus sont en jeu :

- la déposition : il s'agit de l'addition du carbone organique du sol à la fraction organique du sol ;
- l'altération : ce processus est la conversion du carbone organique du sol d'une structure chimique en une autre différente, résultant d'attaques enzymatiques ou de réactions chimiques ;
- l'assimilation : elle fait référence à l'incorporation du carbone organique du sol dans les tissus des organismes décomposeurs et enfin ;
- la minéralisation qui correspond à la conversion du carbone organique du sol en dioxyde de carbone (CO₂), via la respiration des organismes du sol (Baldock & Skjemstad, 2000).

La somme de ces processus aboutit à la notion de décomposition du carbone organique du sol (Baldock & Skjemstad, 2000). La figure 9 retrace ce cycle en milieu agricole.

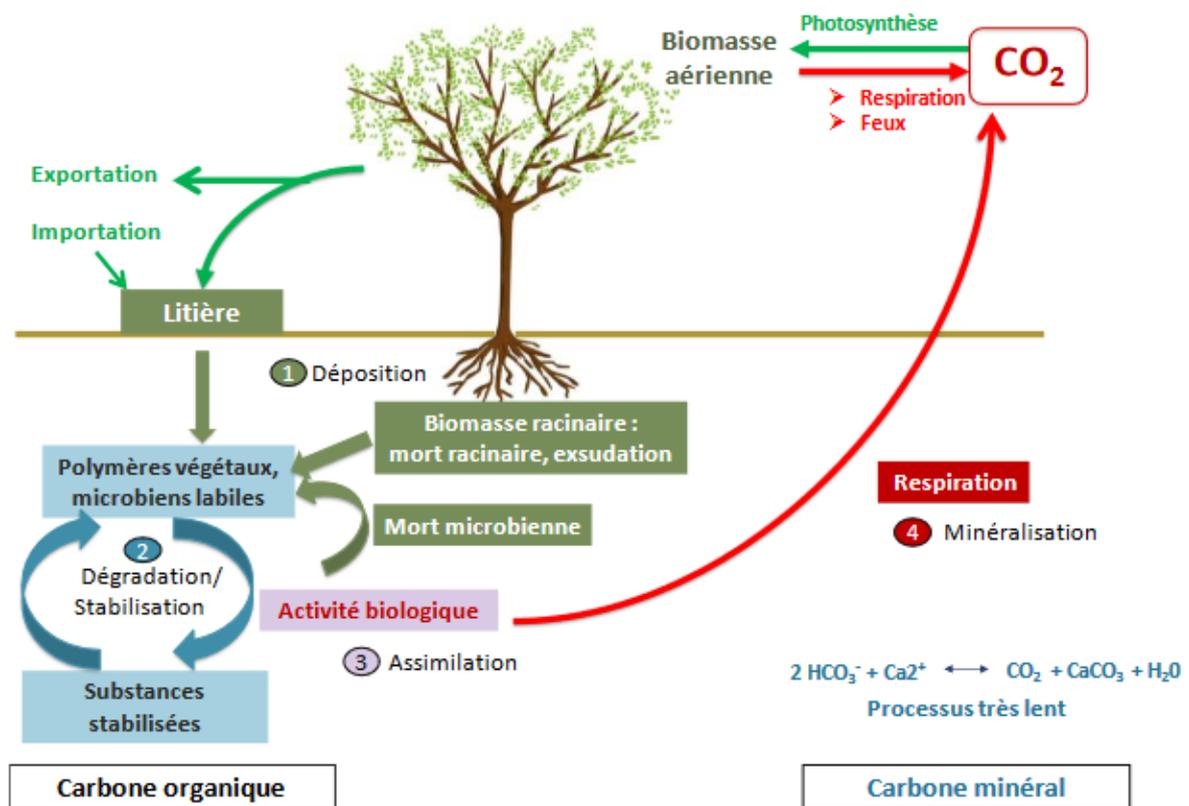


Figure 9 : Cycle du carbone du sol (Chenu *et al.*, 2014 ; Lehmann & Kleber, 2015)

1.1.4.3. Dynamique du carbone organique dans les sols

Le stock de carbone organique contenu dans les sols naturels présente un équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et la perte par émission de CO₂ due à leur décomposition.

Dans les conditions normales d'aérobic des sols, la majorité du carbone apporté est labile et seulement une petite fraction (1 %) de ce qui entre dans le sol (55 Pg/an) s'accumule dans la fraction stable qu'est la fraction humique (0,4 Pg/an).

Le taux de minéralisation de la matière organique dépend principalement de la température et de la disponibilité de l'oxygène, de l'utilisation des terres, du système de culture, et de la gestion des sols et des cultures (Konan *et al.*, 2017). Pour un sol déterminé soumis à une pratique constante, un pseudo équilibre est atteint pour le contenu en matière organique du sol après 30 ou 50 ans (Greenland, 1995).

1.1.4.4. Puits de carbone

En 2000, le GIEC a défini le puits de carbone comme « tout processus ou mécanisme qui absorbe un gaz à effet de serre, tels le CO₂ et le CH₄ présents dans l'atmosphère ». Le concept de puits de carbone s'est diffusé avec le protocole de Kyoto créé dans le but de réduire les concentrations croissantes de CO₂ atmosphériques et de lutter ainsi contre le réchauffement climatique. L'écosystème forestier séquestre et emmagasine plus de carbone que tout autre écosystème terrestre (Gibbs *et al.*, 2007). Il accumule d'énormes quantités de carbone dans le bois, les racines, le sol et l'écosystème via la photosynthèse (Pignard *et al.*, 2004). Un puits a pour contraire une source qui consiste en une émission du CO₂ ou GES dans l'atmosphère et la variation entre ces deux entités constitue le flux. Cependant les réservoirs ou pools de carbone désignent les unités physiques capables de stocker du carbone, suite à une action de puits (par exemple la séquestration par les arbres) ou de captage (par exemple dans une formation géologique). Cependant, la quantité de carbone accumulée dans un réservoir désigne un stock. Le sol pouvant

1.1.4.5. Facteurs influençant le stockage de carbone dans les sols

1.1.4.5.1. Facteurs naturels

Les principaux facteurs jouant sur l'évolution de la matière organique concernent d'abord la végétation (apport de résidus, composition de la plante), ensuite les facteurs climatiques (température/conditions d'humidité) et enfin les propriétés des sols (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité). La texture du sol peut également influencer entre autres la minéralisation, par la présence d'argiles, lesquelles assurent une protection physique de la matière organique (Parnaudeau, 2005).

1.1.4.5.2. Facteurs anthropiques

Les autres facteurs relatifs à la fertilisation du sol (N, P et K) ou l'irrigation ont un effet sur la production de la plante et donc sur la teneur en matière organique. Les premiers essais agronomiques conduits dans des prairies entre le 19^{ème} et le 20^{ème} siècle ont concerné les effets de la fertilisation sur la composition botanique, la structure de la végétation et la production de biomasse. Ce qui a permis d'une part de disposer d'un corpus de résultats important, mais aussi d'évaluer les effets à long terme des pratiques de fertilisation. Dans la grande majorité des essais, l'accroissement des apports de N, P et K s'est traduit par une augmentation de la biomasse et de la valeur nutritive du fourrage produit (Soussana & Lemaire, 2014). Un apport modéré d'engrais N et P stimule la productivité du couvert végétal et augmente les flux de C depuis l'atmosphère vers le sol et ainsi le stockage de carbone sous prairie (Fornara *et al.*, 2016). Il semble que 1,15 kg de NPK soit nécessaire pour stocker 1 kg de carbone (Poeppleau *et al.*, 2018).

De mauvaises pratiques agronomiques peuvent résulter en un effet d'activation positif pouvant mener à des pertes non désirables dans le système. Un apport élevé d'engrais N et P peut stimuler la minéralisation de la matière organique des sols ainsi libérer d'importantes quantités d'azote minéral pouvant être perdues par lessivage, entraîner le dégagement de CO₂ dans l'atmosphère et causer éventuellement une diminution du taux de matière organique dans le sol (Jones & Donnelly, 2004).

Peu d'études abordent les effets de la combinaison de ces éléments relativement à l'utilisation d'un unique élément (Kidd *et al.*, 2017 ; Eze *et al.*, 2018).

L'effet de la fertilisation minérale azotée sur la teneur en carbone organique du sol est très complexe. En conditions naturelles, l'ajout d'azote dans le sol peut non seulement entraîner un effet d'activation positif sur la minéralisation de la matière organique du sol, mais aussi augmenter la quantité de biomasse végétale produite.

De façon générale, la fertilisation minérale semble stimuler le stockage de C, mais avec des nuances suivant la formulation de l'engrais (N, NP, PK, NPK) et sans qu'il y ait de réel consensus entre les études sur la formulation la plus efficace pour le stockage de C. Il semble que l'ordre de grandeur du stockage additionnel par rapport à une situation non fertilisée s'échelonne de 0 à +0,3 t C ha⁻¹ an⁻¹ (Poeppleau *et al.*, 2018). Ce stockage est en effet dépendant du type de sol, du mode d'exploitation de l'herbe (fauche, pâturage), des doses ajoutées (faibles, modérées, fortes) ainsi que de la durée d'application et de la profondeur du sol analysé.

Le stockage du carbone dans le sol peut résulter d'un effet d'activation négatif, notamment par l'apport de résidus végétaux riches en lignine et plus difficilement décomposables. Un certain équilibre entre le carbone et l'azote dans le sol est essentiel afin d'éviter l'immobilisation de l'azote par les microorganismes. Dalenberg & Jager (1989) soulignent d'ailleurs que malgré qu'ils puissent entraîner un effet d'activation positif, les matériaux organiques ajoutés laissent parfois davantage de carbone dans le sol qu'il n'en est perdu par minéralisation. La teneur en carbone organique et la dynamique de décomposition et d'accumulation de la matière organique d'un sol sont donc le résultat d'un équilibre entre les nouveaux apports de carbone dans le système, les pertes issues de la minéralisation ou de l'érosion et le carbone organique protégé des attaques microbiennes. Il existe une grande variabilité spatiale et temporelle du stockage du carbone dans les sols. Les différences saisonnières et inter-annuelles sont le plus probablement déterminées par la variabilité du climat et les variations à court terme dans l'occupation des sols. Par contre, les différences spatiales de stockage du carbone sont contrôlées par la texture du sol et la productivité primaire des sites (qui déterminent le potentiel de stockage) et sont modifiées par l'utilisation à long terme des sols et les techniques culturales. Le stockage potentiel du C dans les sols dépend donc étroitement du mode d'occupation des terres et de leur gestion (Balesdent *et al.*, 2000). Laganière *et al.* (2010) précisent que la quantité de carbone séquestrée est fonction des espèces d'arbres, des régions géographiques (climat, sol), des densités de plantation et de la gestion du système. Ils estiment que la captation de carbone dans une culture agroforestière de région humide se situe autour de 50 tonnes C/ha en moyenne.

1.1.4.6. Différentes approches de mesure du carbone du sol

Deux approches sont couramment utilisées. Il s'agit de l'approche diachronique et de l'approche synchronique (Olson *et al.*, 2014a ; Olson *et al.*, 2014b). L'approche diachronique consiste à mesurer au cours du temps, sur une même parcelle, l'évolution des stocks de C dans le sol depuis un temps T0 qui correspond à la mise en place du nouveau système. Cette approche est considérée comme la plus fiable (Costa-Junior *et al.*, 2013), car elle limite les biais liés à l'utilisation de parcelles différentes (texture). Mais en pratique elle reste peu utilisée car la terre est mise en culture sans que la caractérisation initiale n'ait été faite (Smith, 2004). L'approche synchronique consiste à comparer, à un instant donné, le stock de C d'une parcelle correspondant à la pratique stockante menée depuis plusieurs années à celui d'une parcelle de référence (gestion conventionnelle). Il faut cependant s'assurer que la parcelle de référence n'ait pas subi de modifications majeures. Si le stock de carbone organique d'un sol dépend du bilan

entre les entrées et les sorties de MO, la quantité de C stockée et la durée de ce stockage dépendent aussi de processus de stabilisation du carbone complexes.

Conclusion partielle

Le cacaoyer est une plante des zones tropicales humides cultivée dans une dizaine de pays dans le monde où il fournit d'importantes devises aux populations. La production du cacao est largement dépendante du climat et du sol et se fait sous différents systèmes, à savoir, le système extensif et le système intensif. En système intensif, la fertilisation est nécessaire et se fait au travers des fumures minérales et/ou organiques. Leur application n'est pas sans conséquence sur la vie des sols. Les types de fertilisants minéraux et leur mode de gestion dans les systèmes de production agricoles ont une incidence négative ou positive sur l'activité biologique et le stock de carbone du sol.

*DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL
ET MÉTHODES*

2.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA ZONE D'ETUDE

L'étude a été menée dans les régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua en Côte d'Ivoire. Ce sont aujourd'hui deux régions de culture de cacao qui correspondent aux deux dernières « boucles » successives de production de cacao en Côte d'Ivoire.

2.1.1. Localisation géographique

La région de la Nawa est située au Sud-ouest de la Côte d'Ivoire entre 5° 35'32'' et 5° 58'44'' de latitude Nord et 6° 34'24'' et 6° 36'00'' de longitude Ouest (Figure 10 A). Elle fait frontière avec les régions de San-Pédro et du Gbôklè au Sud, du Cavally à l'Ouest, du Guémon et du Haut-Sassandra au Nord et du Gôh et Lôh-Djiboua à l'Est. Elle couvre une superficie de 9 643 km² (INS, 2015).

La région du Lôh-Djiboua (Figure 10 B) est située quant à elle au Centre-Sud de la Côte d'Ivoire entre 5°20'00'' et 6°08'22'' de latitude Nord et 5°22'00'' et 5°57'15'' de longitude Ouest. Elle est limitée par les régions du Gôh au Nord-Ouest, de l'Agnéby Tiassa à l'est, des Grands ponts au Sud-Est et du Gbôklè au Sud-ouest. Elle couvre une superficie de 8 750 Km² (INS, 2015).

2.1.2. Climat

Les localités de Soubré, Méagui et Mayo dans la région de la Nawa jouissent d'un climat de type subéquatorial caractérisé par deux saisons pluvieuses (Avril-Juin et Septembre-Novembre) et deux saisons sèches (Juillet-Août et Décembre-Mars). La pluviométrie moyenne est relativement abondante, allant de 1 203 mm à 1 392 mm de pluie par an et une température moyenne mensuelle de 25,8 °C (Evi *et al.*, 2007).

Quant aux localités de Divo, Lakota et Guitry dans la région du Lôh-Djiboua, le climat est de type tropical et caractérisé par deux saisons humides (Mai à Juillet et Septembre à Novembre), qui alternent avec deux saisons sèches. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1 320 mm (Kouamé *et al.*, 2007). La température moyenne est de 27°C. L'humidité moyenne de 85 % connaît de fortes variations saisonnières, les minima étant observés entre Novembre et Mars. La durée d'insolation annuelle est d'environ 1800 à 2000 heures. Les insolutions les plus faibles sont enregistrées en Août et les plus élevées en Décembre (Kalm & Kesse, 1977).

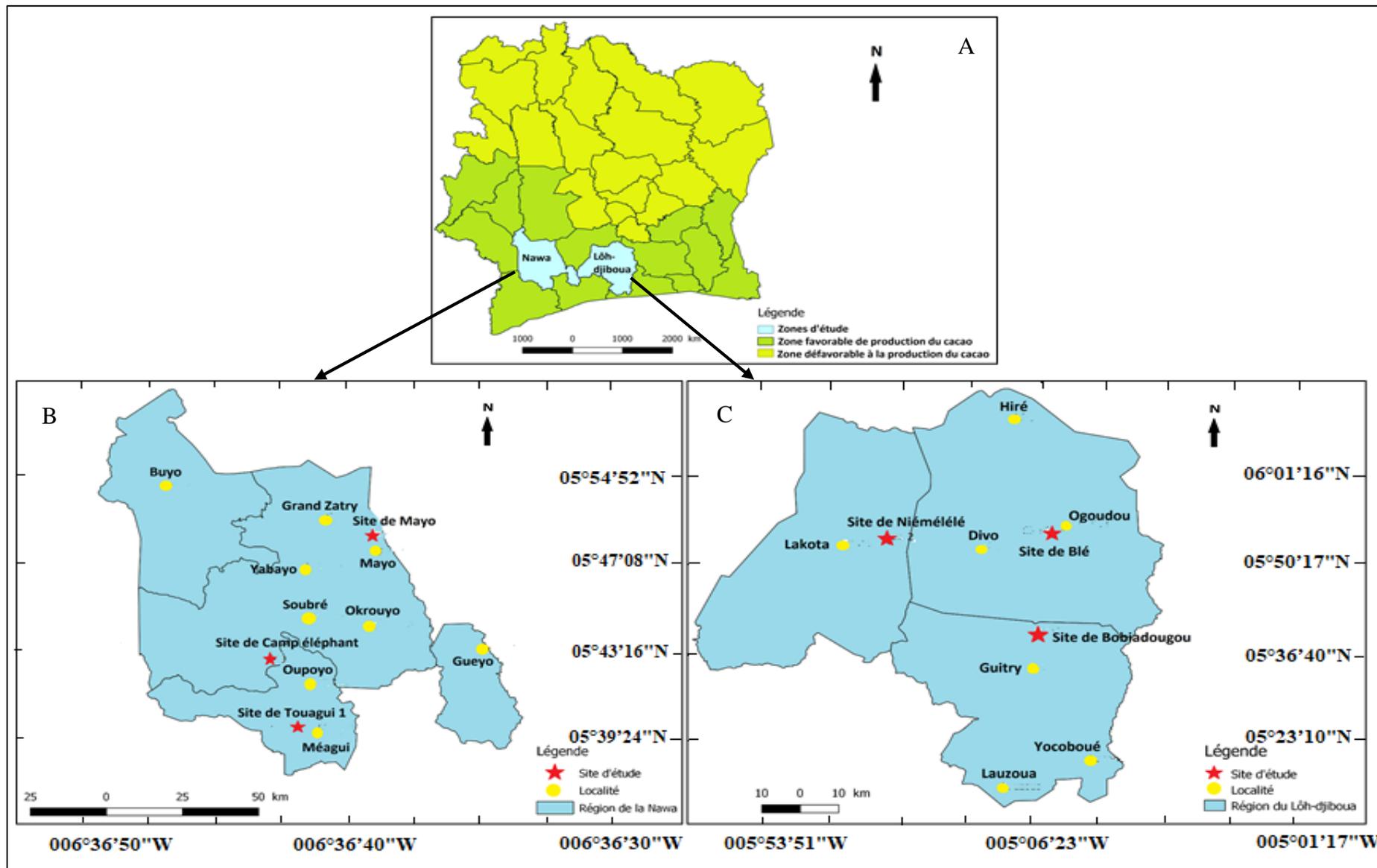


Figure 10 : Cartes de la Côte d'Ivoire (A) et des régions de la Nawa (B) et du Loh-Djiboua (C) présentant les sites d'étude

2.1.3. Végétation

Les localités de Soubré, Méagui et Mayo dans la région de la Nawa est située dans le secteur ombrophile du domaine guinéen. La végétation de la zone est constituée de forêts denses humides sempervirentes. La persistance du feuillage est un caractère important pour le cycle de la matière organique et la constance du microclimat intérieur (Kouamé, 2011). Ces forêts denses humides couvraient au début des années 1950 plus de 1,7 million d'hectares. En 1991, 800 000 hectares étaient encore couverts de forêts denses dont 650 000 en forêts classées (SODEFOR, 1992). Actuellement, la forêt du Sud-ouest subit une forte régression sous une pression anthropique croissante (Brou, 2005). Cette pression est liée à l'exploitation du bois et à la mobilisation de vastes territoires pour les cultures de rente (cacao, café, hévéa et palmier à huile), puis à la culture itinérante sur brûlis. La végétation dense et humide fait place aujourd'hui à des lambeaux de forêts et d'immenses plantations de cultures pérennes traditionnelles ou industrielles (FAO, 2009). Toutefois, il existe deux forêts classées gérées et protégées par la SODEFOR, les monts Kourabahi (3350 ha) et la forêt classée de Niégré dans la Sous-préfecture d'Okrouyo. Concernant les localités de Divo, Lakota et Guitry dans la région du Lôh-Djiboua, la végétation jadis constituée de forêt dense semi-décidue est réduite aujourd'hui à une mosaïque de reliques forestières à causes des activités agricoles et l'exploitation forestière.

2.1.5. Géologie

Les principales formations géologiques des départements de Soubré, Méagui et Mayo sont similaires à celles définies dans le Sud-Ouest ivoirien. Ces formations appartiennent au domaine éburnéen (2 500 à 1 550 Ma) et sont caractérisées par une grande diversité de massifs plutoniques. Selon Kouamelan (1996), la particularité du domaine éburnéen réside dans la coexistence des formations archéennes et des formations birimiennes. Pour Papon et Lemarchand (1973), les orthogneiss migmatitiques du domaine SASCA représenteraient un socle granitique libérien sur lequel reposeraient en discordance des séries birimiennes métamorphiques d'origine pelitique.

Tagini (1971) a défini huit unités géologiques regroupées en quatre plus grandes. Ces unités sont disposées selon un alignement NE-SW. Ce sont :

- les granites éburnéens composés de granites à deux micas et des granitoïdes ;
- les syénites d'âge permien à protérozoïque inférieur ;

- les formations birimiennes caractérisées par les métasédiments indifférenciés (flyschs), les roches métamorphiques d'âge incertain, les métavulcanites et les métasédiments associés à des métavulcanites ;
- les migmatites anciennes antébirimiennes.

Les formations géologiques qui dominent dans les localités Divo, Lakota et Guitry dans la région du Lôh-Djiboua sont des roches issues du précambrien. Elles sont constituées de micaschistes, de gneiss, de granites et de granodiorites à migmatites (Papon, 1977).

2.1.6. Sol

Des études menées par Birmingham (2003), ICRAF (2011), Kassin *et al.* (2016) et N'Guessan (2017) permettent de faire l'inventaire des sols observés dans le Sud-Ouest. Ainsi, les sols ci-dessous sont observés :

- Hyperdystric Plinthic Ferralsols provenant de divers granitoïdes et des migmatites ; ces sols très souvent indurés et pauvres en éléments minéraux, ce qui les rend peu favorables à la cacaoculture.
- Dystric Ferralsols, profonds, ne montrant pas de contrainte liée à l'induration et donc favorables à la cacaoculture ;
- Gleysols issus d'alluvions, peu propices ou inaptes à la cacaoculture à cause du mauvais drainage de l'eau ;
- Acrisols, ces sols présentent de nombreuses contraintes morphologiques à la cacaoculture, notamment, des niveaux graveleux et ferruginisés proches de la surface et un mauvais drainage en profondeur (classe de drainage : 2,2 à 5,5).
- Ferralic Eutric Cambisols issus des roches basiques et de schistes tropicaux, généralement profonds et bien drainés, peu désaturés et ayant une capacité d'échange cationique élevée. Ils ont une meilleure réponse à la fertilisation minérale, ce qui fait d'eux, des sols très favorables à la cacaoculture (WRB, 2014).

Dans la région du Lôh-Djiboua, les sols sont dominés par les ferralsols. Une variété de sol a été décrite par Kassin *et al.* (2016) et N'Guessan (2017). Ainsi, les sols ci-dessous ont été caractérisés la région :

- Gleysols, faiblement propices ou inaptes à la cacaoculture du fait des phénomènes d'hydromorphies permanentes qui les caractérisent ;
- Dystric Ferralsols, ils sont favorables à la cacaoculture du fait de leur profondeur ;
- Acrisols, ils sont peu favorables à la culture du cacaoyer du fait des contraintes décrites plus haut.

- Ferralic Eutric Cambisols, ils sont très favorables à la cacaoculture à cause de leur profondeur et de la forte présence des bases échangeables (WRB, 2014).

Conclusion partielle

Les deux zones d'étude constituent les principales zones de production du cacao en Côte d'Ivoire. Les caractéristiques naturelles favorables qui y régnaient sont contrastées par les conditions actuelles (réduction de la pluviosité et hausse de la température). Les sols observés sont des Acrisols, Eutric Ferralsols, Eutric Cambisols, Dystric plinthic Ferralsols et Arenosol qui se sont formés aux dépens de différents substratums. Selon le substratum, ces sols sont peu favorables à très favorables à la culture du cacaoyer.

2.2. MATÉRIEL

Pour réaliser cette étude, un ensemble de matériel a été utilisé. On peut les scinder en matériel végétal, édaphique, chimique, technique et de laboratoire et outils informatiques.

2.2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal à partir duquel l'étude a été menée est constitué de cacaoyers non sélectionnés, appelés communément "tout-venant", âgés de 12 à 15 ans. En effet, le verger cacaoyer ivoirien est caractérisé par des plants de cacaoyers non sélectionnés, qui, à maturité, ont un faible rendement.

2.2.2. Matériel édaphique

Les sols qui ont servi à l'expérimentation sont ceux sur lesquels sont installés les sites d'étude. Sur ces sols 6 fosses, 96 échantillons de l'horizon 0 - 30 cm de sol et 192 échantillons pour chacune des strates 0 - 10, 10 - 20 et 20 - 30 cm de sol ont constitué le matériel édaphique.

2.2.3. Matériel chimique

Les intrants utilisés sont composés de divers pesticides (insecticides et fongicides) et d'engrais. Trois pesticides ont été utilisés pour l'entretien sanitaire des cacaoyères. Il s'agit de l'insecticide Callifan super (Acetamipride 20 g/l + Bifenthrine 20 g/l) et des fongicides Ridomil (métalaxyl-M 6 % + Oxyde de cuivre 60 %) et Caoprotect (Métalaxyl-M 6 % + l'oxyde de cuivre 60 %). Les engrais minéraux, au nombre de quatre, ont servi à la fertilisation des sols sous cacaoyers (Figure 11). Ce sont :

- NPK 0-23-19+ 10 CaO + 5 MgO avec pour code F1 ;
- NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn désigné par F2 ;
- NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn représenté par F3 ;
- NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn apparaissant sous le code F4.

Ces fertilisants sont des formules d'engrais proposées par la recherche pour la fertilisation des cacaoyers au Centre-Sud et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire (Kassin *et al.*, 2016 ; N'Guessan, 2017). Leur formulation est survenue suite à la cartographie des sols dans ces deux zones agroécologiques dans le cadre du projet IDH.



Figure 11 : Fertilisants minéraux utilisés

1) - NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO, 2) - NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, 3) - NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn et 4) - NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

2.2.4. Matériel technique

Le matériel technique utilisé (Tableau IV) est constitué essentiellement par les outils qui servent en général à la caractérisation et la description morpho-pédologique, la détermination des caractéristiques hydrodynamiques et thermiques des sols, la caractérisation de l'activité biologique des sols et la mesure du stock de carbone des sols.

Tableau IV : Liste de matériel technique utilisé

Type de matériel technique	Usage
Matériel technique de terrain	
Un GPS model Garmin 64	Géoréférencer les parcelles
Un code Munsell	Déterminer la couleur des horizons
Un couteau de pédologue	Sonder la pénétrabilité du sol
Des fiches de description de profils pédologiques	Identifier le type de sol
Une tarière	Prélèver les échantillons de sol
Un appareil photographique	Capturer les images des profils pédologiques
Des stations météorologiques de type Tahmo	Mesurer la pluviométrie
Un humidimètre (TDR)	Mesurer l'humidité volumique en eau des sols
Un groline soil test (Hanna)	Mesurer la température du sol
Une grille métallique à maille 1cm x 1 cm	Réaliser le piège à litière et suivre la décomposition de la litière
Une balance électronique	Estimer la masse de la litière végétale recueillie
Un quadra métallique de dimension 25 cm x 25 cm x 30 cm	Réaliser les monolithes de sol
Des bâches plastiques	Trier les prélèvements de sol
Des boîtes plastiques	Echantillonner la faune du sol
L'alcool à 70 °C	Conservier les espèces
Le diagramme des textures USDA (1987)	Déterminer la texture du sol
Matériel technique de laboratoire	
Un broyeur centrifuge à bille	Broyer finement les échantillons de sol
Une balance électronique à lecture directe	Effectuer les pesées
Un pH-mètre électronique de paillasse	Mesurer le pH du sol
Un spectrophotomètre à flamme	Déterminer la teneur, en potassium, en sodium, en magnésium et en calcium
Une pipette de Robinson	Analyse granulométrique des échantillons de sols
Des agitateurs mécaniques	Servi à homogénéiser les solutions
Un spectrophotomètre à absorption atomique	Déterminer les teneurs en phosphore
Une étuve	séchage des échantillons de sol et de feuilles
Un appareil à minéralisation Kjeldhal	Doser l'azote
Outils informatiques	
Le logiciel Word et l'interface Excel	La saisie des données
Les logiciels XLSTAT version 2016 et SAS 9.4	Réaliser les tests statistiques

2.3. MÉTHODES

Cette partie du document est scindée en six parties qui traitent, dans l'ordre, du choix des sites, des dispositifs expérimentaux et des traitements d'engrais minéraux, du choix des doses des fertilisants minéraux, de l'entretien des parcelles et de la collecte et l'analyse des données.

2.3.1. Choix des parcelles cacaoyères

Deux grandes zones agro-écologiques ont été choisies en raison de leur importance dans la production cacaoyère actuelle en Côte d'Ivoire. Il s'agit de la région du Lôh-Djiboua et celle de la Nawa. Dans chaque région, trois localités ont été retenues, à savoir : Divo, Lakota et Guitry dans la région du Lôh-diiboua et Soubré, Méagui et Mayo dans la région de la Nawa. Dans chaque localité, une plantation de cacaoyers a été sélectionnée selon les critères suivants :

- la parcelle a été sélectionnée dans le cadre du projet de cartographie des sols de cacaoyers (projet IDH) mené par le CNRA, lequel projet avait abouti à la mise au point de six hypothèses de formules d'engrais dont quatre sont appliquées ici ;
- la plantation de cacaoyers a un âge compris entre 12 et 15 ans, tranche d'âge préférentielle pour l'application des engrais du fait de l'appauvrissement général des sols après une longue période d'exploitation (Lachenaud, 2005 ; Ruf, 2014) ;
- le sol de la cacaoyère n'a pas été l'objet d'une fertilisation durant les trois années avant l'essai, afin d'éliminer l'arrière effet du précédent fertilisant qui pourrait influencer et même interagir avec l'effet des engrais formulés ;
- la cacaoyère est exempte d'un entretien à l'herbicide durant les trois dernières années avant l'essai, pour éviter que les herbicides influencent de manière négative le développement de la faune du milieu (Fotio *et al.*, 2006) ;
- la parcelle est homogène en termes de densité de cacaoyers dans le but d'assurer une couverture totale du sol, surtout que la densité de plantation influence la quantité de carbone (Montagnini & Nair, 2004) ;
- la cacaoyère est exempte de maladie telle que le Swollen Shoot pour éviter la mort des cacaoyers durant l'essai.

2.3.2. Dispositif expérimental et application des engrais utilisés

Sur chaque site, une parcelle de 0,672 à 1 hectare a été délimitée et l'essai a été conduit selon un dispositif expérimental en bloc de Fisher de quatre répétitions séparées les unes des autres de 6 m. Dans chaque bloc, sont distribuées quatre parcelles élémentaires de 15 m × 15 m chacune et distantes de 5 m les unes des autres. L'essai compte donc 16 parcelles élémentaires

dont quatre pour chaque traitement. Cependant sur le terrain, les résultats du diagnostic phytosanitaire des cacaoyers et la configuration géométrique des parcelles, a donné lieu, à une disposition particulière des blocs (Annexe 3).

Les fumures minérales utilisées sont essentiellement constituées d'engrais NPK de formule 0-23-19 où le phosphore est de source Super Triphosphate (TSP) et de formules 0-15-15 ; 3,5-14-7 et 4-10-10 où le phosphore est issu du Phosphate Réactif (RP) (Tableau V). Ces engrais ont été choisis suite aux travaux de cartographie des sols favorables à la cacaoculture proposés par Kassin *et al.* (2016) et N'Guessan, (2017) à travers une méthode appropriée de diagnostic sol. Ils ont été appliqués selon un contexte de régionalisation des fumures minérales. Ainsi, trois engrais F1, F2 et F3 ont été, respectivement, appliqués comme fumure de couverture au niveau de la région du Lôh-Djiboua. Les engrais F1 et F2 ont également été apportés comme fumure de couverture dans la région de la Nawa en plus de F4. Ces différents traitements sont comparés à un témoin à blanc sans engrais (T0) comme présentés dans la figure 12.

Tableau V : Traitements effectués

Régions	Traitements	Code du fertilisant	Composition	Source du phosphore et présence ou absence d'azote
	T0	----	Sans engrais	-----
Lôh-Djiboua	T1	F1	NPK 0-23-19+ 10 CaO + 5 MgO	TSP
	T2	F2	NPK 0-15-15+ 17 CaO + 5 MgO + 1 B ₂ O ₃ + 0,5 Zn	RP (-N)
	T3	F3	NPK 3,5-14-7+ 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B ₂ O ₃ + 0,3 Zn	RP (+N)
	T0	----	Sans engrais	-----
Nawa	T1	F1	NPK 0-23-19+ 10 CaO + 5 MgO	TSP
	T2	F2	NPK 0-15-15+ 17 CaO + 5 MgO + 1 B ₂ O ₃ + 0,5 Zn	RP (-N)
	T3	F4	NPK 4-10-10+ 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B ₂ O ₃ + 0,3 Zn	RP (+N)

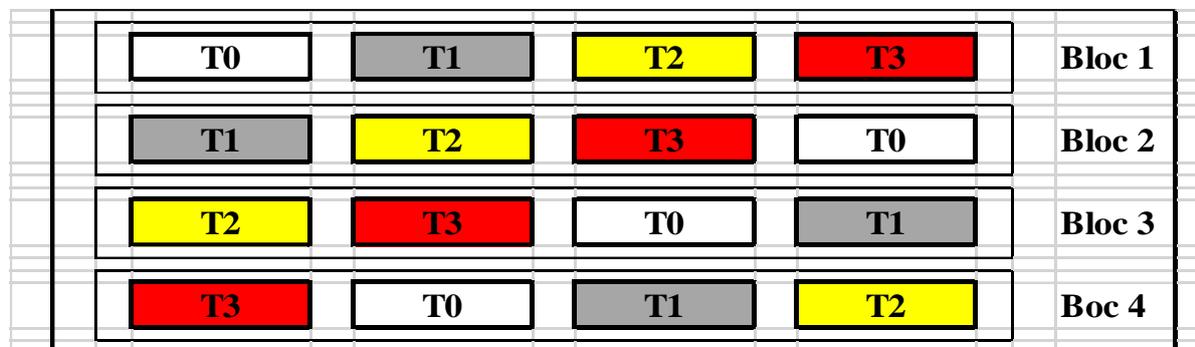


Figure 12 : Dispositif expérimental en bloc de Fisher

T1 = F1, T2 = F2, T3 (Lôh-Djiboua) = F3, T3 (Nawa) = F4 et T0 = Témoin sans engrais

2.3.3. Choix des doses d'engrais, périodes d'épandage et mode d'application

Les fumures minérales ont été apportées à différentes doses comme résumées dans le tableau VI et en deux fractions égales pour éviter les pertes par lixiviation par drainage ou par consommation de luxe (Kébé *et al.*, 2005). Le premier apport a été effectué en mars-avril et le second en septembre-octobre. A chaque apport, il s'agissait de :

- 200 g/ pied de cacaoyer pour l'engrais F2 ;
- 400 g/ pied de cacaoyer pour les engrais F3 et F4 ;
- 150 g/pied de cacaoyer au Centre-sud et 200 g/pied de cacaoyer au Sud-ouest pour l'engrais F1.

Ces apports de fumures minérales ont été faits durant les trois campagnes successives de production de cacao, à savoir, les campagnes de : 2017-2018, 2018-2019 et 2019-2020.

Les fumures minérales ont été épandues en couronne autour des pieds de cacaoyers après avoir déblayé la litière au sol dans un rayon qui varie de 0,6 à 1 m (Kébé *et al.*, 2009).

Tableau VI : Types et doses d'engrais appliqués par zone agroécologique

Régions de production	Code de l'engrais	Doses en g/pied/an
Lôh-Djiboua	F1	300
	F2	400
	F3	800
Nawa	F1	400
	F2	400
	F4	800

2.3.4. Entretien des parcelles

Un désherbage régulier à la machette sans aucun traitement à l'herbicide a été fait durant les trois campagnes dans les différentes plantations cacaoyères afin d'éviter les interactions entre les fertilisants minéraux apportés et les herbicides. En effet, ces derniers pourraient impacter négativement la faune du sol. Les produits phytosanitaires utilisés est un insecticide (Callifan super) et de fongicides (Ridomil et Caoprotect). Ils ont servi à lutter contre les mirides, les cochenilles et le phytophthora (agent pathogène de la pourriture brune). L'insecticide callifan (Acetamipride 20 g/l + Bifenthrine 20 g/l) a été utilisé à la dose 0,5 l/ha. En ce qui concerne les fongicides, la Ridomil (métalaxyl-M 6 % + Oxyde de cuivre 60 %) a été appliquée à la dose de

1 kg/ha, tandis que le caoprotect (Métalaxyl-M 6 % + l'oxyde de cuivre 60 %) a lui été utilisé à la dose de 200 g/ha.

2.3.5. Collecte des données

Les données ont été obtenues par étapes successives et se scindent en deux phases : une phase de terrain et une phase de laboratoire.

2.3.5.1. Phase de terrain

Sur le terrain, les données ont été obtenues directement par la mesure, la description ou le relèvement des paramètres en lien avec le climat, la morpho-pédologie, la densité apparente du sol, l'humidité du sol, la température du sol, la macrofaune du sol et la litière de feuilles de cacaoyers. Les dates de collectes de données de ces paramètres sont mentionnées en annexe 3.

2.3.5.1.1. Donnée climatique

La seule donnée climatique mesurée est la pluviométrie. Elle est obtenue par un relevé tous les matins à 7 heures et soirs à 18 heures durant l'expérimentation sur les stations agrométéorologiques installées sur les sites du CNRA dans les différentes régions.

2.3.5.1.2. Caractéristiques morpho-pédologiques

Une fosse pédologique a été ouverte manuellement dans chaque parcelle de l'essai et la description du profil pédologique a été faite conformément aux variables définies dans la classification française CPCS (1967). Pour cette étude, cinq paramètres morphologiques essentiels ont été considérés, à savoir, la couleur, la texture, le taux et la nature des éléments grossiers, le drainage interne et la profondeur utile pour l'identification des sols à vocation cacaoyère. Dans la pratique :

- la couleur a été déterminée à l'aide du code Munsell, par comparaison d'une motte humide aux couleurs standards indiquées par la teinte (Hue), la clarté (Value) et la pureté (Chroma) ;
- la texture a été déterminée par projection des teneurs des différentes fractions granulométriques, à savoir : les argiles (0 à 2 μm), les limons (2 à 50 μm) et les sables (50 - 2000 μm), sur le diagramme des textures USDA (1987) ;
- la nature des éléments grossiers a été déterminée par observation et leur taux pondéral a été évalué selon trois niveaux : inférieur à 20 % ; 20 à 50 % ; et supérieur à 50 % (Yoro, 2004 ; Koko *et al.*, 2008) ;

- le drainage interne a été apprécié à partir de la couleur du sol ;
- la profondeur utile a été évaluée par la mesure de la profondeur de la fosse réalisée.

Cette description a permis de classer les sols selon la WRB (2014).

Par ailleurs, à la deuxième année d'expérimentation (Juin 2019), sur l'aire d'expérimentation, un prélèvement d'échantillons du sol a été réalisé à la tarière. L'échantillonnage a concerné l'horizon 0 - 30 cm de profondeur. La méthode des diagonales a été adoptée. Cette méthode consiste à échantillonner le sol en des endroits préalablement définis au niveau des parcelles élémentaires. Dans notre cas, sur la ligne diagonale. Cette activité a, ainsi, permis de constituer un échantillon composite à partir de 5 échantillons élémentaires par parcelle élémentaire dont la superficie est estimée à 255 m². Pour une parcelle, ce sont 16 échantillons composites qui sont collectés à raison de 4 par traitement. En somme, pour les 6 parcelles, ce sont quatre-vingt seize (96) échantillons qui ont été collectés, puis séchés, broyés et envoyés au laboratoire pour des analyses.

2.3.5.1.3. Humidité volumique du sol

L'humidité volumique du sol a été déterminée à l'aide d'un humidimètre de sol portable fieldscout TDR 100 de marque Spectrum Technologies. Dans les placettes destinées à récolter la litière, la sonde de l'humidimètre est introduite dans le sol, puis la valeur de l'humidité est lue à l'écran (Figure 13 A). Le principe de cet appareil (TDR) consiste à mesurer le temps de transit d'une onde électromagnétique se propageant le long d'une antenne (guide d'onde). La vitesse de déplacement de cette onde dans le sol dépend de la permittivité diélectrique (ou constante diélectrique) brute de ce sol. La détermination de l'humidité volumique du sol se base sur le fait que l'eau possède une constante diélectrique bien plus élevée que celle de l'air ou de la fraction solide du sol pour déterminer l'humidité volumique d'un sol. L'humidité volumique mesurée par la technique TDR est une valeur moyenne sur la longueur des guides d'onde (pointes). L'électronique du TDR 100 génère et détecte le retour d'un signal haute énergie qui se propage en aller-retour dans le sol le long du guide d'onde (composé de deux pointes vissables en acier inoxydable). Le volume d'influence de la mesure est un cylindrique aplati (elliptique) qui s'étend sur environ 3 cm autour des pointes. L'information du signal haute fréquence permet de déduire la constante diélectrique brute du sol, qui est ensuite convertie en humidité volumique.

La mesure de l'humidité volumique du sol a été faite au 6^{ème}, 12^{ème}, 18^{ème} et 24^{ème} mois après la pose des pièges à litière, autrement dit, elle a commencé lors de la mise au contact du sol de

la litière de feuilles de cacaoyers, et s'est poursuivi tous les six mois lors de la collecte des données sur la décomposition des feuilles de cacaoyers.

2.3.5.1.4. Température du sol

La température du sol varie très peu en profondeur. Toutefois, étant donné la localisation superficielle de la majorité de la faune du sol, la température reste pour celle-ci un facteur limitant très important. Chaque espèce possède une température préférentielle pour son activité et les variations de température déterminent la distribution verticale de la faune.

Pour sa mesure, elle a été simultanément faite avec le relevé de l'humidité volumique du sol dans les quadras grillagés.

Le testeur Groline soil test (Hanna) a servi à sa détermination. Ce testeur Groline avec une résolution de 0,1 °C, est un instrument de poche spécialement conçu pour mesurer directement en plus de la conductivité, la température du sol avec une précision de 1,0 °C. Cet appareil ne s'utilise que dans les sols dont la température varie entre 0 et 50 °C. Dans le cas de notre étude, nous avons relevé uniquement les données de la température de l'horizon 0 - 30 cm du sol (Figure 13 B).

Le principe du testeur Groline soil test (Hanna) consiste à placer la sonde à la profondeur souhaitée et saturer le sol si nécessaire avec de l'eau désionisée (eau déminéralisée). La valeur de conductivité, automatiquement compensée en température, s'affiche sur l'écran. L'instrument affiche la conductivité dans l'unité sélectionnée. La température mesurée par la sonde est affichée sur la partie inférieure de l'afficheur. Toutefois, il faut étalonner l'instrument avant la prise de la mesure.

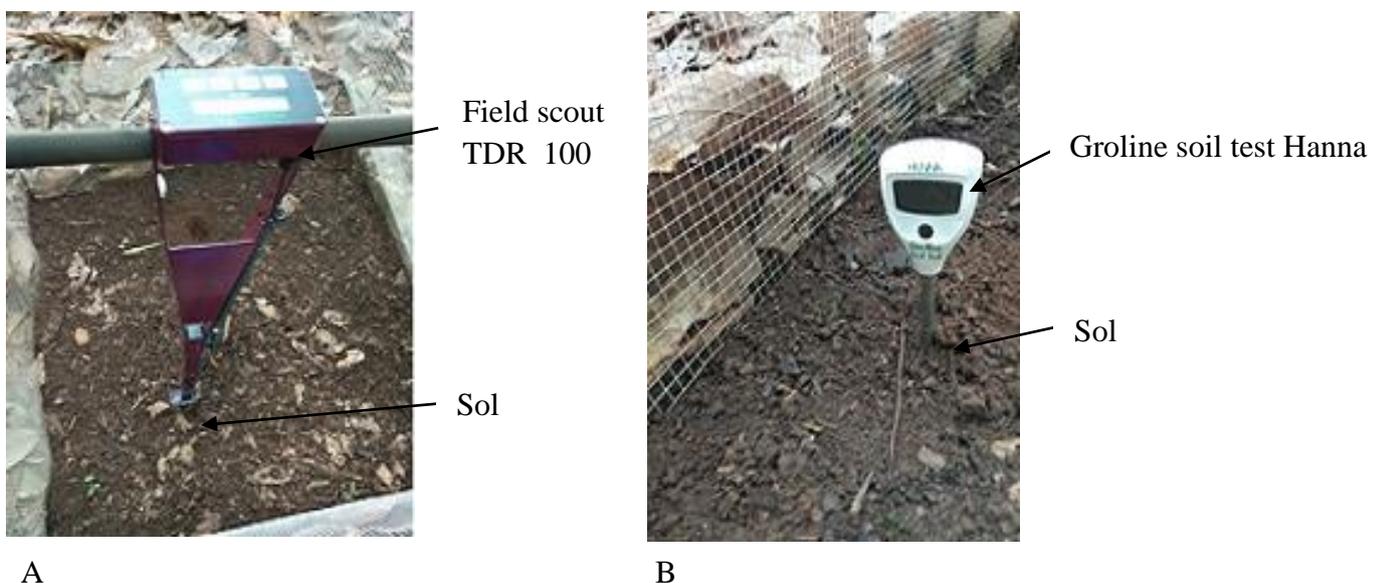


Figure 13 : Détermination de l'humidité (A) et de la température (B) du sol

2.3.5.1.5. Echantillonnage de la macrofaune du sol

La méthode TSBF « Tropical Soil Biology and Fertility » (Anderson & Ingram, 1993), basée sur la prise de monolithes du sol a été utilisée chaque année de l'expérimentation de mai à juin (2018, 2019 et 2020) pour la caractérisation de la faune du sol (Figure 14). Chaque année, quatre monolithes de sol sont prélevés par traitement, à raison d'un monolithe de dimension 25 cm x 25 cm x 30 cm par parcelle élémentaire, positionné à une distance de 80 cm du collet des cacaoyers fertilisés. Lorsqu'un monolithe de sol est prélevé, il est scindé en strates de 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Dans chaque strate, une récolte manuelle de la macrofaune est effectuée (Annexe 5 et 6). Les organismes extraits sont conservés dans de l'alcool à 70 °C. Les individus enregistrés sont ensuite classés par morphotypes ou groupe fonctionnel et leur abondance ainsi que leur diversité sont déterminées au mètre carré selon l'indice (H') de Shannon-Weaver (Grall & Hily, 2003). Cet indice est basé sur la formule de l'équation 1 :

$$H' = -\sum_{i=0}^n \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} \quad (\text{Equation 1})$$

Où :

- N_i = nombre d'individus d'une espèce donnée, i allant de 1 à S (S = nombre total d'espèces).
- N = nombre total d'individus.

Si l'indice H' est minimal ($H' = 0$), alors tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce ou alors dans un peuplement, chaque espèce est représentée par un seul individu. Si par contre l'indice H' est maximal ($H' = \log_2 n = 1$), alors tous les individus sont répartis d'une façon égale sur toutes les espèces (Issouf *et al.*, 2008, Pedel & Fabri, 2012).

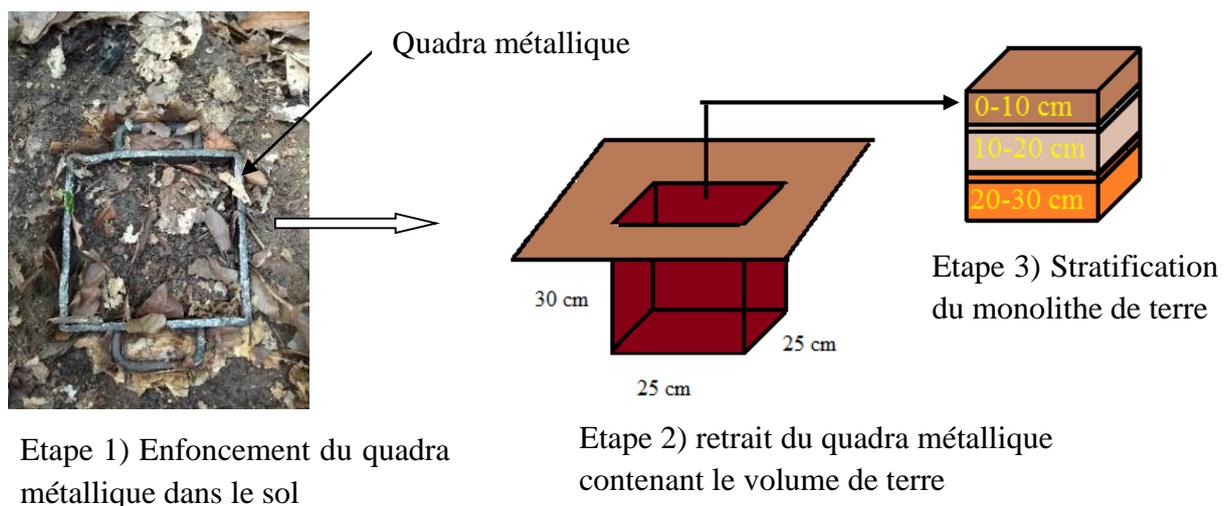


Figure 14 : Méthode d'échantillonnage de la macrofaune du sol

Les vers de terre ont été identifiés à l'aide de la clé d'identification de lombriciens OPVT (2015). S'agissant des termites, des fourmis et des autres organismes de la faune du sol, ils ont été identifiés à la loupe binoculaire équipée d'une caméra reliée à un ordinateur. Les spécimens ont été comparés aux spécimens de référence de la collection du Laboratoire de Zoologie des Invertébrés terrestres de l'Institut fondamental d'Afrique noire (IFAN) directement sous la loupe et/ou à l'ordinateur à partir des images prises avec une caméra. En plus, des spécimens de référence de cette collection, les travaux de Grassé (1944), de Bouillon & Mathot (1965), de Ndiaye (2014) et de Mbaou (2015) ont également été utilisés comme référence dans l'identification des espèces.

La détermination des variables que sont la densité de la macrofaune du sol, la richesse spécifique et l'indice de Shannon durant les trois années d'expérimentation a permis de déceler l'évolution de la macrofaune au cours du temps. Cette évolution a été appréciée à travers le bilan de ces variables entre les premières mesures (Juin 2018) et les dernières mesures (Juin 2020). Ce bilan a été calculé suivant l'équation 2 :

$$\Delta (\text{p. c.}) = \frac{V_f \times 100}{V_d} - 100 \quad (\text{Equation 2})$$

Δ (p.c.) = Bilan des variables à la fin de l'expérimentation

V_f = valeur de la variable à la dernière prise de données lors de l'expérimentation

V_d = valeur de la variable à la première prise de données lors de l'expérimentation.

2.3.5.1.6. Collecte de données sur la quantité et la vitesse de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers

L'étude des litières a été réalisée dans des quadras grillagés de dimension 1m x 1m x 0,5 dans lesquelles s'emboîte un cadre amovible garni de grillage fin à 0,25 m au-dessus du sol (Boyer, 1972). La méthode consiste à installer un quadra grillagé sous la canopée des cacaoyers par parcelle élémentaire (Figure 15). Ce qui revient à poser quatre quadras par traitement par parcelle. La chute des feuilles est déterminée par la prise du poids de feuilles de cacaoyers tombées semestriellement sur le cadre amovible installé dans la cage grillagée durant 5 semestres. Lors des relevés in situ, des échantillons de feuilles de cacaoyers sont collectés, triés et envoyés au laboratoire pour déterminer le poids sec.

L'étude de la décomposition des feuilles s'est déroulée dans les quadras grillagés qui ont servi à la collecte de feuilles de cacaoyers tombées. Les feuilles de cacaoyers récoltées dans un

quadra grillagé durant 6 mois sont pesées et déposées à même le sol sous le cadre amovible. Les relevés du taux de décomposition ont été fait à une fréquence de 6 mois dans les mêmes quadras, sur une période 24 mois (juin 2018 – juin 2020) à partir de la date de dépôt des litières au sol. Le relevé a consisté à peser à l'aide d'une balance, la litière restant au sol après un nettoyage des feuilles avec un pinceau pour éliminer les mottes de terre qui y sont accolées. Lors des relevés, un échantillon de feuilles de cacaoyer est collecté et envoyé au laboratoire pour déterminer la matière sèche.

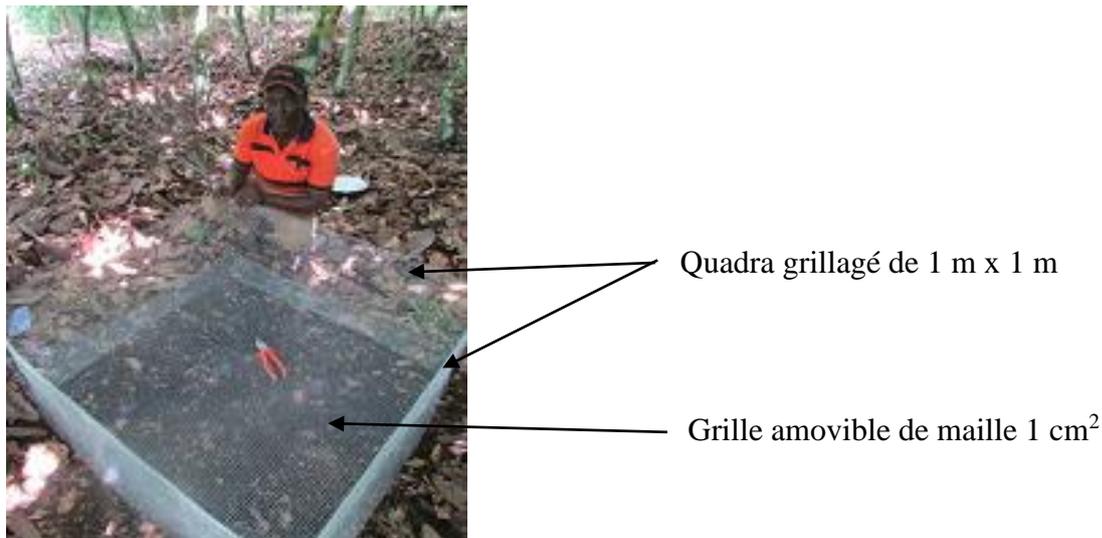


Figure 15 : Pose de cadre grillagé sur une placette de 1 m²

2.3.5.1.7. Echantillonnage pour la mesure du stock de carbone dans le sol

Dans le cadre de cette thèse, le processus de stockage de carbone dans les sols a été étudié et donc à la mesure de son stock dans le sol. Ainsi, la mesure des stocks de carbone dans le sol est faite par approche synchronique selon les travaux de Bernoux *et al.* (2006a), Bernoux *et al.* (2006b), Olson *et al.* (2014a) et Olson *et al.* (2014b). Cette approche consiste à comparer, à un instant donné, le stock de carbone d'une parcelle traitée depuis plusieurs années à celui d'une parcelle de référence (gestion conventionnelle) sans modifications majeures (érosion).

Sur le terrain, cette approche a consisté à prélever des échantillons de sol composites à différentes profondeurs (0 - 10 ; 10 - 20 ; 20 - 30 cm) dans chacune des parcelles élémentaires sous la canopée des cacaoyers pour la détermination du carbone organique en laboratoire. Dans une parcelle, seize échantillons composites sont réalisés, à raison de quatre par traitement, suivant la méthode des diagonales comme indiquée dans la section 2.2.5.1.2. L'échantillonnage du sol a été fait à la troisième année de l'essai, en juin 2020.

La détermination du stock de carbone du sol, nécessitant la connaissance de la densité apparente du sol, un échantillonnage des strates 0-10, 10-20 et 20-30 cm du sol a été fait à l'aide d'un cylindre de rayon 4,5 cm et de hauteur 10 cm et ouvert aux deux extrémités. Le cylindre de volume 636,172 cm³ est mécaniquement enfoncé dans le sol. Pour ce faire, un profil pédologique de longueur 60 cm, de largeur 50 cm et de profondeur 35 cm est ouvert au centre de chaque parcelle élémentaire, soit seize profils par parcelle. Dans chaque profil, un échantillon de sol des strates 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm a été prélevé. L'échantillon est transvasé dans un sac à joug, puis envoyé au laboratoire.

2.3.5.2. Phase de laboratoire

La phase de laboratoire a consisté à la détermination du poids sec des échantillons de feuilles de cacaoyers collectées et leur vitesse de décomposition et des propriétés physico-chimiques des échantillons de sol.

2.3.5.2.1. Détermination de la matière sèche des échantillons des litières de feuilles de cacaoyers et des vitesses de décomposition.

Les échantillons des litières de feuilles de cacaoyers collectés aux champs et envoyés au laboratoire sont séchés à l'étuve à 65 °C pendant 72 heures jusqu'à masse constante puis pesés. Cette seconde pesée constitue le poids sec des feuilles de cacaoyers tombées. Ensuite, un facteur d'humidité (k) est déterminé pour chaque échantillon. Ce facteur est déterminé par le rapport masse sèche sur masse fraîche. A l'aide de ce facteur, le poids sec des feuilles tombées par traitement est déterminé selon l'équation 3.

$$M_S(i) = (k_i) * M_F(i) \quad \text{Equation 3}$$

Où, $M_S(i)$ est le poids sec de l'échantillon i ;

k_i est le facteur d'humidité de l'échantillon i ;

$M_F(i)$ est le poids frais de l'échantillon.

La vitesse de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers exprimée en taux de décomposition est ensuite déterminée suivant la formule de l'équation 4 :

$$T_D(n) = \frac{1}{MS_0} (MS_0 - MS_n) * 100 \quad \text{(Equation 4)}$$

Avec :

- $T_D(n)$ = taux de décomposition à la date n ;

- MS_0 = masse sèche de litière initiale ;

- MS_n = masse sèche de litière à la date n.

2.3.5.2.2. Détermination des propriétés physiques

Les variables physiques déterminées sont la densité apparente et la granulométrie.

➤ Densité apparente

Les échantillons de sol prélevés à l'aide du cylindre ainsi acheminés au laboratoire sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Après séchage l'échantillon est pesé ; ce poids représente le poids sec. La densité apparente (g.cm^3) est obtenue selon la formule de Boa (1989), présentée ici par l'équation 5 :

$$da = \frac{M}{V} \quad (\text{Equation 5})$$

Avec:

- da : densité apparente en g cm^{-3} ;
- M : masse de terre séchée en gramme ;
- V : volume du cylindre en cm^3 .

➤ Granulométrie

La détermination de la granulométrie a été faite à l'aide de la pipette de Robinson-Köln décrite par Delaune *et al.* (1991). Les différentes fractions granulométriques ont concerné 3 classes : les argiles (0 à 2 μm), les limons (2 à 50 μm) et les sables (50 - 2000 μm).

2.3.5.2.3. Détermination des propriétés chimiques

Cette phase de laboratoire a consisté à la détermination de l'acidité du sol, du carbone organique du sol (COS), de la matière organique du sol (MOS), de l'azote total, du phosphore assimilable, du bore échangeable, du zinc échangeable, des bases échangeables, de la capacité d'échange des cations et à la mesure du stock de carbone dans les sols. Dans la pratique, l'acidité du sol est déterminée à travers le pH_{eau} du sol qui est mesuré par lecture directe à l'aide d'un pH-mètre à électrode en verre, selon un rapport sol/solution de 1/2,5. Le carbone organique du sol (COS) est lui déterminé selon la méthode Walkley & Black (1934), en oxydant le carbone organique par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), en présence d'acide sulfurique, suivie d'un dosage colorimétrique de Cr^{3+} . La teneur en matière organique du sol (MOS) est, quant à elle, déduite du carbone organique suivant l'équation 6 :

$$MOS = 1,724 C_{org} \quad (\text{Equation 6})$$

Avec : C_{org} = teneur en carbone organique du sol.

Pour ce qui est de l'azote total (N_{total}), la détermination a été effectuée par la méthode de minéralisation de Kjeldahl suivie d'un dosage de l'azote (NH_4^+) au réactif de Nessler. Le phosphore assimilable des sols a été extrait par une solution de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique selon la méthode Bray I. Pour le bore échangeable, l'extraction a été faite à l'eau chaude et le filtrat a été analysé par colorimétrie après la réaction du bore soluble avec une solution azométhine-H. Quant au zinc total, l'analyse a été faite par spectroscopie à absorption atomique (ICP-OES). Pour doser les bases échangeables, il a fallu les déplacer du complexe adsorbant par une solution d'argent ($AgNO_3$) et de thiouré (H_2NCSNH_2) ; leur dosage a été fait par spectrométrie en absorption atomique (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et en émission de flamme (Na^+ et K^+). La capacité d'échange cationique (CEC) a été mesurée à partir de la solution d'extraction des bases échangeables. De ces deux dernières caractéristiques chimiques du sol déterminées, la déduction de la saturation en bases échangeables du complexe adsorbant est faite à l'aide de l'équation 7 :

$$V = \frac{S}{CEC} \times 100 \quad (\text{Equation 7})$$

Où V : saturation exprimée en %, S : somme des bases échangeables et CEC : capacité d'échange cationique.

La mesure du stock de carbone organique dans le sol a été obtenue pour une unité de surface donnée (0 - 10 cm, 10 - 20 cm et 20 - 30 cm) en multipliant la teneur en C par la masse volumique apparente du sol et par la profondeur de l'horizon (couche) du sol échantillonné. Etant donné que le stockage du carbone organique du sol est un processus très lent, une augmentation significative à court terme n'est donc pas évidente sur la strate 0 - 30 cm. Alors pour se donner une chance d'apercevoir une variation significative entre les parcelles traitées et la parcelle de référence (sans engrais) à court terme, le stock de carbone organique a été déterminé sur les strates 0 - 10 cm, 10 - 30 cm et 0 - 30 cm (Shi *et al.*, 2013). Pour se faire, les stocks de carbone organique des horizons 10 - 20 et 20 - 30 cm sont sommés pour avoir le stock du sol sur 10 - 30 cm. La même opération est faite des strates 0 - 10 cm, 10 - 20 cm et 20 - 30 cm pour avoir le stock du sol sur 0 - 30 cm. Dans un sol contenant les éléments grossiers (particules entrant dans la composition texturale du sol et dont la taille est supérieure à 2 mm de diamètre) la teneur en éléments grossiers dans l'estimation du stock de carbone du sol est prise en compte (Bernoux *et al.*, 2005 ; Marco *et al.*, 2010). Les résultats ont été exprimés en $gC.m^{-2}$. Le carbone a été calculé selon l'équation 7 (De Rouw *et al.*, 2010) :

$$C \text{ stock} = SOC \times p \times d (1 - gr) / 10 \quad (\text{Equation 7})$$

Où C stock : stock de carbone organique du sol en g m⁻² ; SOC : concentration de carbone en g/g de sol ; p : densité apparente en g.cm⁻³ ; d : épaisseur de la couche de sol en cm et gr : fraction de sol > 2 mm.

2.3.6. Analyse statistique des données

Les données collectées ont été codées, puis saisies et apurées sur EXCEL. Toutes les données analysées ont préalablement été soumises au test de Shapiro-Wilk (W) afin de vérifier si elles suivent une loi normale ou non. Pour conclure ce test, la valeur de la probabilité p (p-value) est comparée au risque d'erreur $\alpha = 5 \%$ choisi. Ainsi, si p est supérieure au risque α , alors l'hypothèse nulle de normalité (H0) est favorisée sinon, le cas échéant, l'hypothèse alternative H1 est favorisée et la distribution observée n'est pas normalement distribuée. Pour vérifier l'homogénéité des variances entre les groupes, les données ont par la suite été soumises au test de Levene (Abdesselam, 2021). Celles qui suivent la loi normale et qui présentaient une égalité de variances, ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur selon la procédure GLM (modèle linéaire généralisé) sous l'environnement SAS 9.4. Pour conclure, la probabilité p est comparée au risque d'erreur α . Si la valeur p est supérieure à α , alors l'hypothèse nulle H0 est favorisée sinon l'hypothèse alternative H1 est favorisée. Les ANOVA qui se révélaient significatives au seuil de $P < 5 \%$ ont été séparées par la méthode de Student-Newman-Keul (SNK). Des lettres a, b et c, ont été attribuées dans la présentation des résultats pour marquer les différences entre les traitements. Le test d'ANOVA a concerné les données relatives à la quantité de litière de feuilles de cacaoyers, au stock de carbone et aux paramètres physico-chimiques du sol. L'application du test d'ANOVA sur les paramètres physico-chimiques a été précédée d'une transformation des données brutes par la fonction $(x + 0,5)^{1/2}$ (Abdesselam, 2021). Les données qui n'obéissaient pas à l'homogénéité des variances étaient soumises au test de Kruskal-wallis pour vérifier l'égalité des médianes des groupes selon la procédure NPAR1WAY dans le logiciel SAS 9.4. La règle de décision de ce test est telle que si la probabilité p est supérieure au risque d'erreur α ($\alpha = 5 \%$), alors l'hypothèse nulle d'égalité des médianes (H0) est acceptée sinon l'hypothèse alternative (H1) est favorisée. Toutes les fois que l'hypothèse alternative est acceptée, un test post hoc de Dunn est fait dans le but de classer les différents groupes (Dmitrienko *et al.*, 2007).

Par ailleurs, des méthodes d'analyses multivariées ont été utilisées pour confirmer les patrons de classification des fumures minérales en accord avec l'ensemble des caractéristiques évaluées.

Ainsi, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de résumer et de visualiser des données quantitatives. L'ACP a été utilisée à titre exploratoire en tant que technique d'analyse multidimensionnelle descriptive, qui vise à résumer l'information contenue dans un ensemble de variables selon un certain nombre d'axes factoriels correspondant à des combinaisons linéaires des variables initiales. L'objectif étant de maximiser le pourcentage de variance de l'information initiale prise en compte par les axes factoriels. Cette analyse a permis d'établir le lien entre les groupes d'organismes et les traitements auxquels ils sont inféodés (Lebreton *et al.*, 1988). L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a été réalisée pour détecter les regroupements des espèces recensées avec les traitements. L'ACP et l'AFC ont été complétées par l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) sous l'environnement XLSTAT version 2016. L'AFD a permis de faire un regroupement qualitatif des traitements.

Outre ces analyses, le degré d'association entre les différentes variables, a été évaluée à travers le calcul du coefficient de corrélation de Charles Spearman au seuil de signification de 5 %, à partir de la matrice de données sous l'environnement XLSTAT version 2016. Ce coefficient permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux variables. Il est nul ($r = 0$) lorsqu'il n'y a pas de liaison entre les variables. Par contre, le coefficient est de signe positif si la corrélation est positive (directe, croissante) et de signe négatif si la corrélation est négative (inverse, décroissante).

Conclusion partielle

Les méthodes utilisées sur le terrain sont celles habituellement adoptées pour les études d'impacts dans des études agronomiques. Il s'agit de la méthode classique de prospection pédologique établie par l'ORSTOM, la méthode dite Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF) pour l'étude de la faune du sol, la méthode de piège à litière pour quantifier la décomposition de la matière organique et des méthodes de laboratoire pour le dosage des éléments chimiques. Aussi des calculs ont-ils été faits à l'aide d'équations pour obtenir certaines informations qui ne sont pas directement mesurables sur le terrain et au laboratoire. Les données obtenues ont fait l'objet d'analyses statistiques. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans la partie qui suit.

TROISIÈME PARTIE :
RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. RÉSULTATS

3.1.1. Caractéristiques climatique et pédoclimatique des sites d'étude

3.1.1.1. Pluviométrie

La pluviométrie des régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua illustrée par la figure 16 révèle que de Janvier 2018 à Décembre 2020, des pluies d'intensités diverses sont moyennement tombées dans les deux zones agro-écologiques. Dans la zone agroécologique du Sud-Ouest (région de la Nawa), en douze mois (Janvier à Décembre), 1102,3, 1065,8 et 1083,4 mm de pluie sont tombées respectivement en 2018, 2019 et 2020. Dans la zone agroécologique du Centre-Sud (région du loh-djiboua), est tombé également dans la même période et dans le même ordre, 1067 mm, 1099,2 mm et 1274,3 mm de pluie. Globalement, les pluies sont maximales en avril, mai et juin durant les trois années d'expérimentation dans les deux zones agro-écologiques. Le cumul des pluies tombées durant ces trois mois (avril, mai, juin) est passé dans le Lôh-djiboua de 469 mm en 2018 à 392,9 mm en 2019, puis à 478,7 mm en 2020 et dans la Nawa de 497,4 à 463,8, puis 275,2 mm aux mêmes dates.

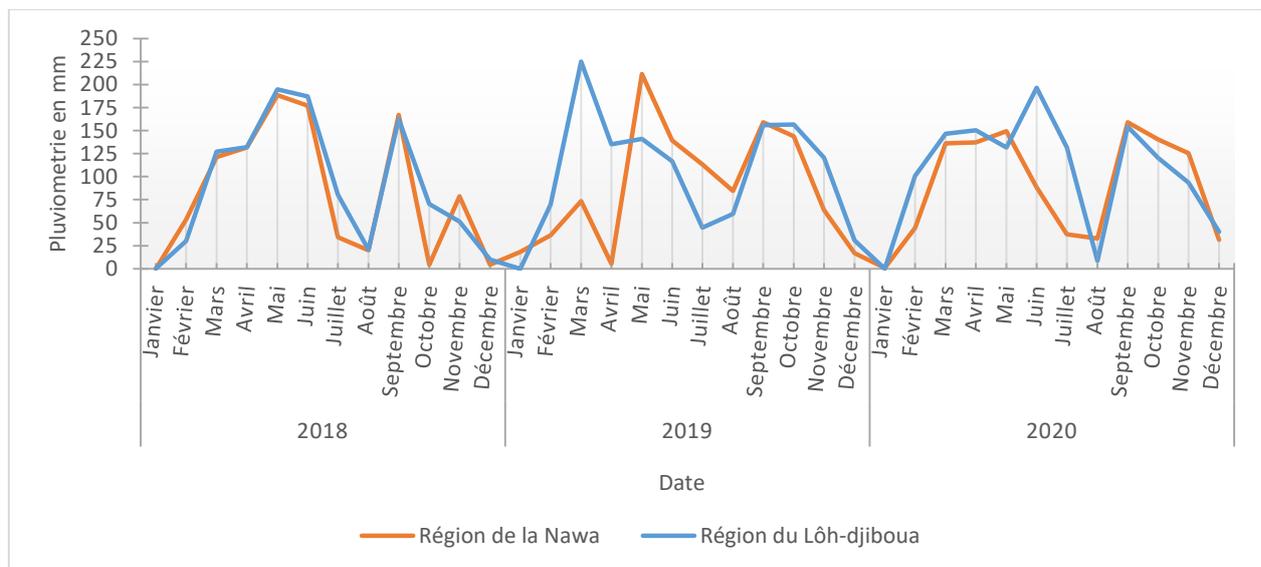


Figure 16 : Variabilité pluviométrique des régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua au cours des années 2018, 2019 et 2020

3.1.1.2. Humidité et température des sols dans la Nawa

La figure 17 fait apparaître les humidités et les températures des sols qui ont régnés sur les différents sites dans la Nawa.

A Soubré, au 6^{ème} mois, avec 21,76 %, T3 a été le plus humide, tandis que la plus faible humidité, estimée à 14,75 %, est observée dans T0. A cette même période, la température du

Résultats et Discussion

sol variait de 25,63 °C (la plus faible) dans T1 à 26 °C (la plus élevée) dans T0. Également, T3 était plus humide au 12^{ème}, 18^{ème} et 24^{ème} mois, respectivement, avec 25,83 ; 20,76 et 34,40 %. Quant à la température, suivant cet ordre périodique, elle a varié de 24,76 °C dans T3 à 24,9 °C dans T0 et T1, de 25,5 °C dans T3 à 26 °C dans T0 et de 24,6 °C dans T0 à 24,84 °C dans T2 et T3 (Figure 17 A).

A Méagui, les plus fortes valeurs d'humidité volumique du sol, au 6^{ème}, 12^{ème}, 18^{ème} et 24^{ème} mois sont observées dans T3. Les valeurs sont, dans cet ordre, égales à 29,2 ; 21,23 ; 29,2 et 33,66 %. Par ailleurs, les plus faibles valeurs d'humidités du sol sont enregistrées dans T0, respectivement, avec 20,8 ; 9,1 ; 20,8 et 25,45 %. Sur ce site, la température du sol a faiblement varié entre les traitements. En effet, elle est comprise entre 24,45 °C dans T0 et T1 et 24,73 °C dans T2 au 6^{ème} et 18^{ème} mois, entre 24,55 °C dans T1 et 24,7 °C dans T0 au 12^{ème} mois et entre 24,33 °C dans T3 et 24,43 °C dans T2 au 24^{ème} mois (Figure 17 B).

Dans la localité de Mayo, au 6^{ème} mois, la valeur la plus élevée de l'humidité du sol est relevée dans T2 (21,86 %), alors que la valeur la plus faible, estimée à 15,83 %, est obtenue dans T3. Au 12^{ème} et au 24^{ème} mois, respectivement, avec 26,06 et 34,43 %, T1 était plus humide que les autres traitements. Au 18^{ème} mois, T0 avec 26,1 % a été plus humide quand T3 avec 15,83 % a été le moins humide. Concernant la température, les variations étaient faibles entre les traitements aux 6^{ème}, 12^{ème} et 24^{ème} mois. En effet, la température du sol oscillait entre 24,2 et 24,56 °C. Cependant, au 18^{ème} mois, les températures enregistrées dans T3 (24,9 °C), T1 (24,6 °C) et T2 (24,56 °C) étaient largement supérieures à celle mesurée dans T0 (21,2 °C) (Figure 17 C)

3.1.1.3. Humidité et température des sols dans le Lôh-Djiboua

L'humidité et les températures des sols dans le Lôh-Djiboua sont consignées sur la figure 18.

A Divo, les teneurs de l'humidité volumique du sol les plus élevées sont enregistrées dans les sols de T3 suivi par celles de T2 aux 6^{ème}, 12^{ème}, 18^{ème} et 24^{ème} mois. Pour T3, ces teneurs ont été estimées, dans l'ordre périodique ci-dessus, à 26,6 ; 31,1 ; 27,56 et 32,3 %. En ce qui concerne la température, aux 6^{ème} et 18^{ème} mois, les valeurs les plus élevées, estimées à 25,66 et 26,23 °C, sont relevée dans T1. Par contre, la température du sol la plus élevée est notée au 12^{ème} dans T0 (26,05°C) et au 24^{ème} mois dans T2 (26,23 °C) (Figure 18 A).

Dans la localité de Lakota, les valeurs d'humidité des sols les plus élevées sont obtenues dans T1. Ces valeurs sont : 30,03 % au 12^{ème} mois, 31,13 % au 12^{ème} mois et 28,5 % au 18^{ème} mois. Dans cette localité, les faibles valeurs de l'humidité ont été observées dans T3. Concernant la

Résultats et Discussion

température du sol, les valeurs étaient approximativement égales entre les traitements, exceptés au 24^{ème} mois, où la température dans T0 (24,75 °C) a été plus faible par rapport aux autres traitements (Figure 18 B).

A Guitry, T1 a révélé les valeurs d'humidités les plus élevées (30,43 % au 6^{ème} mois, 31,66 % au 12^{ème} mois, 30,26 % au 18^{ème} mois et 33,73 % au 24^{ème} mois), alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées dans T3 (22,56 % au 6^{ème} mois, 22,6 % au 12^{ème} mois, 22,4 % au 18^{ème} mois et 24,06 % au 24^{ème} mois). S'agissant de la température, les traitements ayant reçu les fertilisants minéraux ont affiché pratiquement les mêmes températures, qui ont été supérieures à celles notées dans T0. Cet écart était plus grand au 12^{ème} mois. Globalement, les valeurs de température variaient de 24,84 à 26,50 °C (Figure 18 C).

Résultats et Discussion

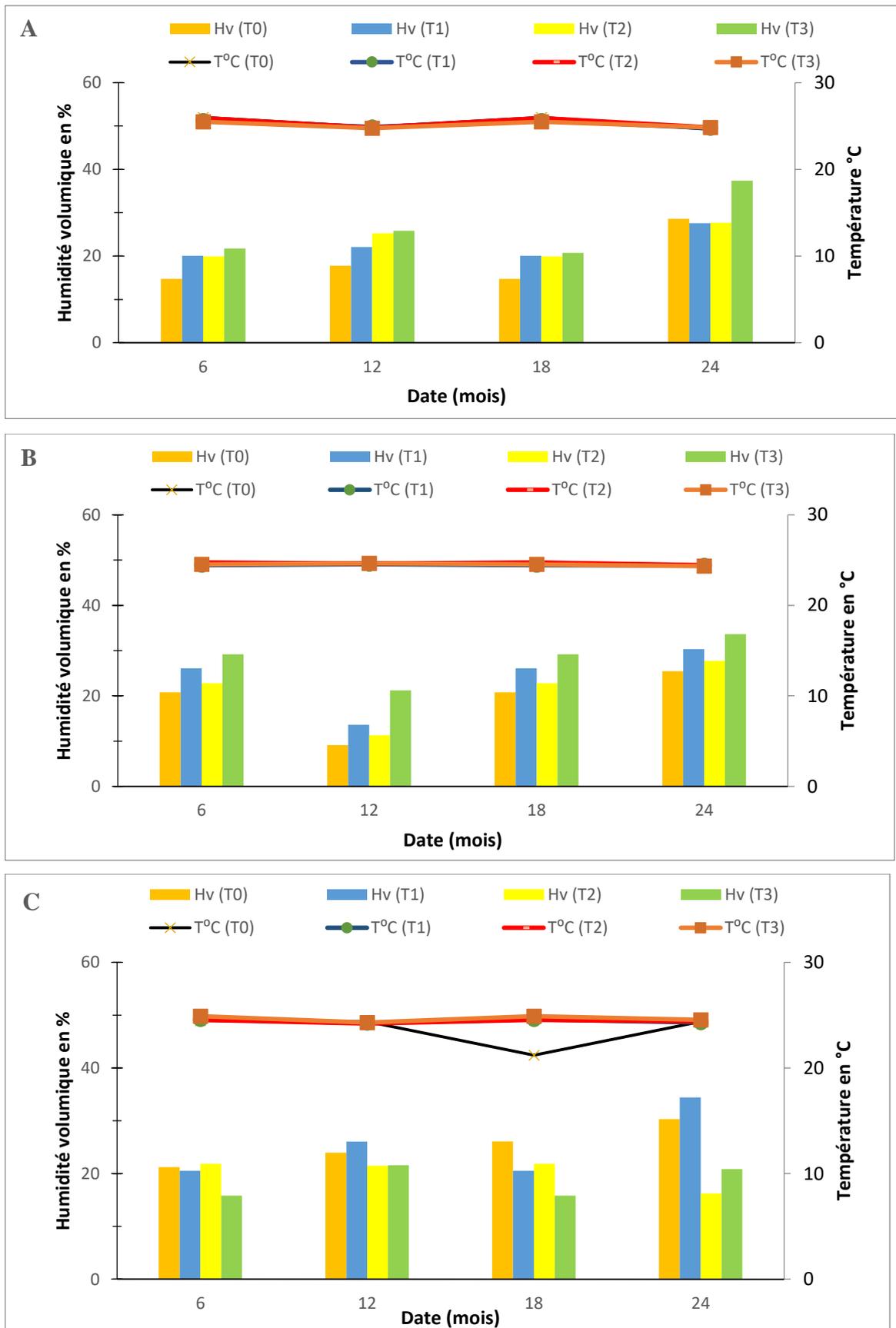


Figure 17 : Humidité et température des sols de la région de la Nawa : Soubré (A) ; Méagui (B) et Mayo (C)

Résultats et Discussion

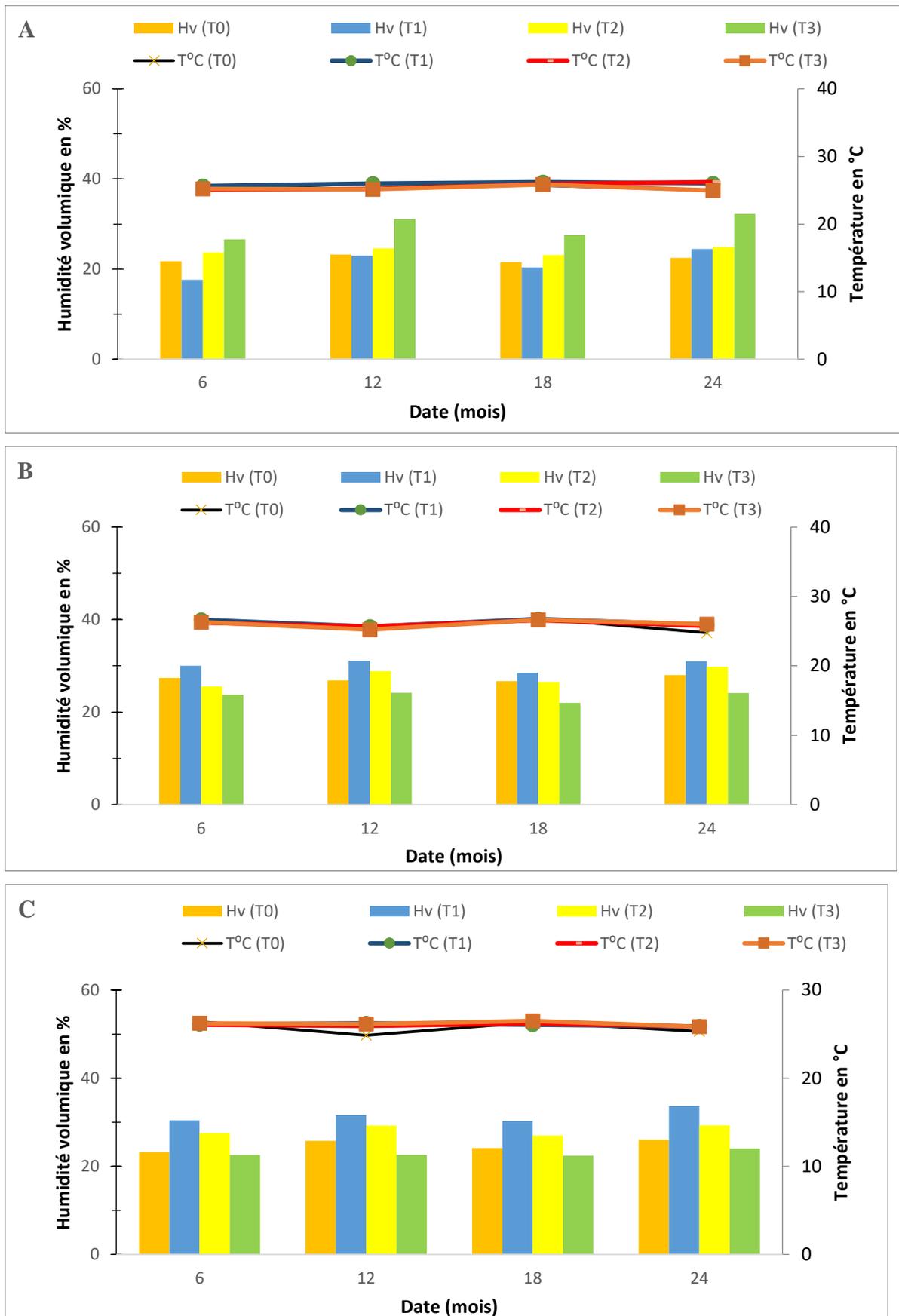


Figure 18 : Humidité et température des sols de la région du Lôh-Djiboua : Divo (A) ; Lakota (B) et Guitry (C)

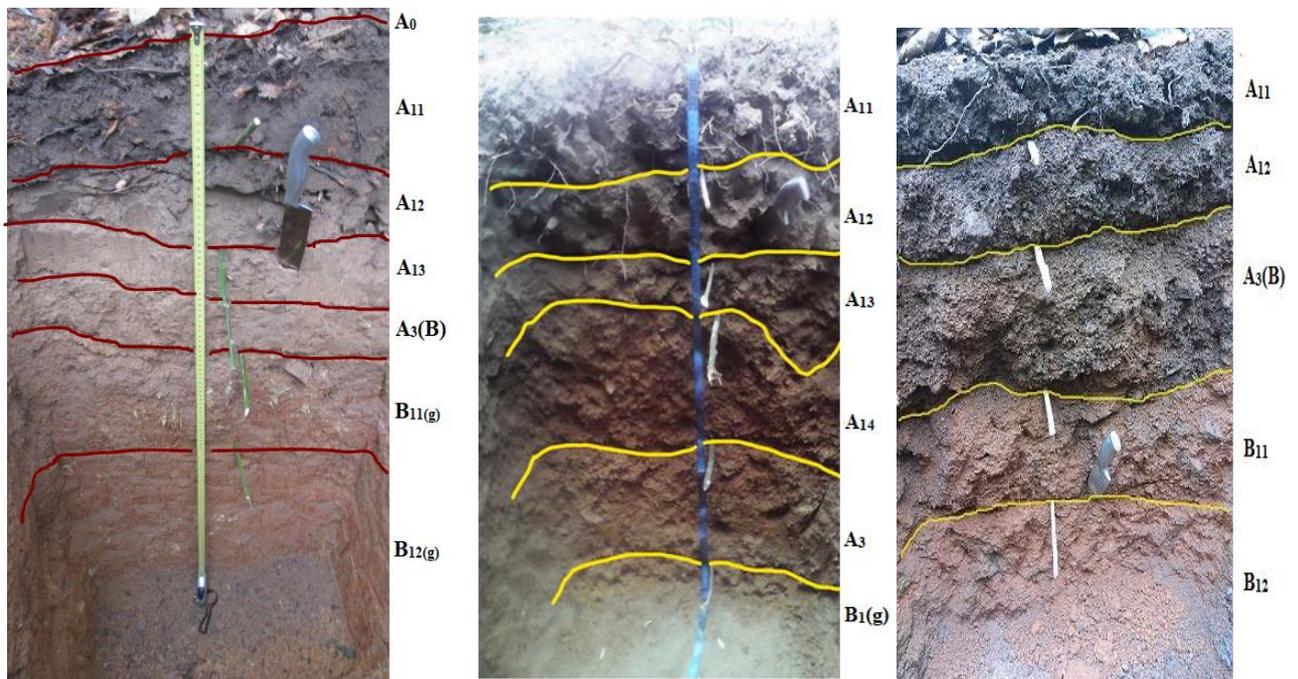
3.1.2. Caractéristiques morphologiques des sols des sites d'étude

3.1.2.1. Caractéristiques morphologiques des sols de la Nawa

Les fosses (Figure 19) implantées sur les sites expérimentales dans la Nawa sont toutes profondes de 120 cm au moins et sont constituées de divers horizons. Les horizons de surface sont humifères et couvrent de faibles épaisseurs. La structure des horizons de surface est grumeleuse. Ces horizons sont meubles et poreux et sont envahis par de nombreuses racines de tailles millimétriques à centimétriques avec orientation sub-horizontale. Dans ces horizons de surface, le sol draine bien l'eau.

Dans les horizons de profondeur, des taches d'hydromorphie ancienne s'observent dans les profils de Soubré et Méagui.

Les sols décrits dans la Nawa (annexe 10) sont tous des Ferralsols.



(A) *Manganiferric pseudo gleyic plinthic ferralsol sous cacaoyers*

(B) *Manganiferric plinthic pseudo-gleyic arenic ferralsol sous cacaoyers*

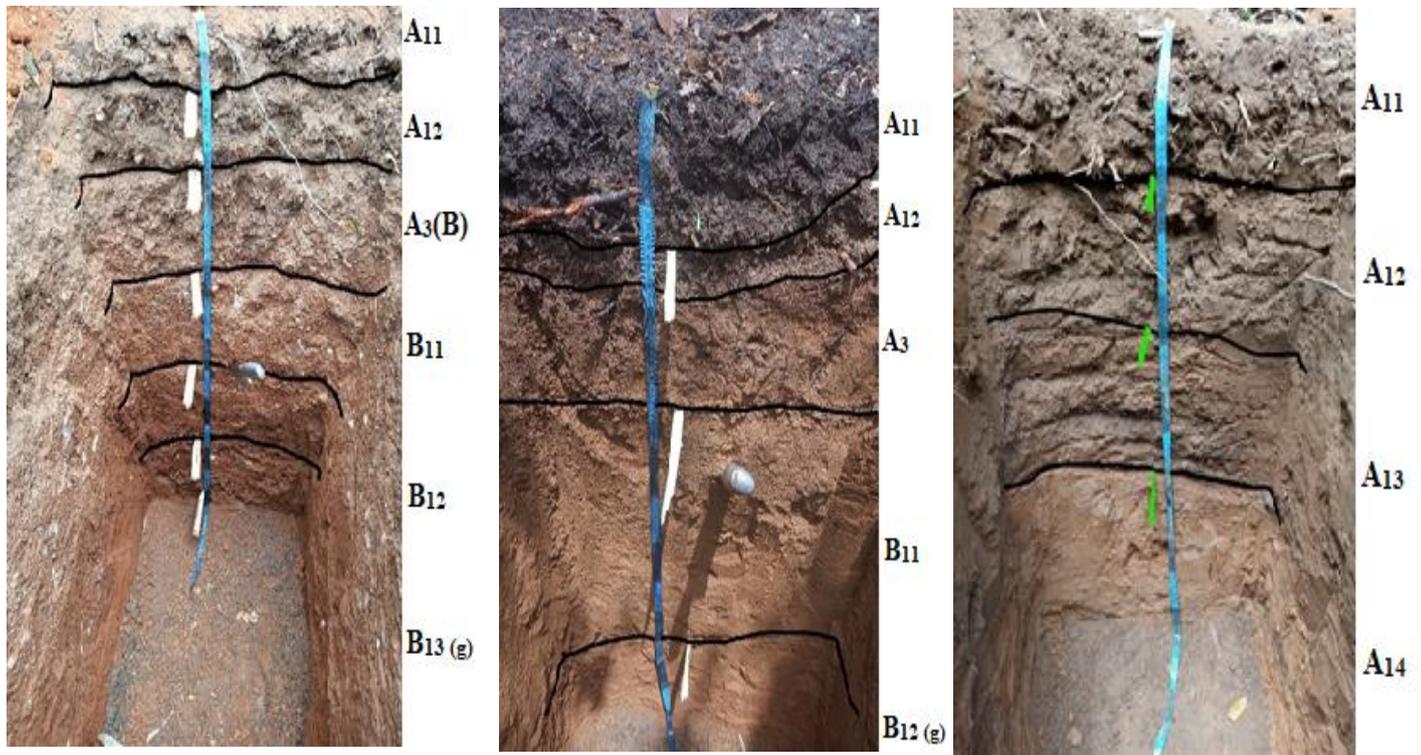
(C) *Manganiferric plinthic ferralsol sous cacaoyers*

Figure 19 : Profils pédologiques des sols de la Nawa : Soubré (A), Méagui (B) et Mayo (C)

3.1.2.2. Caractéristiques morphologiques des sols du Lôh-Djiboua

Les profils pédologiques illustrés par la figure 20 ont été ouverts sur les différents d'étude dans le Lôh-Djiboua. Egalement, dans cette zone les sols sont profonds ; 120 m de profondeur avec des horizons bien différenciés. Les horizons de surfaces sont humifères. La structure des

horizons de surface est grumeleuse. Ces horizons sont meubles et poreux et sont envahis par de nombreuses racines de tailles millimétriques à centimétriques avec orientation sub-horizontale. Les horizons de profondeur des profils de Divo et Lakota drainent mal l'eau. Dans cette région, la description des différents profils pédologiques (annexe 11) a permis d'identifier des Ferralsols à Divo et Lakota et un Arénosol à Guitry.



(A) *Manganiferric pseudo-gleyic plinthic ferralsol sous cacaoyers*

(B) *Pseudo-gleyic Ferralsol sous cacaoyers*

(C) *Albic Arenosol sous cacaoyers*

Figure 20 : Profils pédologiques du Lôh-Djiboua : Divo (A), Lakota (B) et Guitry (C)

3.1.3. Caractéristiques physiques et chimiques des sols des sites d'étude

3.1.3.1. Caractéristiques physiques des sols de la Nawa

Les résultats des caractéristiques physiques des sols de la Nawa sont montrés en annexe 12.

A Soubré, des différences significatives entre les traitements ont été observées au regard des taux d'argile ($p < 0001$), de limon ($p = 0,0005$) et de sable ($p < 0001$). Le sol non fertilisé T0 s'est révélé être moins riche en argile et plus riche en sable, tandis que celui du traitement T1 s'est montré plus enrichi en limon.

Par contre, s'agissant de la densité apparente, aucune variation significative entre les traitements n'a été observée pour les différentes strates.

Résultats et Discussion

A Méagui, les teneurs en argile et en sable ont été significativement différentes entre les traitements. Pour l'argile, T2 et T3 ont été significativement supérieurs à T0 et T1 au seuil de $p = 0,0005$. En ce qui concerne le sable, T0, T1 et T2 ont eu des teneurs qui sont significativement plus élevées que celle de T3 au seuil de $p = 0,0030$. En revanche, la teneur en limon n'a pas varié significativement d'un traitement à un autre.

Concernant la densité apparente, une différence significative s'est révélée entre les traitements au niveau de la strate 1 (0 - 10 cm) au seuil de $p = 0,0002$. La densité apparente déterminée dans le traitement T1 est la plus élevée, quand celle relevée dans T2 est la plus faible.

A Mayo, le taux d'argile déterminé dans T0 est apparu significativement plus élevé au seuil de $p = 0,0001$. Quant à la teneur en limon, elle s'est révélée statistiquement supérieure dans le traitement T2 ($18,2 \pm 0,6 \%$). Pour les teneurs en sable, les valeurs les plus élevées, mesurées dans les traitements T3 ($63,4 \pm 0,5 \%$) et T1 ($63,2 \pm 0,3 \%$) sont significativement différentes ($p < 0001$) de celles des deux autres traitements.

En revanche, pour la densité apparente, aucune différence significative n'est observée entre les traitements au niveau des différentes strates.

3.1.3.2. Caractéristiques physiques des sols du Lôh-Djiboua

Les résultats des caractéristiques physiques des sols du Lôh-Djiboua sont montrés en annexe 13.

A Divo, des différences significatives entre les traitements ont été détectées au niveau des taux d'argile ($p < 0001$), de limon ($p = 0,0005$) et de sable ($p < 0001$) à Divo. Les teneurs en limon, argile et sable mesurées, respectivement, dans T1 et T2, dans T3 et dans T0 sont significativement plus élevées au seuil de $p < 5 \%$.

Au niveau de la densité apparente, celle déterminée dans le T1 dans la strate 3 (20 - 30 cm) est ressortie significativement plus élevée ($p = 0,0324$). Pour les deux autres strates, elle n'a pas varié significativement d'un traitement à l'autre.

A Lakota, les fractions granulométriques sont demeurées semblables entre les traitements. Quant à la densité apparente elle, n'a pas varié significativement d'un traitement à un autre quel que soit la strate.

A Guitry, au niveau des fractions granulométriques, seul, la teneur en argile a varié significativement entre les traitements ($p = 0,003$) à Guitry. La teneur la plus élevée a été déterminée dans T1 ($10,9 \pm 0,6 \%$).

S'agissant de la densité apparente, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements pour toutes les strates.

3.1.3.3. Caractéristiques chimiques des sols de la Nawa

Les résultats des caractéristiques chimiques des sols de la Nawa sont montrés en annexe 14.

➤ Site de Soubré

A Soubré, les valeurs du pH_{eau} et du taux de saturation en bases (V), enregistrées dans T1 sont statistiquement supérieures à celles mesurées dans les autres traitements ($p < 0,0001$). Quant à la matière organique du sol (MOS), le carbone organique du sol (COS), l'azote total du sol (N), les teneurs les plus élevées, obtenues dans T1 sont significativement différentes de T0 ($p = 0,001$). Par contre, pour le ratio C/N, les traitements n'ont pas différencié significativement entre eux. En ce qui concerne l'azote total, T1 et T2 ont été significativement différents de T0 ($p = 0,001$). S'agissant des macro-éléments (P_2O_5 , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}), les teneurs les plus élevées ont toutes été observées dans T1 avec $p < 0,0001$. Pour les micro-éléments, seule la teneur en bore (B) déterminée dans T1 (0,5 ppm) a été significativement plus élevée ($p = 0,0213$). Pour les équilibres chimiques ($\text{K}^+ \times 100/\text{S}$, $\text{Ca}^{2+} \times 100/\text{S}$, $\text{Mg}^{2+} \times 100/\text{S}$ et $(\text{S}+6,15)/\text{N}$), des variations significatives ($p < 5\%$) ont été observées entre les traitements. Dans le cas de $\text{K}^+ \times 100/\text{S}$ et $\text{Ca}^{2+} \times 100/\text{S}$, les ratios les plus élevés sont ressortis dans T1, alors que ceux de $\text{Mg}^{2+} \times 100/\text{S}$ se sont révélés dans T2 et T3 et ceux de $(\text{S}+6,15)/\text{N}$ dans T1 et T3.

➤ Site de Méagui

Sur le site de Méagui, les plus fortes valeurs du pH_{eau} et de V sont déterminées dans T3 et T2 avec, respectivement, $p = 0,0016$ et $p < 0,0001$. En ce qui concerne MOS et COS, les teneurs déterminées dans T2 ont été significativement plus élevées ($p = 0,0058$ et $p = 0,0056$) que celles des autres traitements. S'agissant de N, les teneurs les plus élevées, déterminées dans T2 et T3 sont significativement les plus élevées ($p < 0,0001$). Les macro-éléments, quant à eux, ont varié significativement ($p < 5\%$) entre les traitements. La teneur la plus élevée en P_2O_5 a été relevée dans T1, celle en K^+ dans T2, celles en Ca^{2+} et en Mg^{2+} dans T2 et T3. Pour les micro-éléments, une variation significative ($p = 0,0016$) a été relevée entre T2 et T3 et les deux autres, au regard de la teneur en Zinc total (Zn) seulement. Pour les équilibres chimiques, à l'exception du ratio $\text{K}^+ \times 100/\text{S}$, des variations significatives ($p < 5\%$) ont été relevées entre les traitements T2 et T3 et les traitements T0 et T1 pour $\text{Ca}^{2+} \times 100/\text{S}$, entre T1 et les autres traitements pour $\text{Mg}^{2+} \times 100/\text{S}$ et entre T3 et T1 pour $(\text{S}+6,15)/\text{N}$.

➤ Site de Mayo

Les valeurs du pH_{eau} des traitements T1, T2 et T3 ont été significativement supérieures à celle de T0 ($p < 0,0001$) à Mayo. Les traitements fertilisés avaient les plus fortes valeurs. Pour V, le taux le plus élevé, mesuré dans T3 a différencié significativement des autres traitements au seuil de

$p < 0,0001$. Pour MOS, COS et N, les teneurs les plus élevées statistiquement ont été enregistrées dans T2 et T3 avec, respectivement, $p = 0,0026$; $p = 0,0027$ et $p = 0,0007$. Quant aux macro-éléments, les teneurs en P_2O_5 , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été significativement supérieures dans, respectivement, T1 et T3 ; T1 ; T2 et T3. Pour les micro-éléments, des différences significatives ont été observées entre les traitements pour la teneur en Zn seulement. T3 a eu la valeur la plus élevée. Concernant les équilibres chimiques, la valeur la plus élevée pour le ratio $K^+ \times 100/S$ déterminée dans T1 est significativement supérieure ($p < 0,0001$), celles des ratios $Mg^{2+} \times 100/S$ et $(S+6,15) / N$ relevées dans T3 et T1 le sont aussi avec, respectivement, $p = 0,0388$ et $p = 0,0130$.

3.1.3.4. Caractéristiques chimiques des sols du Lôh-Djiboua

Les résultats des caractéristiques chimiques des sols du Lôh-Djiboua sont montrés en annexe 15.

➤ Site de Divo

A Divo, des différences significatives entre les traitements ont été observées pour le pH_{eau} et V au seuil de $p < 0,0001$. Les valeurs les plus élevées ont été déterminées dans T3. Quant à MOS et COS, les teneurs déterminées dans T3 sont significativement élevées comparativement à celles de T0 avec, respectivement, $p = 0,0376$ et $p = 0,0382$. Concernant N, la teneur la plus élevée, relevée dans T3 s'est révélée significativement différente de celles de T0 et T1 avec $p = 0,0069$. Pour les macro-éléments P_2O_5 , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} , T3 a varié significativement des autres traitements ($p < 5\%$). T3 est, toutefois, ressorti avec les plus fortes teneurs. S'agissant des micro-éléments, les teneurs les plus fortes ont également été relevées dans T3. Pour les équilibres chimiques ($K^+ \times 100/S$, $Ca^{2+} \times 100/S$, $Mg^{2+} \times 100/S$ et $(S+6,15) / N$), les ratios n'ont pas varié significativement entre les traitements.

➤ Site de Lakota

La valeur la plus élevée du pH_{eau} , relevée dans T3 a varié significativement de T0 et T1 ($p < 0,0001$) à Lakota (Annexe). V, MOS et COS ont été significativement les plus élevées dans T1, T2 et T3. Pour ce qui est de N, T2 et T3 ont été significativement différents des autres traitements ($p = 0,0020$). Les teneurs les plus élevées ont été décelées dans T2 et T3. Concernant, les macro-éléments, les meilleurs traitements ont été T1 et T2 pour P_2O_5 , T3 pour K^+ et pour Mg^{2+} et T2 pour Ca^{2+} . Pour les micro-éléments, les probabilités calculées (p) sont inférieures au seuil $\alpha = 5\%$. Pour B, T2 a été le meilleur, alors que pour Zn T1, T2 et T3 l'ont été. Au niveau des équilibres chimiques, T2 et T3 ont été significativement plus élevés, respectivement, pour $K^+ \times 100/S$ ($p = 0,0172$) et $Ca^{2+} \times 100/S$ ($p = 0,0265$).

➤ Site de Guitry

Les valeurs les plus élevées du pH_{eau} , de V, de MOS et de COS, déterminées dans T2 ont été significativement différentes des autres traitements sur le site de Guitry. Pour N et le ratio C/N, aucune variation significative entre les traitements n'a été enregistrée ($p = 0,1853$, $p = 0,2848$). Quant aux macro-éléments, à l'exception de K^+ , les teneurs les plus élevées en P_2O_5 , en Ca^{2+} et en Mg^{2+} , relevées dans T1, T2 et T3 ont été significativement supérieures de T0 avec, respectivement, $p = 0,1853$; $p = 0,1853$ et $p = 0,1853$. Par contre, au niveau des micro-éléments, aucune variation significative n'a eu lieu entre les traitements. Pour les équilibres chimiques, seulement les ratios $Ca^{2+} \times 100/S$ et $Mg^{2+} \times 100/S$ ont varié significativement entre les traitements. La plus forte valeur est obtenue dans T2 pour le premier ratio et dans T0, T1 et T3 dans le second.

3.1.4. Production de litière de feuilles de cacaoyers

3.1.4.1. Cas des cacaoyères de la région de la Nawa

La figure 21 montrant les quantités des litières de feuilles de cacaoyers produites dans la Nawa, indique qu'à Soubré, au 6^{ème} mois les litières récoltées dans les traitements fertilisés T1, T2 et T3 sont significativement plus élevées ($p = 0,0141$) que celle obtenue dans le traitement non fertilisé T0. Aux autres dates, les quantités des litières produites sont demeurées semblables entre les traitements. A Mayo, des variations significatives entre les traitements sont observées au 6^{ème} mois ($p = 0,0171$), 12^{ème} mois ($p = 0,0387$), 18^{ème} mois ($p = 0,0201$) et 24^{ème} mois ($p = 0,0026$). Ainsi, dans cet ordre, les litières de feuilles de cacaoyers ont été plus abondantes dans T1 et T2, dans T2 et dans les traitements T1 et T2. Par ailleurs, à Méagui, des variations significatives entre les traitements sont relevées au 6^{ème} mois ($p = 0,0026$), 18^{ème} mois ($p = 0,0334$) et 24^{ème} mois ($p = 0,0190$). Durant ces trois périodes, les plus importantes quantités de litière ont été observées dans T1 et T2 et les plus faibles dans T0.

Résultats et Discussion

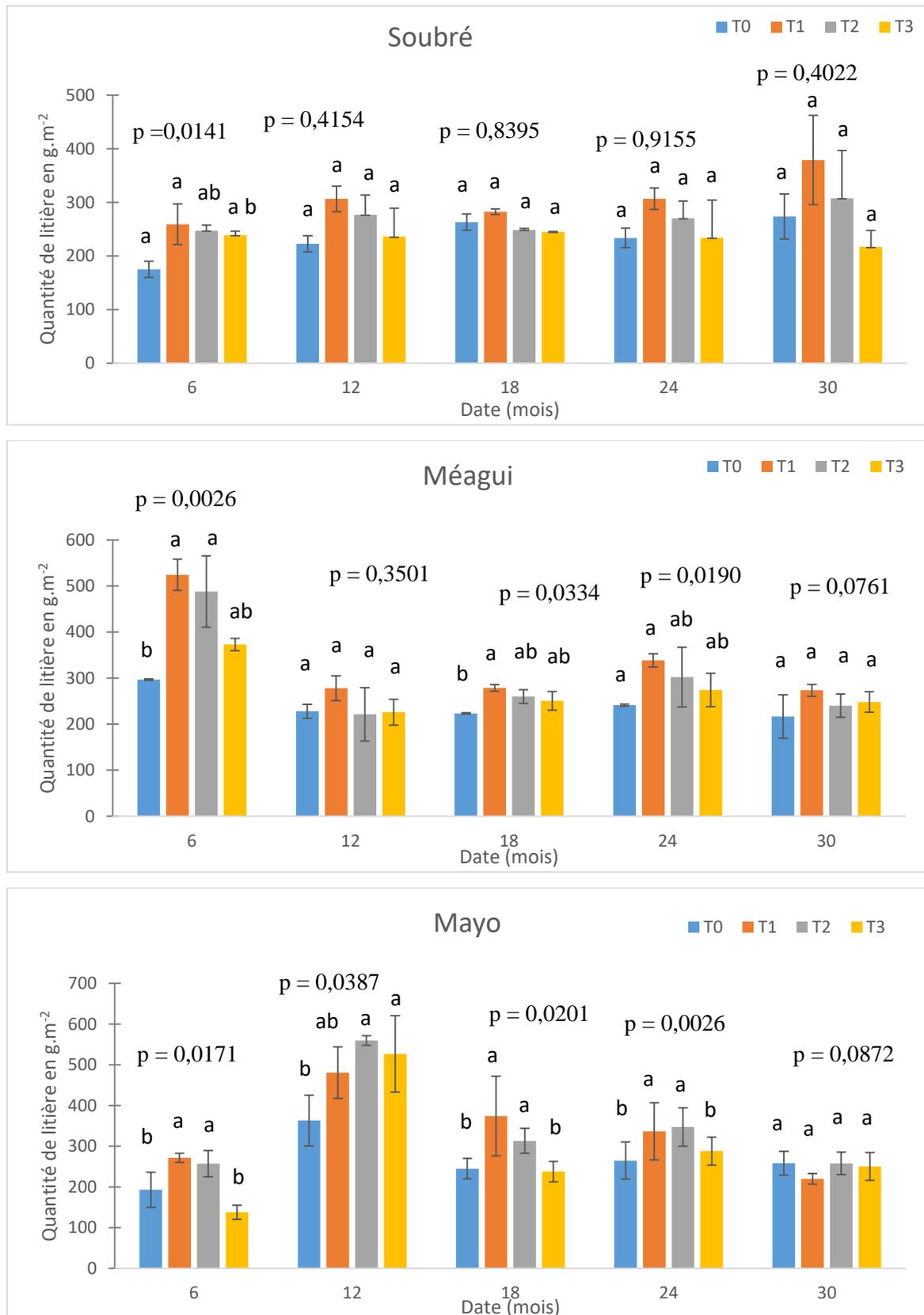


Figure 21 : Litières de feuilles de cacaoyers (g.m^{-2}) produites semestriellement en fonction des traitements dans la Nawa

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Résultats et Discussion

L'analyse du cumul des 30 mois de production de litière de feuilles de cacaoyers (Figure 22) a révélé des différences significatives sur les sites de Soubré ($p = 0,0481$), Méagui ($p = 0,0121$) et Mayo ($p = 0,0424$). En effet, la quantité de litière a été abondamment produite dans T1 à Méagui et dans T1 et T2 à Soubré et Mayo.

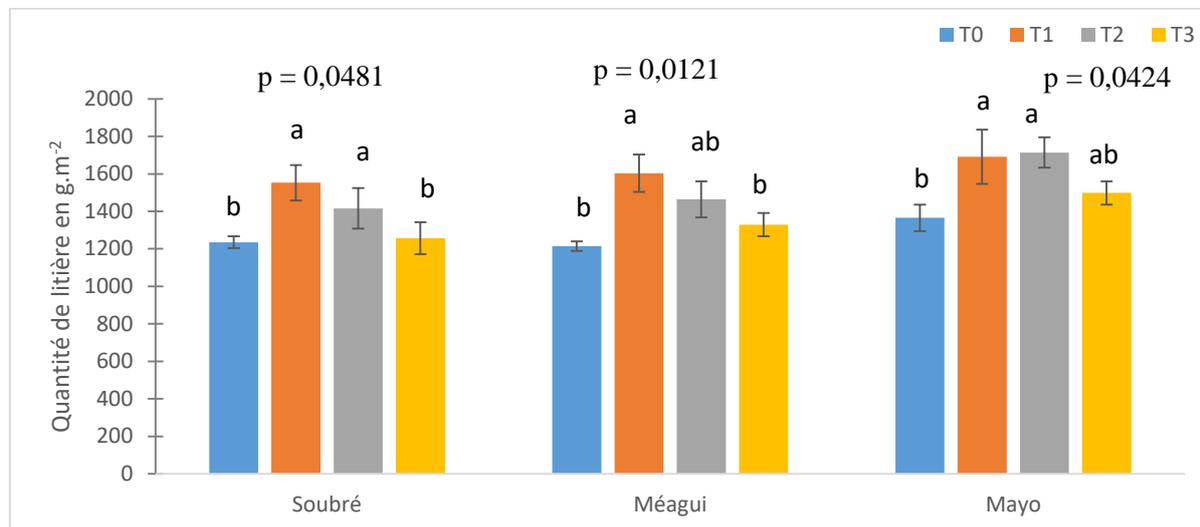


Figure 22 : Litières de feuilles de cacaoyers (g.m^{-2}) produites en fonction des traitements durant 30 mois dans la Nawa

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

3.1.4.2. Cas des cacaoyères de la région du Lôh-Djiboua

Les quantités des litières de feuilles de cacaoyers produites dans le Lôh-Djiboua (Figure 23), montrent des différences significatives entre les traitements aux différentes dates de récolte des litières de feuilles de cacaoyers à Divo, à Lakota et à Guitry.

Ainsi, à Divo, les quantités des litières de feuilles de cacaoyers ont varié significativement entre les traitements au 6^{ème} mois ($p = 0,0153$), au 12^{ème} mois ($p = 0,0456$) et au 30^{ème} mois ($p = 0,0200$). Au 6^{ème} et 12^{ème} mois, T2 et T3 ont produit les plus abondantes quantités de litière de feuilles de cacaoyers. Au 30^{ème} mois, la litière a été abondamment produite dans T1.

A Lakota, la quantité de litière produite au 6^{ème} est significativement plus abondante ($p = 0,0214$) dans T3. Dans cette même localité, au 12^{ème} mois, les quantités des litières produites dans T0, T2 et T3 sont significativement plus élevées ($p = 0,0432$) que celle produite dans T1. Par ailleurs, au 18^{ème} et 24^{ème} mois, les quantités des litières produites dans T2 sont apparues significativement plus élevées ($p = 0,0397$; $p = 0,0175$). Au 30^{ème} mois, les quantités des litières produites dans T2 et T3 se sont avérées significativement plus élevées ($p = 0,0437$).

Résultats et Discussion

De même à Guitry, des différences significatives entre les traitements ont été observées au 6^{ème} mois ($p = 0,0160$), 12^{ème} mois ($p = 0,0083$) et 30^{ème} mois ($p = 0,0312$). Au 6^{ème}, 12^{ème} et 30^{ème} mois, T2 s'est révélé comme le traitement ayant produit les plus grandes quantités de litière de feuilles de cacaoyers.

En ce qui concerne la production de litière de feuilles de cacaoyers sur les 30 mois (Figure 24), une variation significative ($p = 0,0307$) entre T2 et T0 a été constatée à Guitry. T2 est apparu comme le traitement ayant produit la plus grande quantité de litière ($1676,1 \pm 180,1 \text{ g.m}^{-2}$). Dans les autres localités, à savoir Divo et Lakota, les quantités de litière produites sont semblables entre les traitements.

Résultats et Discussion

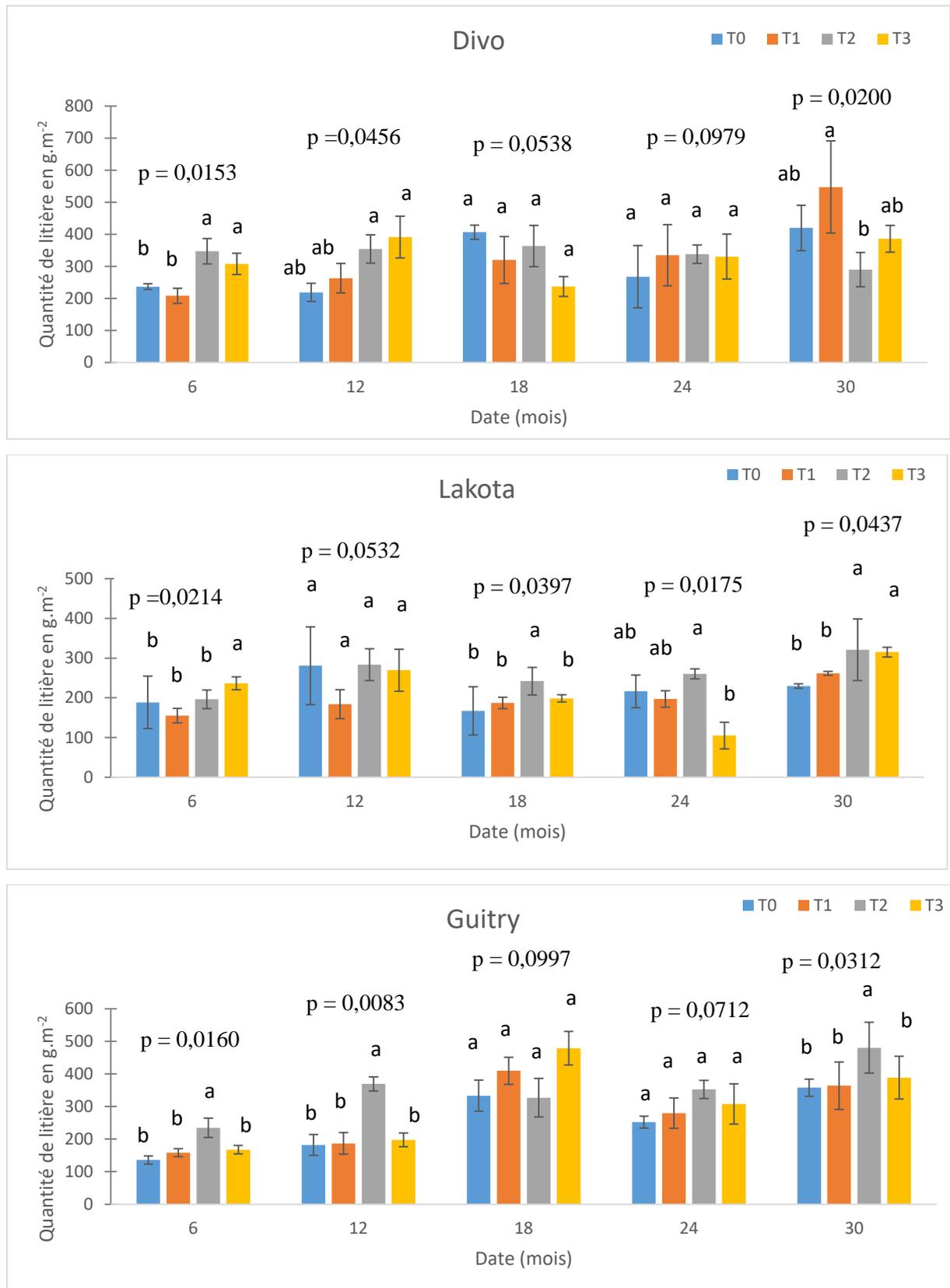


Figure 23 : Litières de feuilles cacaoyers (g.m^{-2}) produites semestriellement en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

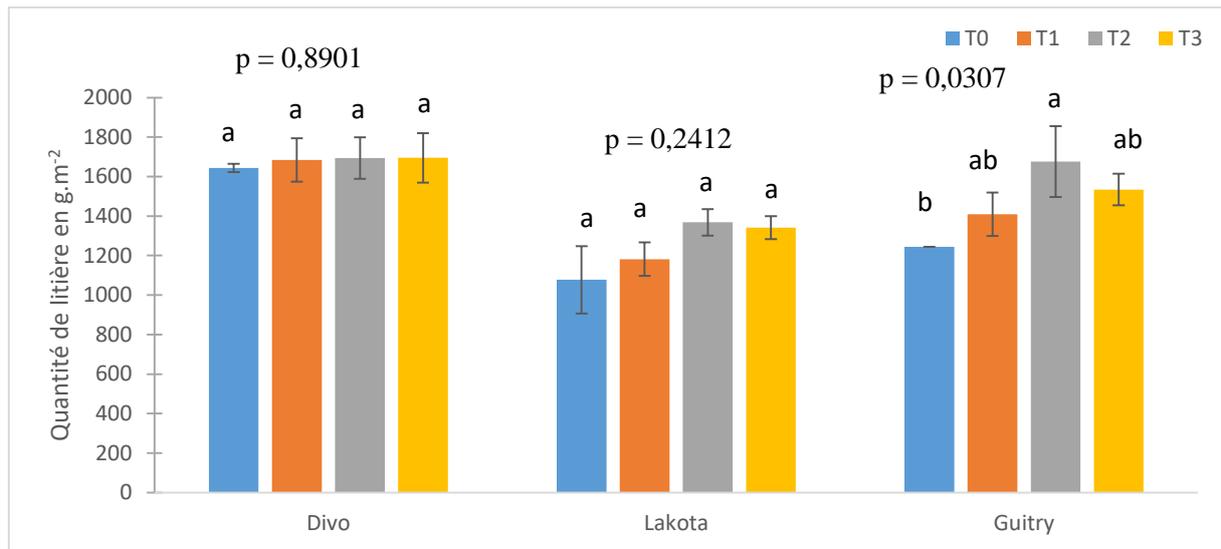


Figure 24 : Litières de feuilles de cacaoyers (g.m^{-2}) produites en fonction des traitements durant 30 mois dans le Lôh-Djiboua

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.5. Espèces fauniques recensées sur les sites d'étude

3.1.5.1. Cas des sites de la région de la Nawa

Le tableau VII montre les espèces fauniques recensées dans la région de la Nawa. Ces espèces sont diversifiées et se répartissent en six groupes taxonomiques, à savoir : les vers de terre, les diplopodes, les chilopodes, les insectes sociaux terricoles, les insectes ptérygotes et les acariens. Le taxon des vers de terre est subdivisé en deux catégories écologiques (Détritivores et Géophages), tandis que les taxa de diplopodes, chilopodes et les insectes sociaux terricoles se regroupent en une seule catégorie écologique. Toutefois, ils se distinguent en saprophage, prédateur et omnivore selon leur mode de nutrition. La classe écologique des taxa des insectes et des acariens reste indéterminée. A Soubré tout comme à Mayo, huit espèces du taxon des vers de terre ont été identifiées contre sept à Méagui avec l'absence de *Dichogaster mamillata*. Au niveau des diplopodes, quatre espèces de catégorie écologique « saprophage » se répartissent dans les trois localités. De même, à l'exception de l'espèce *Lithobius ssl.*, absente à Soubré et Méagui, quatre espèces prédatrices de chilopodes sont présents dans les trois sites (Soubré, Méagui et Mayo). Les quatre espèces d'insectes sociaux terricoles omnivores ont été identifiées à Méagui. On note aussi que les espèces *Ancistrotermes guineensis* et *Pseudacanthotermes militaris* sont uniquement présentes à Soubré, tandis que les espèces *Tapinoma magnum* et *Ancistrotere dimorphus* sont uniquement à Méagui. Aucune espèce

d'insecte ptérygote et d'acarien n'a été identifiée à Méagui. Par contre, à Soubré et à Mayo, les insectes ptérygotes du genre *Histeridae shipka* et *Anommatus duodecimstriatus* ont été identifiés. Les acariens n'ont été observés qu'à Soubré.

Au total, dans la région de la Nawa, vingt-deux espèces de macrofaunes ont été recensées. Elles se répartissent en huit espèces de vers de terre, quatre espèces de diplopodes, quatre chilopodes et quatre insectes sociaux terricoles et deux espèces d'insectes ptérygotes. Parmi ces vingt-deux espèces, dix-huit ont été dénombrées dans chacune des trois localités. Par ailleurs, deux espèces d'acariens (mésafaune) ont été observées à Soubré.

3.1.5.2. Cas des sites de la région du Lôh-Djiboua

Les espèces recensées dans les trois localités Divo, Lakota et Guitry dans le Lôh-Djiboua (tableau VIII) sont presque les mêmes que celles identifiées dans la Nawa, avec les mêmes taxa et catégories écologiques. A Guitry, toutes les huit espèces du taxon des vers de terre ont été identifiées contre sept à Lakota et six à Divo. Au niveau des diplopodes, les quatre espèces de catégorie écologique « saprophage » se répartissent dans les trois localités, à l'exception de la localité de Lakota qui a présenté que trois espèces avec l'absence de l'espèce *Tachypodoiulus niger*. De même, à l'exception de l'espèce *Lithobius ssl.*, absente à Divo et Lakota, les chilopodes avec trois espèces prédatrices sont présentes sur les trois sites du Lôh-djiboua. Les insectes sociaux terricoles omnivores et xylophages ont été identifiés à Divo, à Lakota et à Guitry. Aucune espèce d'insecte acarien n'a été identifiée à Divo. Par contre, à Lakota et à Guitry, les insectes ptérygotes du genre *Pardosa lugubris* et *Pholcus phalangioïdes* étaient présentes. Par ailleurs, des gastéropodes ont été identifiés à Lakota.

En somme dans la région du Lôh-Djiboua, vingt-quatre espèces de macrofaunes ont été observées. Elles se répartissent en neuf espèces de vers de terre, six espèces d'insectes sociaux terricoles, quatre espèces de diplopodes, trois espèces de chilopodes, une espèce d'insecte ptérygote et une espèce de gastéropode. Aussi, deux espèces d'acariens (mésafaune) ont-elles été également observées. Sur les vingt-quatre espèces identifiées dans la région, vingt ont été dénombrées à Divo, dix-huit à Lakota et vingt-deux à Guitry.

Tableau VII : Espèces fauniques recensées dans la région de la Nawa et leur répartition par site

Groupe taxonomique	Espèces	Catégorie écologique	Soubré	Méagui	Mayo
Vers de terre	<i>Lumbricus terrestris</i> (Linnaeus, 1758)	Détritivore	+	+	+
	<i>Lumbricus rubellus</i> (Hoffmeister, 1843)	Détritivore	+	+	+
	<i>Dichogaster papillosa</i> (Omodea, 1958)	Détritivore	+	+	+
	<i>Hyperiodrilus africanus</i> (Beddard, 1891)	Géophage	+	+	+
	<i>Stuhlmanina zielei</i> (Omodea, 1958)	Géophage	+	+	+
	<i>Millsonia omodeoi</i> (Sims, 1986)	Géophage	+	+	+
	<i>Millsonia lamtoiana</i> (Omodeo and Vaillaud, 1967)	Détritivore	+	+	+
	<i>Dichogaster mamillata</i> (Csuzdi and Tondoh, 2007)	Détritivore	+	-	+
Diplopodes	<i>Oxidus gracilis</i>	Saprophage	+	+	+
	<i>Anoplodesmus saussurii</i>	Saprophage	+	+	+
	<i>Tachypodoiulus niger</i>	Saprophage	+	+	+
	<i>Archispirostreptus gigas</i>	Saprophage	+	+	+
Chilopodes	<i>Scolopendra cingulata</i>	Prédateur	+	+	+
	<i>Cryptopidae sp.</i>	Prédateur	+	+	+
	<i>Geophilus ssl.</i>	Prédateur	+	+	+
	<i>Lithobius ssl.</i>	Prédateur	-	-	+
Insectes sociaux terricoles	<i>Tapinoma magnum</i>	Omnivore	-	+	-
	<i>Ancistrotere dimorphus</i>	Omnivore	-	+	-
	<i>Ancistrotermes guineensis</i>	Omnivore	+	+	+
	<i>Pseudacanthotermes militaris</i>	Omnivore	+	+	-
Insectes ptérygotes	<i>Anommatus duodecimstriatus</i>	nd	-	-	+
	<i>Histeridae shipka</i>	nd	+	-	-
Acariens	<i>Pardosa lugubris</i>	nd	+	-	-
	<i>Pholcus phalangioïdes</i>	nd	+	-	-
Nombre total			20	18	18

NB. Présence = +, absence = -, nd= non déterminé

Tableau VIII : Espèces fauniques recensées dans la région du Lôh-Djiboua et leur répartition par site

Groupe taxonomique	Espèces	Catégorie écologique	Divo	Lakota	Guitry
Vers de terre	<i>Lumbricus terrestris</i> (Linnaeus, 1758)	Détritivore	+	+	+
	<i>Lumbricus rubellus</i> (Hoffmeister, 1843)	Détritivore	+	+	+
	<i>Dichogaster papillosa</i> (Omodea, 1958)	Détritivore	+	+	+
	<i>Hyperiodrilus africanus</i> (Beddard, 1891)	Géophage	+	+	+
	<i>Dichogaster agilis</i> (Omodea, 1958)	Détritivore	+	+	+
	<i>Millsonia omodeoi</i> (Sims, 1986)	Géophage	+	+	+
	<i>Millsonia lamtoiana</i> (Omodeo and Vaillaud, 1967)	Détritivore	-	+	+
	<i>Dichogaster mamillata</i> (Csuzdi and Tondoh, 2007)	Détritivore	+	+	+
	<i>Eiseniella tetraedra</i> (savigny, 1826)	nd	-	-	+
	Diplopodes	<i>Oxidus gracilis</i>	Saprophage	+	+
<i>Anoplodesmus saussurii</i>		Saprophage	+	+	+
<i>Tachypodoiulus niger</i>		Saprophage	+	-	+
<i>Archispirostreptus gigas</i>		Saprophage	+	+	+
Chilopodes	<i>Scolopendra cingulata</i>	Prédateur	+	+	+
	<i>Geophilus ssl.</i>	Prédateur	+	+	+
	<i>Lithobius ssl.</i>	Prédateur	-	-	+
Insectes sociaux terri- coles	<i>Tapinoma magnum</i>	Omnivore	+	-	+
	<i>Ancistrotere dimorphus</i>	Omnivore	+	+	-
	<i>Ancistrotermes guineensis</i>	Omnivore	+	+	+
	<i>Microtermes subhvalinus</i>	nd	+	-	-
	<i>Coptotermes intermedius</i>	Xylophage	+	-	-
Acariens	<i>Pseudacantho- termes militaris</i>	Omnivore	+	+	+
	<i>Pardosa lugubris</i>	nd	-	+	+
Insectes ptérygotes	<i>Pholcus phalangioïdes</i>	nd	-	-	+
	<i>Anommatus duodecimstriatus</i>	nd	+	-	+
Gastéropode	<i>Acatina acatina</i>	Omnivore	-	+	-
Nombre total			20	18	22

NB. Présence = +, absence = -, nd= non déterminé

3.1.6. Effets de la fertilisation minérale sur la macrofaune du sol

3.1.6.1. Effet de la fertilisation minérale sur la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols de la Nawa

Les figures 25, 26 et 27 indiquent respectivement les résultats de la densité de macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon observés dans la Nawa.

Dans la localité de Soubré, des différences significatives entre les traitements pour la densité de la macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon sont observées. En effet, les p-values valent, dans cet ordre, à : 0,0134 ; 0,019 et 0,004. La densité de macrofaune est plus élevée dans T3 et T1, pendant que la richesse spécifique l'est dans T1, T2 et T3. Quant à l'indice de Shannon, T3 est apparu comme le meilleur traitement.

A Méagui, la densité de la macrofaune mesurée dans T1 est significativement plus élevée que celles déterminées dans les autres traitements ($p = 0,0219$). Par contre, pour les indices de diversité aucune différence significative entre les traitements n'a été décelée.

Sur le site de Mayo, le résultat relatif à l'indice de Shannon a montré une variation significative entre les traitements ($p = 0,043$). Le classement montre que les traitements fertilisés T1, T2 et T3 sont les meilleurs. Pour les deux autres variables, à savoir : la densité de macrofaune et la richesse spécifique, aucun traitement n'est apparu meilleur que l'autre. En effet, les probabilités sont, dans cet ordre, égales à 0,2631 et 0,05.

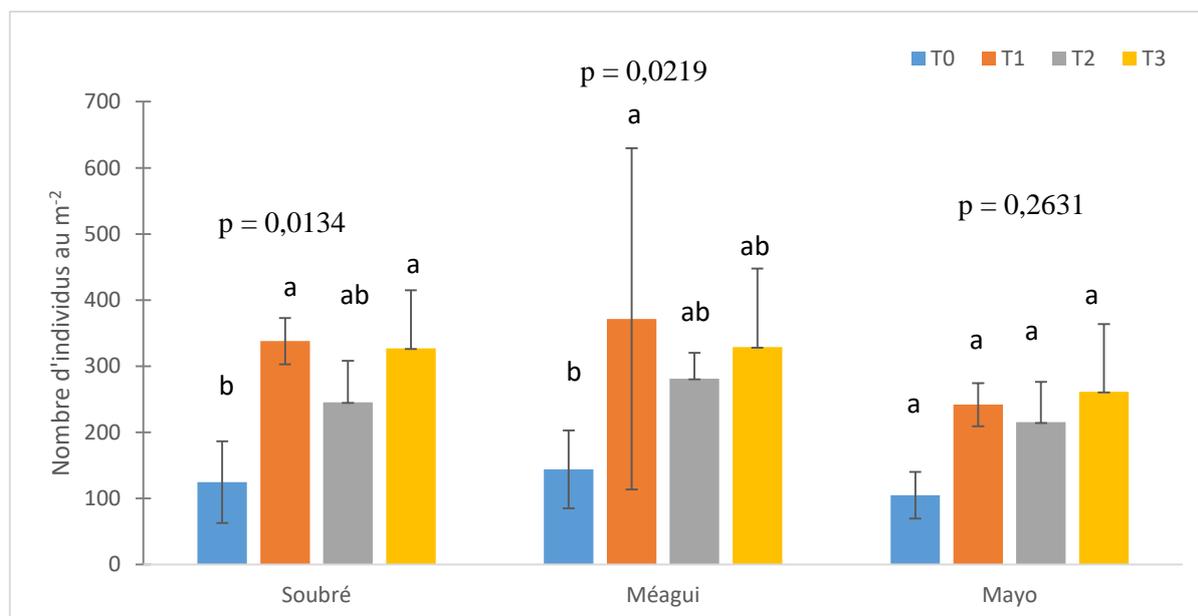


Figure 25 : Densité de la macrofaune du sol (ind.m⁻²) en fonction des traitements dans la Nawa
 T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Résultats et Discussion

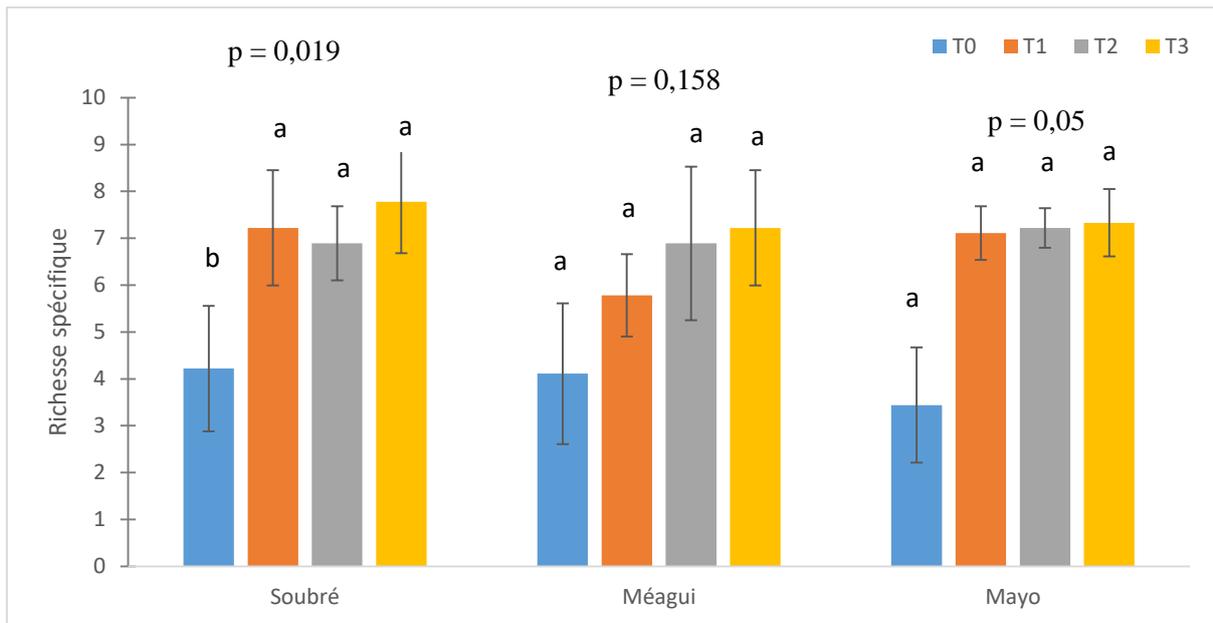


Figure 26 : Richesse spécifique (espèces.m⁻²) de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans la Nawa

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

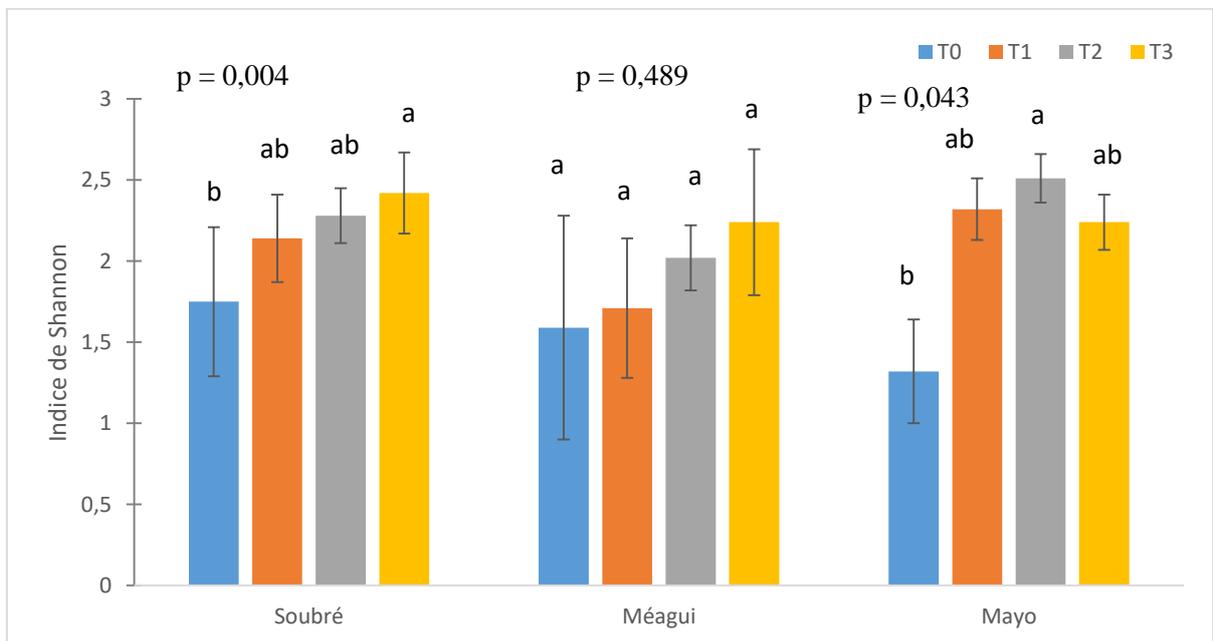


Figure 27 : Valeurs de l'indice de Shannon en fonction des traitements dans la Nawa

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

3.1.6.2. Effet de la fumure minérale sur la densité et la diversité de la macrofaune des sols du Lôh-Djiboua

L'analyse des résultats de la densité de macrofaune (Figure 28), la richesse spécifique (Figure 29) et l'indice de Shannon (Figure 30) dans le Lôh-Djiboua montre que :

- à Divo, à part la densité de la macrofaune, où $p = 0,258$, celles calculées pour la richesse spécifique ($p = 0,037$) et l'indice de Shannon ($p = 0,009$) indiquent des différences significatives entre les traitements. Pour ces paramètres, T2 est apparu comme le meilleur traitement.

- à Lakota, à l'exception de la richesse spécifique, où $p = 0,025$, exprimant une différence significative entre les traitements, celles calculées pour la densité de macrofaune et l'indice de Shannon étaient supérieures à $\alpha = 5 \%$. Pour le cas de la richesse spécifique, le traitement T2 s'est avéré meilleur que les autres.

- à Guitry, aucune variation significative entre les traitements n'a été observée pour la densité de macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon. En effet, les probabilités (p) calculées sont, dans cet ordre, estimées à : 0,138 ; 0,267 et 0,153.

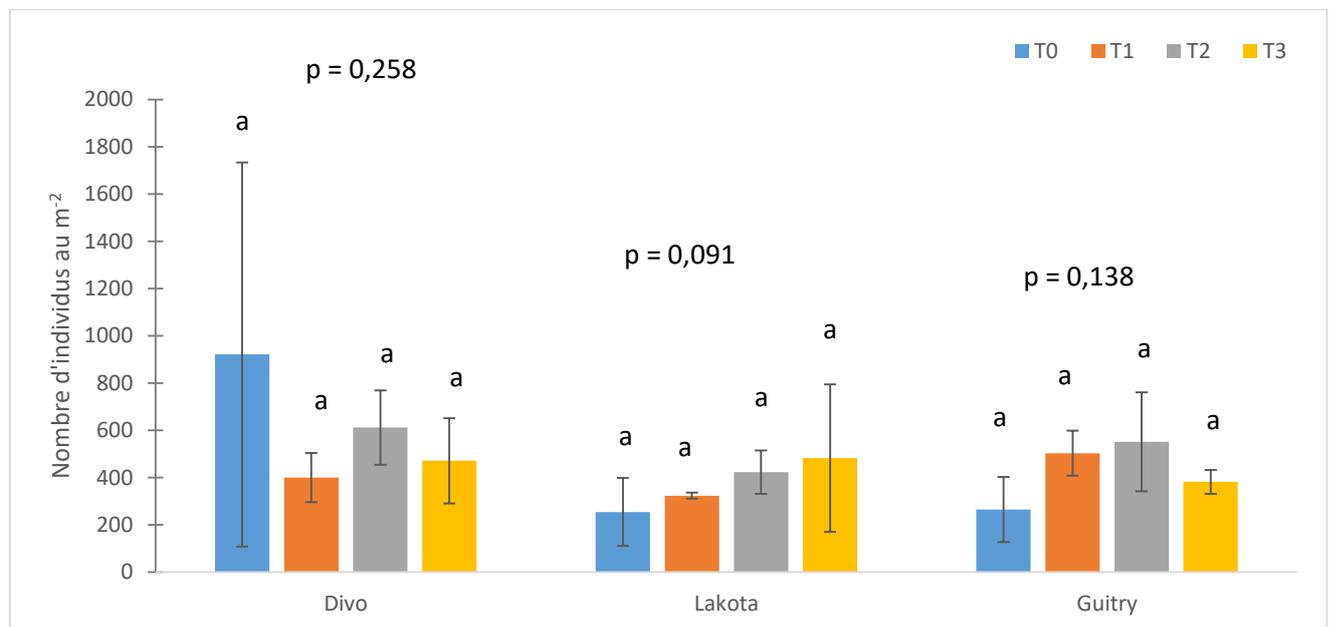


Figure 28 : Densité de la macrofaune du sol (ind.m⁻²) en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

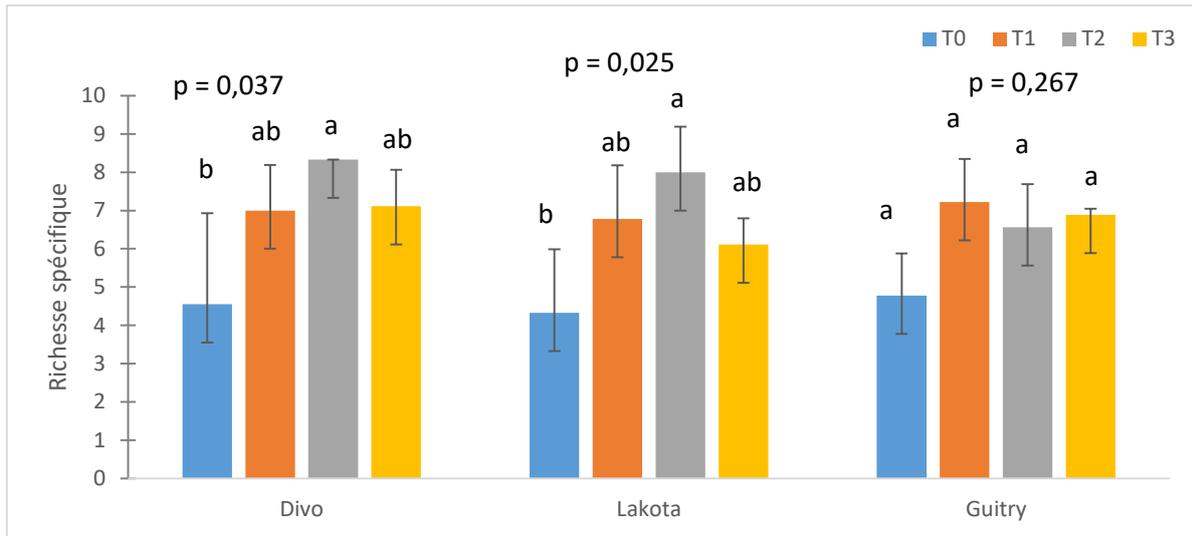


Figure 29 : Richesse spécifique (espèces.m⁻²) de la macrofaune du sol en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

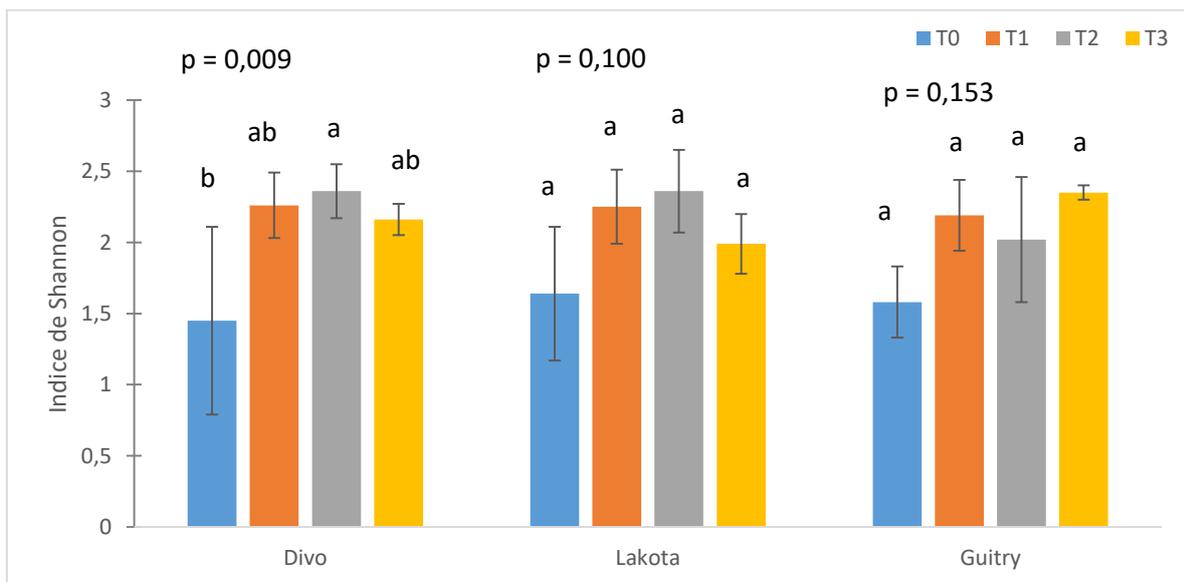


Figure 30 : Valeurs de l'indice de Shannon en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.6.3. Cas particulier de l'effet de la fumure minérale sur la densité des vers de terre

Le résultat de l'effet de la fumure minérale sur la densité des vers de terre dans la Nawa (Figure 31) ne montre aucune différence significative entre les traitements sur tous les sites. En effet, à Soubré, à Méagui et à Mayo, les p-values calculées sont, respectivement, égales à : 0,075 ; 0,134 et 0,519.

Résultats et Discussion

Par contre, dans le Lôh-Djiboua, le résultat de l'effet de la fumure minérale sur la densité des vers de terre (Figure 32) montre qu'à Divo, une différence significative entre les traitements est ressortie ($p = 0,039$). Le traitement T2 est meilleur que les autres. Par contre, sur les deux autres sites, la densité de vers de terre est identique entre les traitements.

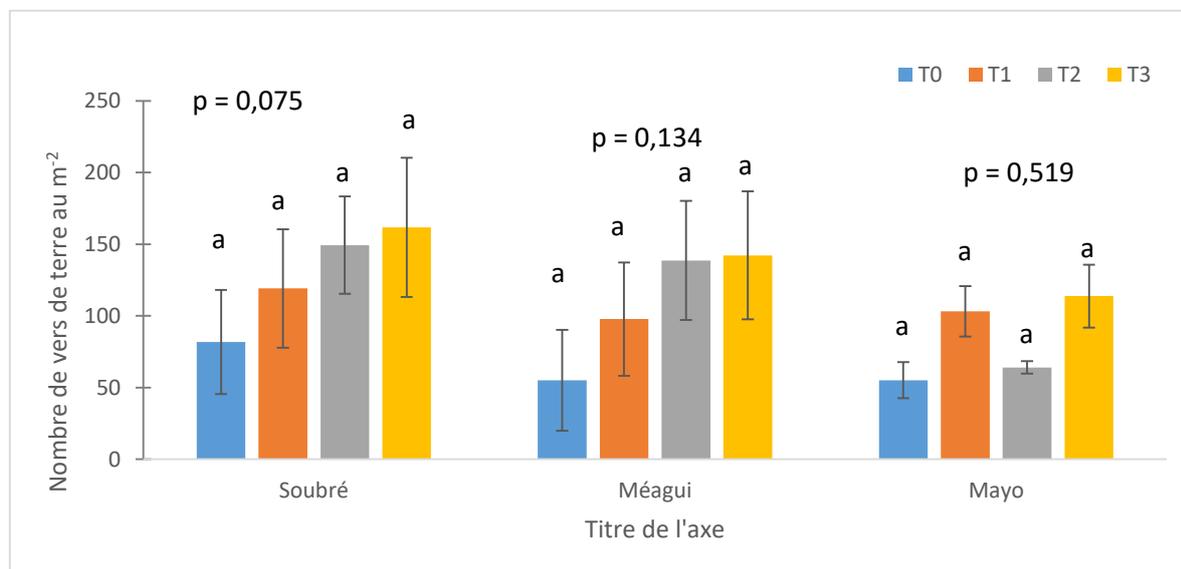


Figure 31 : Densité des vers de terre (ind.m⁻²) en fonction des traitements dans la Nawa

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

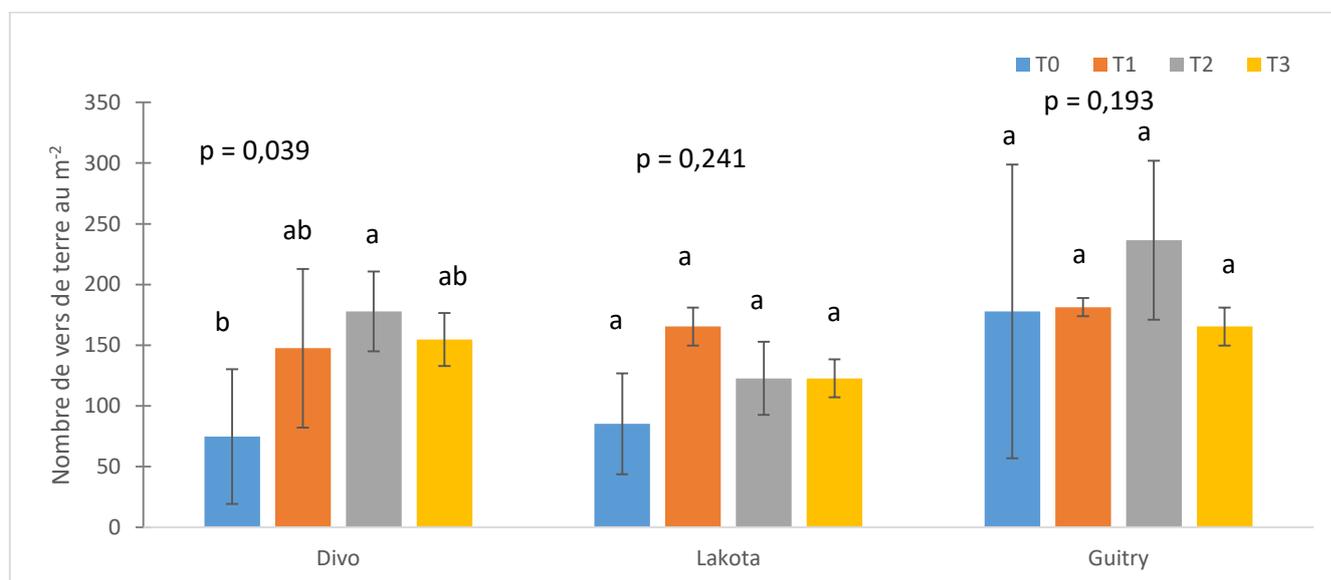


Figure 32 : Densité des vers de terre (ind.m⁻²) en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.6.4. Effet de la fumure minérale sur l'évolution de la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols de la Nawa

➤ Site de Soubré

Le bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol indiqué par le tableau IX montre qu'à Soubré la densité de la macrofaune a augmenté de 318,6 %, 20,4 % et 41,8 % de 2018 à 2020, respectivement dans T0, T1 et T2. Pour T3, une baisse de -12,3 % a été déterminée de 2018 à 2020. Concernant, la richesse spécifique, une augmentation a été constatée de 2018 à 2020 dans tous les traitements. Cette augmentation est apparue plus importante dans T1 avec 26,9 %. S'agissant de l'indice de Shannon, à l'exception de T0 dont le bilan est négatif (-19 %) de 2018 à 2020, des augmentations significatives ont été observées dans les traitements fertilisés T1, T2 et T3. Parmi ces derniers, T1 a eu la plus forte augmentation.

Tableau IX : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Soubré

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	58,6	245,3	318,6
	T1	261,3	314,7	20,4
	T2	229,3	325,3	41,8
	T3	346,7	304	-12,3
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	4,6	5	8,7
	T1	6,3	8	26,9
	T2	7	7,6	8,5
	T3	7,6	8,6	13,1
Indice de Shannon	T0	2,1	1,7	-19
	T1	1,5	2,6	73,3
	T2	2,4	2,5	4,1
	T3	2,4	2,7	12,5

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

➤ Site de Méagui

Dans la localité de Méagui, le résultat du bilan de la densité de la macrofaune et des indices de diversités (Tableau X) indique une forte augmentation de la densité de la macrofaune dans T3 et T2. Cette hausse était plus importante dans T3 (110 %). Pour T0 et T1, des baisses ont été constatées. S'agissant de la richesse spécifique, excepté T0, dont une baisse de -13 % a été relevée de 2018 à 2020, les traitements fertilisés T1, T2 et T3 ont eu des bilans positifs. Par ailleurs, cette hausse était plus importante dans T3 (123,9 %). Au niveau de l'indice de Shannon,

Résultats et Discussion

hormis T0 qui est demeuré statique de 2018 à 2020, les autres traitements ont réalisé des bonds quantitatifs, allant jusqu'à 100 % dans T1.

Tableau X : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Méagui

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	122,3	117,3	-4,1
	T1	666,7	282,7	-57,6
	T2	229,3	437,3	90,7
	T3	213,3	448	110
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	4,6	4	-13
	T1	4,6	8,3	80,4
	T2	5	9,3	86
	T3	4,6	10,3	123,9
Indice de Shannon	T0	1,6	1,6	0
	T1	1,4	2,8	100
	T2	1,8	2,5	38,9
	T3	1,9	2,6	36,8

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

➤ Site de Mayo

Le calcul du bilan de la densité de la macrofaune du sol et des indices de diversité sur le site de Mayo (Tableau XI) indique de fortes augmentations de 2018 à 2020 pour tous les traitements. Cependant, les plus fortes hausses sont ressorties, pour la densité de la macrofaune dans T0 (1366,7 %), pour la richesse spécifique dans T3 (152,2 %) et pour l'indice de Shannon dans T1 (100 %) et T2 (100 %).

Tableau XI : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Mayo

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	16	234,67	1366,7
	T1	240	437,3	82,2
	T2	106,7	485,3	354,8
	T3	133,3	528	296,1
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	3	6,3	110
	T1	3	12,3	310
	T2	4,6	11	139,1
	T3	4,6	11,6	152,2
Indice de Shannon	T0	1,4	2,1	50
	T1	1,6	3,2	100
	T2	2,1	2,8	33,3
	T3	1,5	3	100

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

3.1.6.5. Effet de la fumure minérale sur l'évolution de la densité et les indices de diversité de la macrofaune des sols du Lôh-Djiboua

➤ Site de Divo

A Divo, le bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol (Tableau XV) montre que la densité de la macrofaune du sol et la richesse spécifique ce sont accrues dans tous les traitements de 2018 à 2020. Pour la première variable, la plus forte hausse est apparue dans T0 (522,6 %) et pour la seconde variable dans T2 (74,6 %). S'agissant de l'indice de Shannon, à l'exception T0, où la valeur a chuté de -29,4 % de 2018 à 2020, les valeurs calculées dans les traitements fertilisés ont révélé une tendance à la hausse.

Tableau XII : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Divo

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	80,3	516	542,6
	T1	298,7	570,7	91,1
	T2	330,7	816	146,8
	T3	309,3	509,3	64,7
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	3,6	6	66,7
	T1	5,3	7,6	43,4
	T2	6,3	11	74,6
	T3	5	7,6	52
Indice de Shannon	T0	1,7	1,2	-29,4
	T1	2	2,3	15
	T2	2,2	2,6	18,2
	T3	1,9	2,4	26,3

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

➤ Site de Lakota

A Lakota, le résultat du bilan de la densité de la macrofaune du sol et des indices de diversité (Tableau XIII) révèle des augmentations de la densité de la macrofaune et de la richesse spécifique de 2018 à 2020 dans tous les traitements. Pour la première caractéristique, la plus forte augmentation a été relevée dans T0 (441,2 %) et pour la seconde dans T1 (65,2 %). S'agissant de l'indice de Shannon, excepté le traitement non fertilisé T0 qui a révélé une baisse de - 6,3 %, les traitements fertilisés ont progressé de 2018 à 2020.

➤ Site de Guitry

Le tableau XIV présentant le bilan de la densité de la macrofaune et des indices de diversité de 2018 à 2020 à Guitry montre que, la densité de la macrofaune a progressé dans tous les traitements à Guitry. Cette progression était plus prononcée dans T1 (241,2 p.c.). Pour la

Résultats et Discussion

caractéristique richesse spécifique, T3 avec 86 % a eu la plus forte augmentation de 2018 à 2020. Par ailleurs, pour ce paramètre, T2 a révélé une baisse de -4,8 %. Concernant l'indice de Shannon, des augmentations ont été observées de 2018 à 2020 dans T1 et T3 alors que, des baisses étaient observées dans les deux autres traitements.

Tableau XIII : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Lakota

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	68	368	441,2
	T1	122,6	506,6	313,2
	T2	288	341,3	18,5
	T3	314,7	416	32,2
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	3,6	5	38,9
	T1	4,6	7,6	65,2
	T2	7	8,3	18,6
	T3	5	6	20
Indice de Shannon	T0	1,6	1,5	-6,3
	T1	1,9	2,2	15,8
	T2	2,3	2,5	8,7
	T3	1,8	1,9	5,6

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

Tableau XIV : Bilan de la densité et des indices de diversité de la macrofaune du sol à Guitry

Paramètre	Traitement	Valeurs en juin 2018	Valeurs en juin 2020	Δ (%)
Densité de la macrofaune (ind.m ⁻²)	T0	165,3	280	69,4
	T1	272	928	241,2
	T2	304	485,3	59,6
	T3	218,7	576	163,4
Richesse spécifique (Nombre d'espèce)	T0	4	5,3	32,5
	T1	5,6	9,6	71,4
	T2	6,3	6	-4,8
	T3	5	9,3	86
Indice de Shannon	T0	1,7	1,43	-15,9
	T1	2,1	2,4	14,3
	T2	2,2	1,6	-27,3
	T3	2,1	2,6	23,8

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.7. Effet de la fertilisation minérale sur l'activité biologique du sol

3.1.7.1. Effet de la fertilisation minérale sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa

L'étude de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer à Soubré (Figure 33 A), montre que quel que soit la date, elle est demeurée plus importante dans les traitements fertilisés T1,

Résultats et Discussion

T2 et T3 que dans le traitement non fertilisé T0 durant l'essai. Dans les traitements fertilisés, le taux de décomposition était plus important dans le traitement T3 aux 12^{ème}, 18^{ème} et 24^{ème} mois. Par ailleurs, T3 est secondé par T2.

A Méagui, la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer comme indiquée par la figure 33 B, montre qu'au 6^{ème} mois, qu'elle est supérieure dans traitements fertilisés. Par contre, au 12^{ème} mois seules les feuilles de cacaoyers des traitements T1 et T3 ont été abondamment décomposées comparativement à celles du traitement T0. Au 18^{ème} mois, d'abondantes feuilles de cacaoyers ont été décomposées dans les traitements fertilisés que dans le traitement témoin T0. Au 24^{ème} mois, les différences entre les traitements au niveau du taux de décomposition des feuilles de cacaoyers sont faibles.

A Mayo, les résultats de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers (Figure 33 C), révèlent que les taux de décomposition calculés aux 6^{ème}, 12^{ème} et 18^{ème} mois sont ressortis supérieurs dans les traitements fertilisés T1, T2 et T3 que dans le traitement non fertilisé (T0). Par contre, au 24^{ème} mois la décomposition a été plus importante dans T1 que dans les trois autres traitements.

Le bilan de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer dans la Nawa (Figure 34), montre que les feuilles de cacaoyers se sont décomposées davantage dans les traitements fertilisés que dans celui non fertilisé (T0) pendant toute la durée de l'essai. Par ailleurs, entre les traitements fertilisés, T3 est ressorti comme le meilleur traitement en termes de décomposition des feuilles de cacaoyers.

Résultats et Discussion

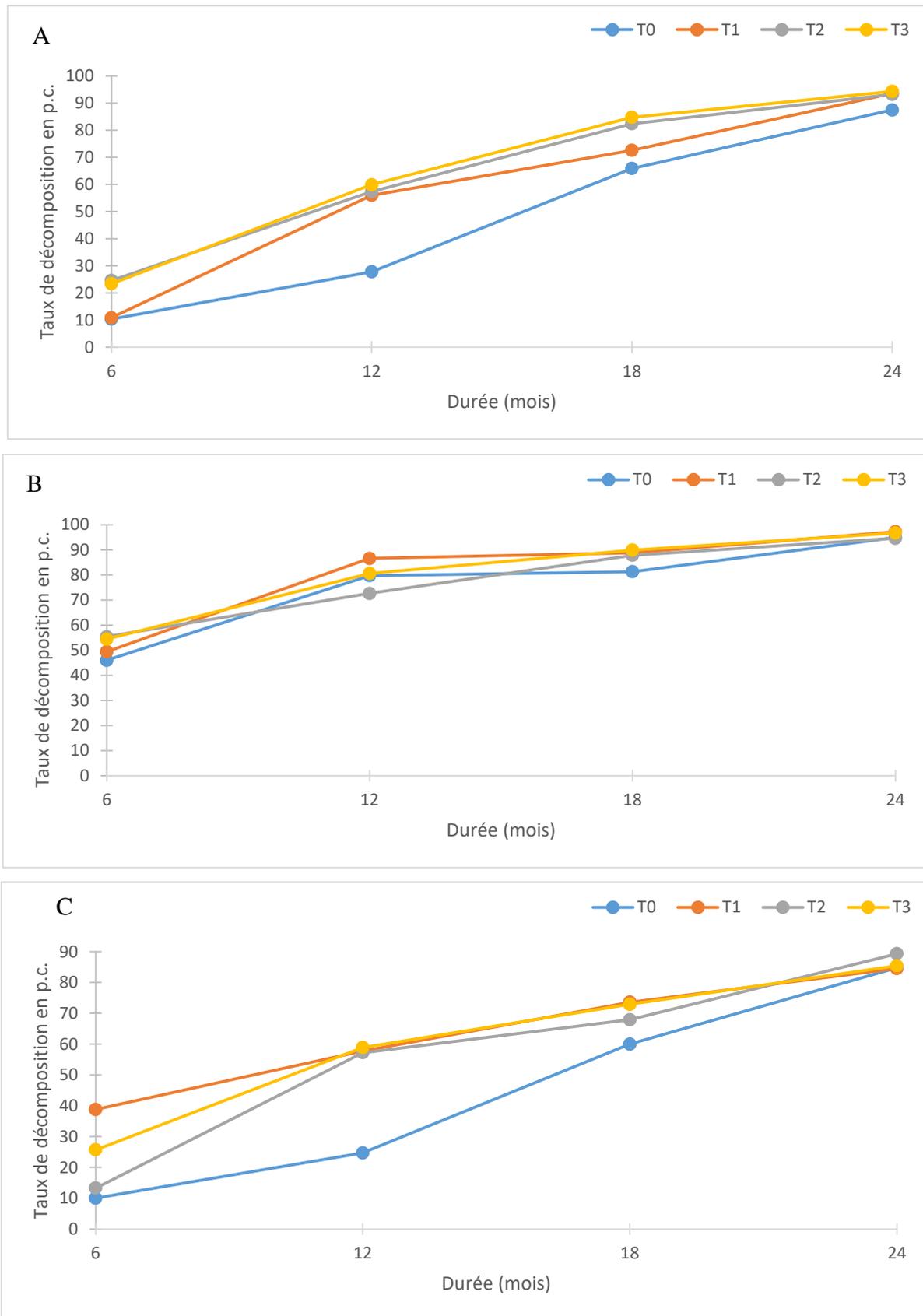


Figure 33 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois à Soubré (A), Méagui (B) et Mayo (C).

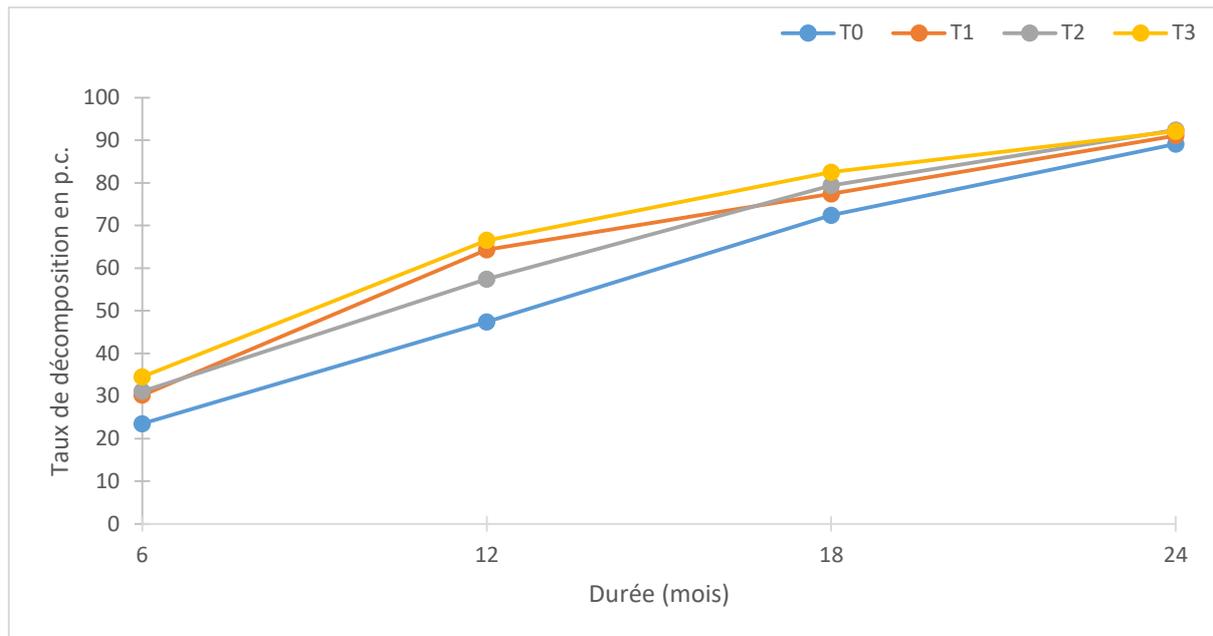


Figure 34 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois dans la Nawa

3.1.7.2. Effet de la fumure minérale sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua

Les résultats de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer à Divo (Figure 35 A), révèlent qu'aux 6^{ème}, 12^{ème} et 18^{ème} mois, la décomposition des feuilles de cacaoyers est plus importante dans le traitement T3, puis suit le traitement T2. Durant ces dates, le taux de décomposition des feuilles de cacaoyers est demeuré plus faible dans le traitement T1. Au 24^{ème} mois, T3, T2 et T0 ont généré les mêmes taux de décomposition des litières.

Sur le site de Lakota, la figure 35 B montrant les résultats de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer indique que tous les traitements ont eu le même taux de décomposition au 6^{ème}. Par contre, aux 12^{ème} et 18^{ème} mois, la décomposition est apparue plus importante dans cet ordre : T3, T2 et T0. Par ailleurs, au 24^{ème} mois, la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers était plus considérable dans les traitements fertilisés que dans le traitement qui ne l'est pas (T0).

A Guitry, les résultats de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers (Figure 35 C), indique que la décomposition dans les traitements fertilisés est rapide que celle du traitement non fertilisé sur toute la durée de l'essai.

Résultats et Discussion

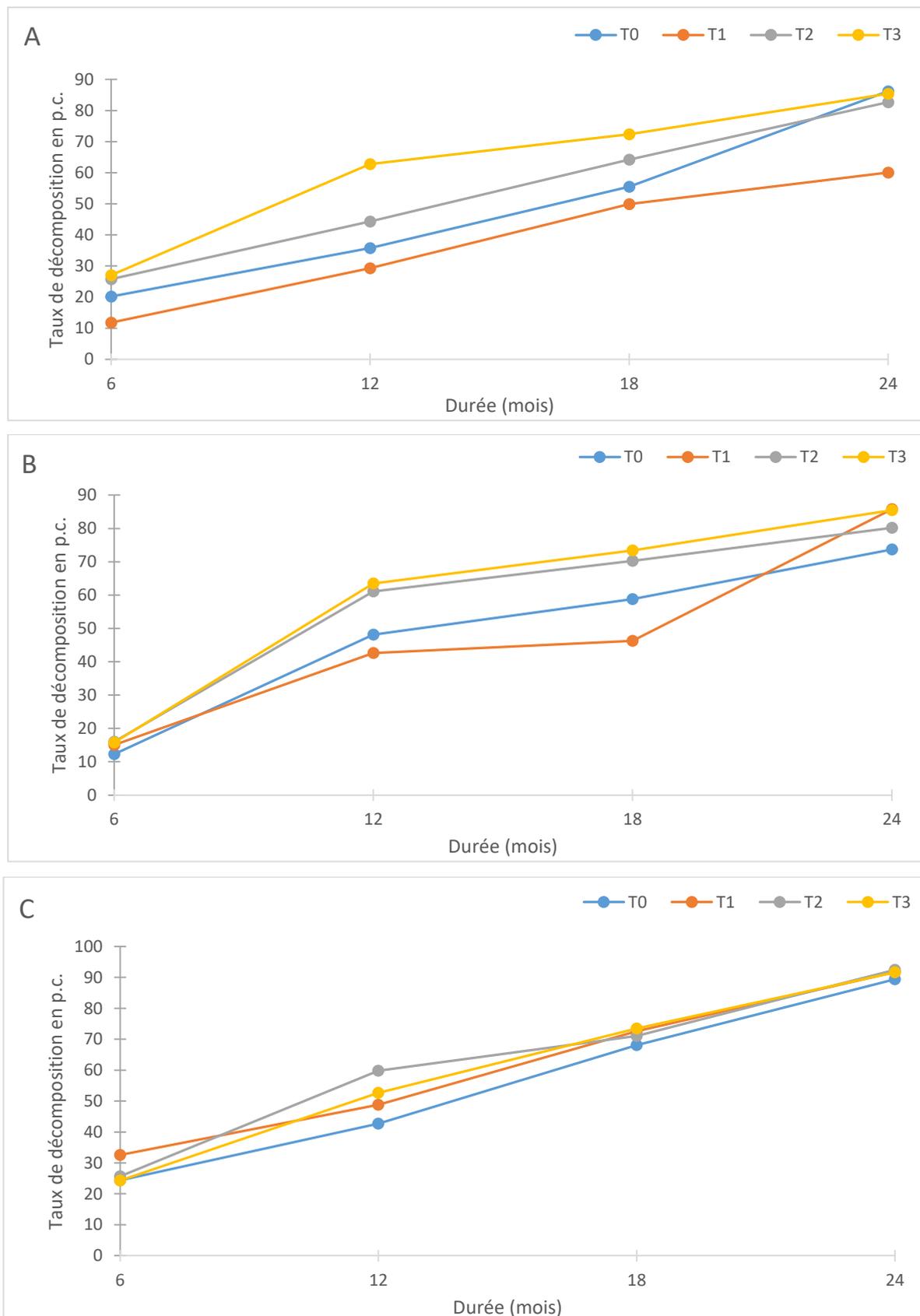


Figure 35 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois à Divo (A), Lakota (B) et Guitry (C)

Dans le Lôh-Djiboua, le bilan de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyer (Figure 36), montre que le taux de décomposition des feuilles de cacaoyers a été plus conséquent dans les traitements fertilisés T3 et T2 tout au long de l'essai.

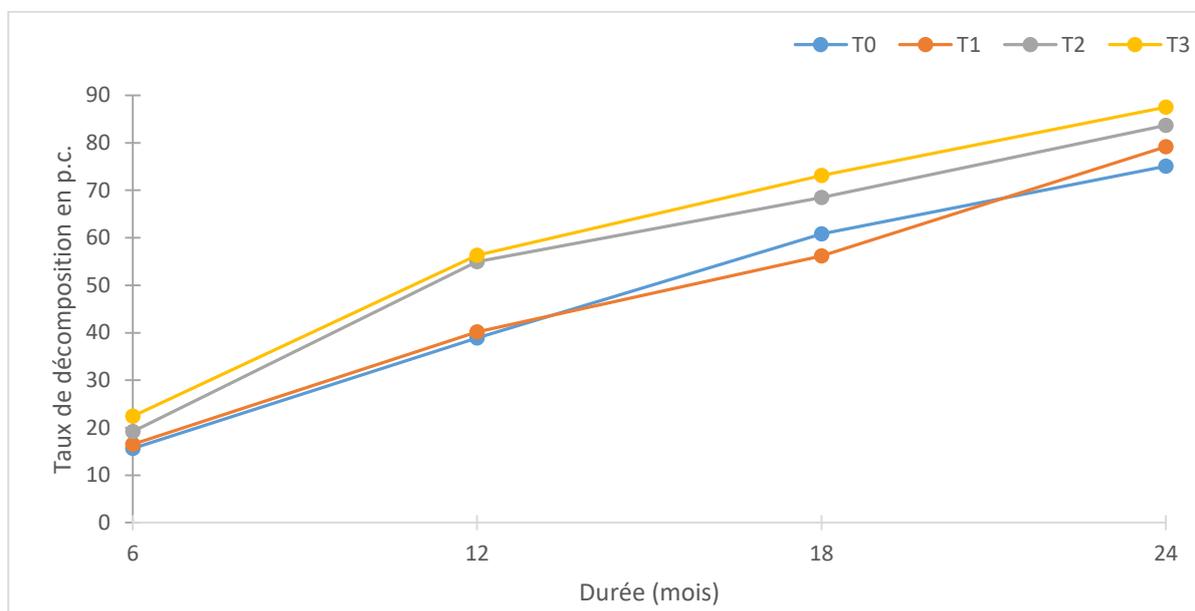


Figure 36 : Courbes d'évolution du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers durant 24 mois dans le Lôh-Djiboua.

3.1.8. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers

3.1.8.1. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa

Le tableau XV montrant les résultats du taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyer dans la Nawa fait ressortir des différences significatives entre les périodes de collectes de données sur les sites.

Ainsi, à Soubré, les différences significativement ($p < 5\%$) entre les périodes de collectes de données se sont produites dans tous les traitements. Pour T0, la période 3 a constitué la période optimale de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers. Par contre, pour T1, T2 et T3 les périodes optimales ont été déterminées à la période 2.

De même dans la localité de Méagui, des différences significatives ($p < 5\%$) sont apparues entre les périodes de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers pour tous les traitements. Pour T0 et T1, les périodes optimales ont été relevées au cours des périodes 1 et 2, alors que pour les traitements T2 et T3, elles ont été déterminées sur la période 1.

Egalement, à Mayo, des différences significatives ($p < 5\%$) des taux de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers sont relevées entre les différentes périodes de prises de données pour tous les traitements. Ainsi, pour T0, la période 3 a constitué la période optimale de décomposition des litières de feuilles de cacaoyers pendant que, pour T1, elle est relevée au cours de la période 1. Pour les deux autres traitements, les périodes optimales ont été déterminées à la période 2.

3.1.8.2. Période optimale de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua

Le tableau XVI montre qu'à Divo, le taux de décomposition a varié statistiquement entre les périodes seulement pour les traitements T0 ($p = 0,0433$) et T3 ($p = 0,0302$). Les périodes optimales ont été déterminées, dans cet ordre, à la période 3 et aux périodes 2 et 3.

Par contre, à Lakota les variations du taux de décomposition observées entre les périodes sont significatives ($p < 5\%$) pour tous les traitements. En effet, les taux les plus élevés pour T0 et T2 et T3 ont été relevés au cours de la période 2, tandis que celui du traitement T1 est relevé à la période 4.

Par ailleurs, à Guitry le taux de décomposition a varié significativement entre les périodes seulement pour les traitements T1 ($p = 0,0417$) et T2 ($p = 0,0402$). Pour T1, la période optimale de décomposition de la litière de feuilles de cacaoyers est déterminée à la période 1, alors que pour le traitement T2, elle est relevée à la période 2.

Tableau XV : Taux de décomposition (en %) des litières de feuilles de cacaoyers dans la Nawa en fonction des séquences périodiques

Localité	Traitement	Période 1 (0-6 mois)	Période 2 (6-12 mois)	Période 3 (12-18 mois)	Période 4 (18-24 mois)	Moyenne	CV (%)	p-value
Soubré	T0	10,4 ± 1,1 b	17,4 ± 1,2 ab	38,1 ± 2,1 a	21,6 ± 1,2 ab	21,9	33,7	0,031
	T1	10,9 ± 0,9 b	45,1 ± 3,2 a	16,6 ± 1,7 ab	21 ± 2,5 ab	23,4	27,2	0,0264
	T2	24,6 ± 2,4 ab	32,8 ± 3,1 a	25 ± 2,3 ab	10,8 ± 1,2 b	23,3	29,7	0,0152
	T3	23,4 ± 0,8 ab	36,5 ± 3,1 a	24,9 ± 3,0ab	9,5 ± 1,5 b	23,6	30,15	0,0401
Méagui	T0	46 ± 4,2 a	33,7 ± 2,6 a	1,6 ± 0,5 c	13,6 ± 1,3 b	23,7	25,8	0,0401
	T1	49,4 ± 6,2 a	37,2 ± 2,6 a	2,2 ± 1,0 b	8,4 ± 1,2 b	24,3	20,4	0,0304
	T2	55,4 ± 4,7 a	17,2 ± 1,2 ab	15,2 ± 1,2 ab	6,8 ± 0,8 b	23,7	18,34	0,0212
	T3	54,4 ± 4,9 a	26,2 ± 5,4 ab	9,3 ± 1,3 b	6,8 ± 1,2 b	24,2	21,1	0,0113
Mayo	T0	10 ± 2,1 b	14,7 ± 3,1 b	35,3 ± 3,2 a	24,8 ± 2,8 ab	21,2	34,53	0,021
	T1	38,8 ± 3,1 a	19 ± 2,1 ab	15,8 ± 1,7 ab	10,9 ± 1,3 ab	21,1	25,45	0,0105
	T2	13,3 ± 1,2 b	43,9 ± 3,1 a	10,7 ± 1,2 b	21,4 ± 1,4 ab	22,3	30,2	0,0201
	T3	25,7 ± 1,4 ab	33,2 ± 2,1 a	14 ± 1,4 b	12,5 ± 1,3 b	21,4	27,15	0,0218

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Tableau XVI : Taux de décomposition (en %) des litières de feuilles de cacaoyers dans le Lôh-Djiboua en fonction des séquences périodiques

Localité	Traitement	Période 1 (0-6 mois)	Période 2 (6-12 mois)	Période 3 (12-18 mois)	Période 4 (18-24 mois)	Moyenne	CV (%)	p-value
Divo	T0	20,2 ± 2,1 b	15,6 ± 1,7 b	19,7 ± 1,5 b	30,7 ± 3,1 a	21,6	30,53	0,0433
	T1	11,8 ± 1,2 a	17,5 ± 1,1 a	20,6 ± 5,1 a	10,2 ± 0,4 a	15,0	28,1	0,1805
	T2	25,8 ± 3,1 a	18,5 ± 1,1a	19,9 ± 1,2 a	18,5 ± 1,1 a	20,7	25,94	0,1013
	T3	27,1 ± 2,1 a	35,7 ± 4,1a	9,6 ± 1,1 b	13 ± 1,8 b	21,4	29	0,0302
Lakota	T0	12,3 ± 1,2 b	35,8 ± 3,1 a	10,7 ± 1,0 b	14,9 ± 2,1 b	18,4	35,85	0,0342
	T1	15 ± 2,0 ab	27,6 ± 7,1 ab	3,7 ± 1,0 b	39,5 ± 5,1a	21,5	30,27	0,0102
	T2	16 ± 2,0 b	45,1 ± 5,2 a	9,2 ± 1,2 b	9,9 ± 1,1 b	20,1	28,81	0,01
	T3	15,8 ± 2,1 b	47,7 ± 5,0 a	9,9 ± 1,7b	12,1 ± 1,2 b	21,4	31,87	0,021
Guitry	T0	24,4 ± 2,8 a	18,3 ± 1,4 a	25,4 ± 3,1 a	21,3 ± 2,1a	22,4	20,42	0,2004
	T1	32,6 ± 3,0a	16,2 ± 1,2 b	23,8 ± 3,2 ab	19,1 ± 2,0 b	22,9	15,56	0,0417
	T2	25,7 ± 3,1 ab	34,1 ± 2,1 a	11,3 ± 1,2 b	21,3 ± 1,7 ab	23,1	17,02	0,0402
	T3	24,3 ± 3,2 a	28,4 ± 3,2 a	20,8 ± 2,1 a	18,1 ± 1,6 a	22,9	20,06	0,3153

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.9. Effet de la fumure minérale sur le stock de carbone du sol

3.1.9.1. Stock de carbone des sols en fonction des traitements dans la Nawa

Les résultats du stock de carbone consignés dans le tableau XVII révèle qu'il n'y pas de différence significative entre les traitements, quel que soit la strate sur les sites de Soubré, Méagui et Mayo. Toutefois, il ressort, globalement, que dans la Nawa, T1 et T3 ont stocké plus de carbone dans le sol.

Tableau XVII : Stock de carbone en gC.m⁻² en fonction des traitements dans la Nawa

Strates	Sites	T0	T1	T2	T3	Moyenne	CV (%)	p-value
Strate 1 (0-10 cm)	Soubré	2523,3±135,2 a	4472,4±220,3 a	1892,7±125 a	4131,2±310,1 a	3254,9	35,13	0,2121
	Méagui	2269,5±204 a	3369,5±587,2 a	2063,5±315,1 a	2886,3±255,4 a	2647,2	50,25	0,7611
	Mayo	2424,3±184,8 a	3207,4±267,1 a	2047,2±208,3 a	2140,2±187,3 a	2455,2	25,11	0,3521
Strate 4 (10-30 cm)	Soubré	1116,8±120,5 a	1708,8±174,1 a	1730,1±105,2 a	1920,7±154,1 a	1619,1	28,91	0,5421
	Méagui	2138,3±203,2 a	1699,2±126,7 a	1157,5±112,1 a	1720,4±127,6 a	1678,8	31,15	0,0972
	Mayo	1666,6±145,4 a	2094,6±157,3 a	2139±410 a	1443,8±98,7 a	1836	30,72	0,1103
Strate 5 (0-30 cm)	Soubré	3640,1±310,1 a	6181,2±442,3 a	3622,8±430 a	6051,9±610,4 a	4874,0	33,55	0,3343
	Méagui	4407,8±422,4a	5068,7±375,1a	3221±189,5 a	4606,7±564,2a	4326,05	22,34	0,2922
	Mayo	4090,9±573 a	5302±262 a	4186,2±201,7a	3584±870,2a	4290,8	13,30	0,1443

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

3.1.9.2. Stock de carbone des sols en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua

Le tableau XVIII montre le stock de carbone des sols pour les traitements dans le Lôh-Djiboua. Le stock de carbone est demeuré statistiquement identique pour toutes les strates dans toutes les localités. Cependant, des tendances se dégagent sur chaque site. Ainsi, à Lakota, T2 et T3 ont stocké plus de carbone dans les trois strates. A Divo, cette observation est faite dans T3. A Guitry, quel que soit la strate, T0 a stocké plus de carbone dans le sol.

Tableau XVIII : Stocks de carbone en gC.m⁻² en fonction des traitements dans le Lôh-Djiboua

Strates	Sites	T0	T1	T2	T3	Moyenne	CV (%)	p-value
Strate 1 (0-10 cm)	Divo	2358±215,2 a	3220±410,6 a	3310±274,1 a	3610±183,5 a	3124,5	30,05	0,3172
	Lakota	3479,9±403 a	4020±551,1 a	4161±332,8 a	4382±241,6 a	4010,7	25,20	0,2280
	Guitry	3313,9±258,3 a	3207,4±436,2 a	2936±231 a	2640,7±274,1 a	3024,5	35,28	0,5029
Strate 4 (10-30 cm)	Divo	1452,7±129,1 a	1781,5±204,6 a	1402,4±187,3 a	1873,5±196,1 a	1627,5	34,07	0,5216
	Lakota	2325,3±305,2 a	2305,3±435,1 a	2681,1±245,7 a	2645,8±174,2 a	2489,3	27,45	0,6458
	Guitry	1217,3±120,5 a	1008±87,3 a	991,1±77,5 a	1008,5±101,2 a	1056,2	31,38	0,3991
Strate 5 (0-30 cm)	Divo	3810,7±480,2 a	5001,5±536,7 a	4712,4±414,5 a	5483,5±836 a	4752	30,04	0,4125
	Lakota	5805,2±545 a	6325,3±510,1 a	6842,1±542,1 a	7027,8±945,2a	6500,1	35,01	0,2101
	Guitry	4531,2±634,1a	4215,4±840 a	3927,1±751,8 a	3649,2±620,4a	3955,7	21,40	0,1254

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.9.3. Stock de carbone des sols en fonction des sites dans la Nawa

La comparaison des moyennes des stocks de carbone entre les sites par traitement dans la Nawa (tableau XIX), n'a pas fait ressortir de différence significative entre les sites pour toutes les strates. En effet, les probabilités (p) calculées ont toutes été supérieures au seuil de significativité ($\alpha = 0,05$).

3.1.9.4. Stock de carbone des sols en fonction des sites dans le Lôh-Djiboua

La comparaison des moyennes des stocks de carbone entre les sites par traitement dans le Lôh-Djiboua (tableau XX), indique qu'à part la strate 5, où des différences significatives sont apparues entre les sites pour les traitements T2 (p = 0,0472) et T3 (p = 0,0423), le stock de carbone est demeuré identique entre les sites pour tous les traitements, quel que soit la strate. Pour la strate 5, les traitements T2 et T3 ont stocké plus de carbone sur le site de Lakota que sur les deux autres sites.

Tableau XIX : Stocks de carbone en gC.m⁻² en fonction des sites dans la Nawa

Strates	Traitement	Soubré	Méagui	Mayo	Moyenne	CV (%)	p-value
Strate 1 (0-10 cm)	T0	2523,3±135,2 a	2269,5±204 a	2424,3±184,8 a	2405,7	13,75	0,7441
	T1	4472,4±220,3 a	3369,5±587,2 a	3207,4±267,1 a	3683,1	24,20	0,4523
	T2	1892,7±125 a	2063,5±315,1 a	2047,2±208,3 a	2001,1	19,31	0,1254
	T3	4131,2±310,1 a	2886,3±255,4 a	2140,2±187,3 a	3052,5	26,51	0,1316
Strate 4 (10-30 cm)	T0	1116,8±120,5	2138,3±203,2	1666,6±145,4	1640,5	20,01	0,3305
	T1	1708,8±174,1	1699,2±126,7	2094,6±157,3	1834,2	19,72	0,0921
	T2	1730,1±105,2	1157,5±112,1	2139±410	1675,5	18,63	0,1235
	T3	1920,7±154,1	1720,4±127,6	1443,8±98,7	1694,9	16,71	0,4124
Strate 5 (0-30 cm)	T0	3640,1±340,2 a	4407,8±410 a	4090,9± 475,8a	4046,	14,89	0,1437
	T1	6181,2±435,5a	5068,7±322,6 a	5302±270 a	5517,3	25,07	0,7245
	T2	3622,8±482,4 a	3221±210,5 a	4186,2±233,7 a	3676,6	21,54	0,8189
	T3	6051,9±574 a	46067±561,2 a	3584±786,1 a	4747,5	18,51	0,1433

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Tableau XX : Stocks de carbone en gC.m⁻² en fonction des sites dans le Lôh-Djiboua

Strates	Traitement	Divo	Lakota	Guitry	Moyenne	CV (%)	p-value
Strate 1 (0-10 cm)	T0	2358±215,2 a	3479,9±403 a	3313,9±258,3 a	3050,6	20,40	0,2014
	T1	3220±410,6 a	4020±551,1 a	3207,4±436,2 a	3482,4	20,35	0,1773
	T2	3310±274,1 a	4161±332,8 a	2936±231 a	3469	27,51	0,0845
	T3	3610±183,5 a	4382±241,6 a	2640,7±274,1 a	3544,2	25,09	0,0937
Strate 4 (10-30 cm)	T0	1452,7±129,1 a	2325,3±305,2 a	1217,3±120,5 a	1665,1	24,37	0,1671
	T1	1781,5±204,6 a	2305,3±435,1 a	1008±87,3 a	1698,2	25,42	0,1328
	T2	1402,4±187,3 a	2681,1±245,7 a	991,1±77,5 a	1691,53	30,17	0,0714
	T3	1873,5±196,1 a	2645,8±174,2 a	1008,5±101,2 a	1842,6	32,46	0,1011
Strate 5 (0-30 cm)	T0	3810,7±478,2 a	5805,2±540 a	4531,2±628,3 a	4549	18,90	0,1024
	T1	5001,5±520,9 a	6325,3±502,1 a	4215,4±824,3 a	5180,7	21,03	0,2582
	T2	4712,4±412,3 ab	6842,1±540,2 a	3927,1±749,1 b	5160,5	25,70	0,0472
	T3	5483,5±828,6 ab	7027,8±942,1 a	3649,1±625,7 b	5386,8	30,23	0,0423

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

3.1.10. Relation entre les traitements et les groupes taxonomiques

3.1.10.1. Cas de la région de la Nawa

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée à partir des taxa récoltés dans la région de la Nawa (Figure 37), montre que les axes 1 et 2 expliquent respectivement 79,86 et 17,52 % de la variance totale entre les groupes d'organismes ; soit une inertie de 97,38 %. Sur la base de la corrélation entre les axes et les variables, il apparaît que l'axe 1 est corrélé aux insectes sociaux terrioles ($r = 0,939$), vers de terre ($r = 0,967$), Diplopodes ($r = 0,925$), Chilopodes ($r = 0,752$) et autres organismes ($r = 0,869$).

La répartition des traitements dans le plan factoriel F1 et F2 montre trois groupes : T1 et T3 affichant les densités les plus élevées de la faune, T0 les plus faibles et T2 des valeurs intermédiaires.

Par ailleurs, l'analyse factorielle des correspondances (AFC) réalisée dans le plan factoriel F1 et F2 (Figure 38), indique que 98,99 % des informations sont portées par les axes 1 et 2 à hauteur de 84,29 % et 14,69 %, respectivement. Au regard de cette AFC, une séparation significative est constatée entre le traitement T3 et les autres T0, T1 et T2 ($p < 0,023$). Le traitement T3 se distingue des autres à travers les vers de terre et les diplopodes.

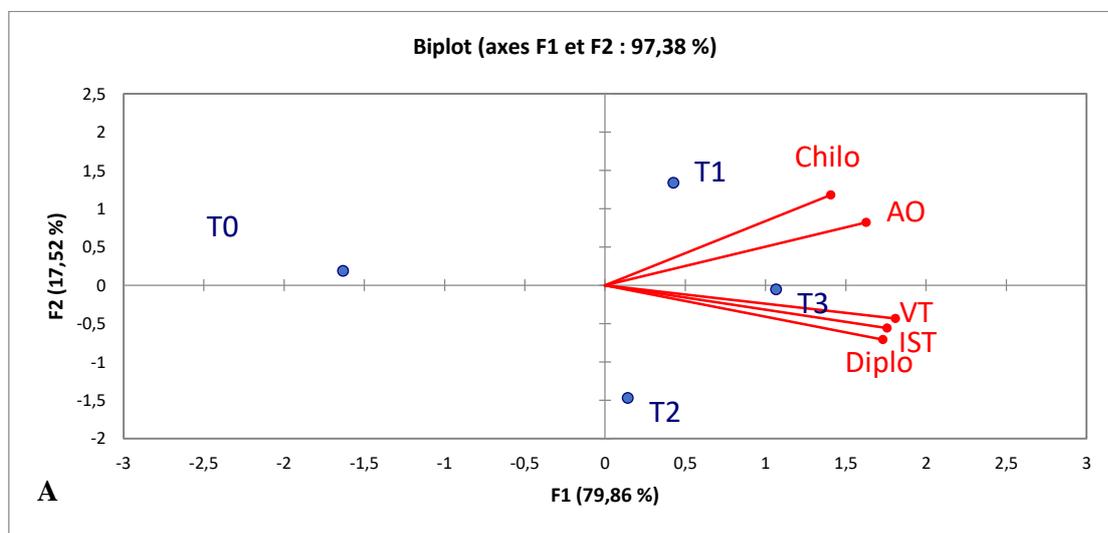


Figure 37 : ACP réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa

Chilo = chilopodes, Diplo = Diplopodes, IST = Insectes sociaux terrioles, VT = vers de terre, AO = autres organismes

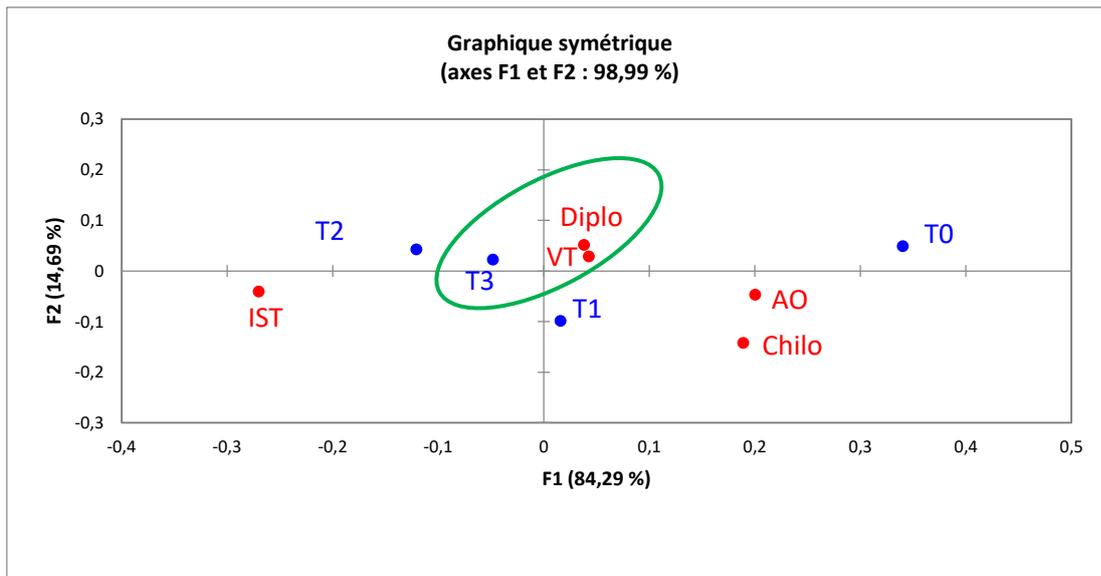


Figure 38 : AFC réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa

Chilo = chilopodes, Diplo = Diplopoles, IST = Insectes sociaux terricoles, VT = vers de terre, AO = autres organismes

3.1.10.2. Cas de la région du Lôh-Djiboua

Les résultats de l'ACP réalisée sur les groupes de taxons identifiés dans la région du Lôh-Djiboua (Figure 39), montrent que l'essentiel des informations est porté par les axes 1 et 2 avec, respectivement, 57,86 et 24,78 % ; soit 82,64 % de l'inertie totale. L'axe 1 est corrélé aux vers de terre ($r = 0,851$), diplopoles ($r = 0,766$), chilopodes ($r = 0,930$) et insectes sociaux terricoles ($r = 0,700$). Par contre, l'axe 2 est corrélé aux autres organismes ($r = 0,861$).

La projection des traitements dans le plan factoriel F1 et F2 fait observer également ici, trois groupes : T2 et T3 qui se distinguent par les densités les plus élevées, T0 les plus faibles et T1 des valeurs intermédiaires.

Les résultats de l'AFC (Figure 40), révèlent que les axes 1 et 2 portent, dans cet ordre, 60,23 et 35,65 % des informations ; soit 95,87 % de l'inertie totale. La projection dans le plan factoriel F1 et F2 indiquent une séparation significative ($p < 0,0001$) entre le traitement T1 qui se distingue par les vers de terre et les autres organismes, le traitement T2 auquel est affilié les insectes sociaux terricoles, le traitement T3 caractérisé par les chilopodes et les diplopoles et le traitement T0 auquel n'est associé aucun taxon.

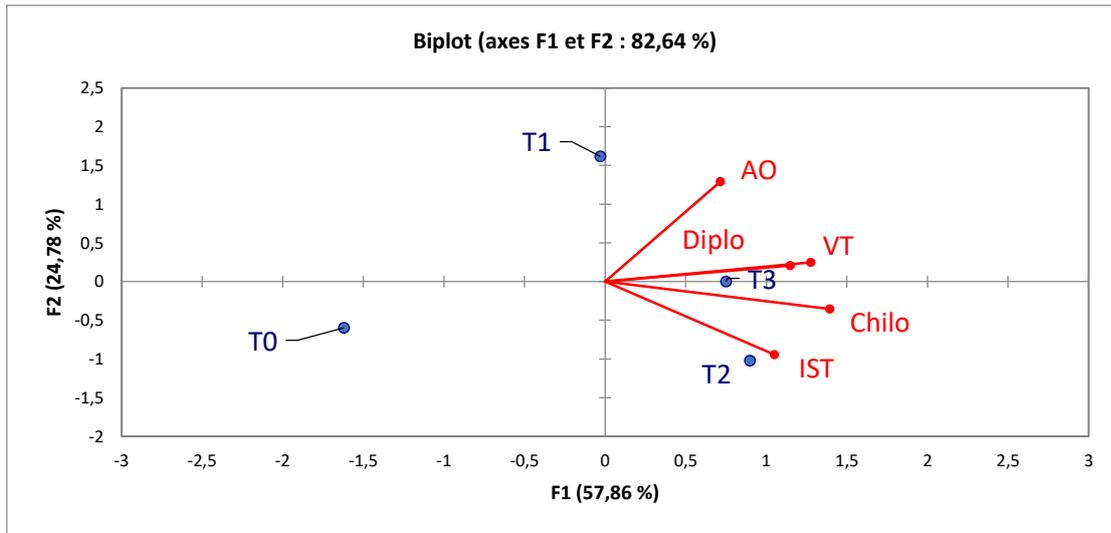


Figure 39 : ACP réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.

Chilo = chilopodes, Diplo = Diplopedes, IST = Insectes sociaux terricoles, VT = vers de terre, AO = autres organismes

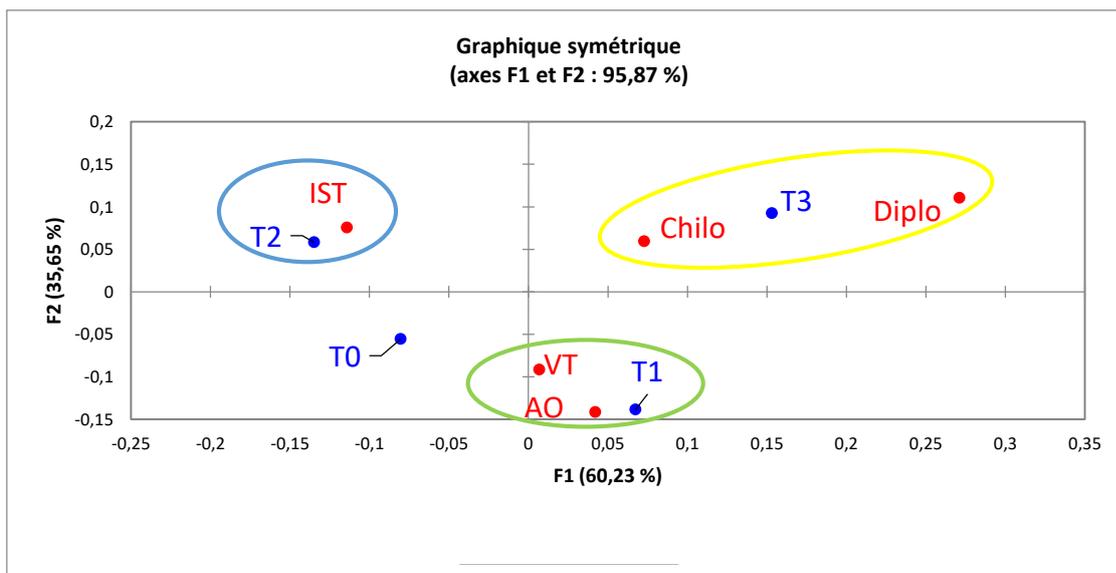


Figure 40 : AFC réalisée à partir des traitements et des groupes taxonomiques dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.

Chilo = chilopodes, Diplo = Diplopedes, IST = Insectes sociaux terricoles, VT = vers de terre, AO = autres organismes

3.1.11. Relations entre traitements, décomposition de litière, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol

3.1.11.1. Relations entre traitements, activité biologique, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol dans la Nawa

En portant à elles seules 96,89 % des inerties, les axes F1 (77,19 %) et F2 (19,70 %) de l'Analyse en Composante Principale (Figure 41), sont assez représentatifs des informations relatives aux variables de l'étude. L'analyse de ces informations peut donc se faire aisément autour des corrélations significatives mises en évidence par ces axes. A cet effet, l'axe F1 est corrélé à la densité de la macrofaune ($r = 0,934$), à la richesse spécifique ($r = 0,946$), à l'indice de Shannon ($r = 0,878$) et à la vitesse de décomposition ($r = 0,887$). Quant à l'axe F2, il est corrélé au stock de carbone du sol ($r = 0,784$).

La projection dans le plan factoriel F1 et F2 des traitements montre que T1 et T3 sont caractérisés par les valeurs les plus élevées de la vitesse de décomposition des litières de cacaoyers, du stock de carbone du sol, de la densité de la macrofaune, de la richesse spécifique et de l'indice de Shannon. Quant à T0 et T2, ils se distinguent, respectivement, par les valeurs plus faibles et les valeurs intermédiaires.

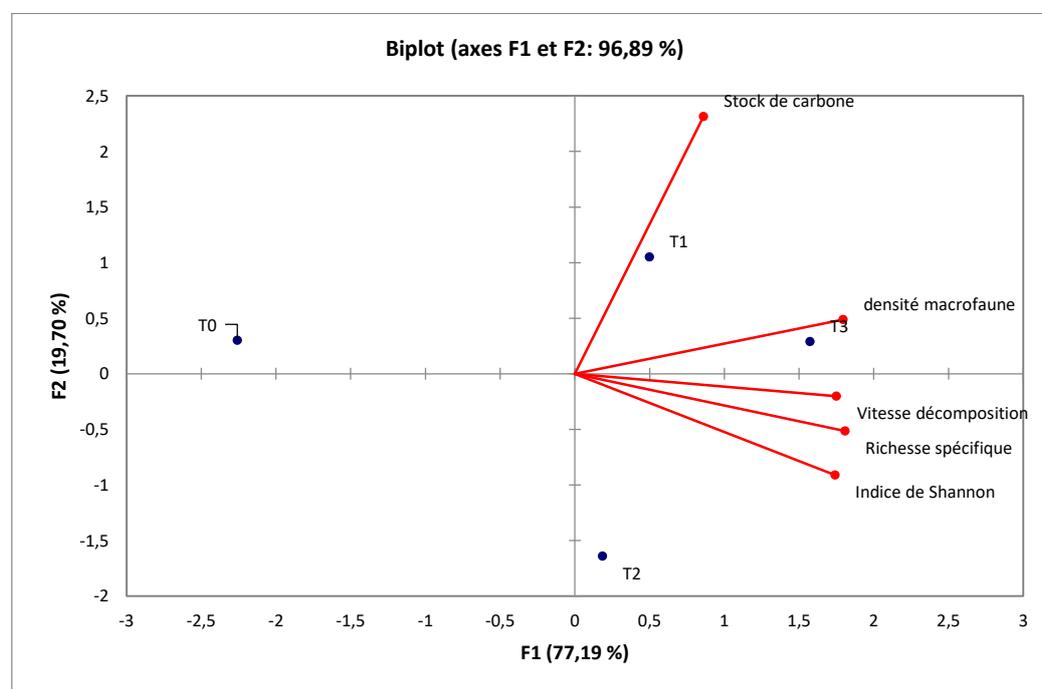


Figure 41 : ACP réalisée à partir des traitements, des variables caractéristiques de la macrofaune, de l'activité biologique et du stock de carbone du sol dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région de la Nawa.

3.1.11.2. Relations entre traitements, décomposition de litière, variables caractéristiques de la macrofaune et stock de carbone du sol dans le Lôh-Djiboua

L'ACP réalisée à partir des traitements et des variables caractéristiques, de l'activité biologique et du stock de carbone (Figure 42), montre que l'essentiel des informations est porté par les axes F1 (73,71 %) et F2 (21,22 %) ; soit une inertie de 94,93 %. L'axe F1 est corrélé à la densité de la macrofaune, à la richesse spécifique, à l'indice de Shannon et au stock de carbone du sol avec, respectivement, $r = 0,897$; $r = 0,878$; $r = 0,967$ et $r = 0,9159$. L'axe F2 est lui corrélé à la vitesse de décomposition ($r = 0,970$).

Par ailleurs, la projection des traitements dans le plan factoriel F1 et F2 indique que T2 et T3 sont tributaires des valeurs les plus élevées de la vitesse de décomposition des litières de cacaoyers, du stock de carbone du sol, de la densité de la macrofaune, de la richesse spécifique et de l'indice de Shannon. T0 est lui caractérisé par les plus faibles valeurs. T1 se distingue par les valeurs intermédiaires.

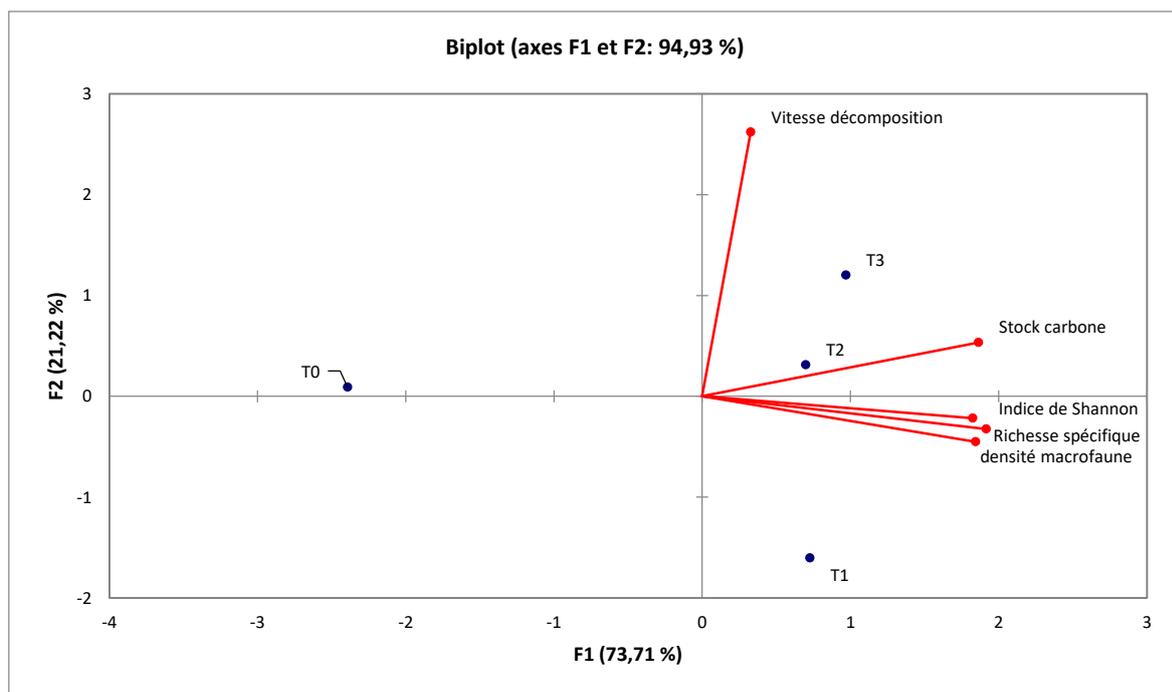


Figure 42 : ACP réalisée à partir des traitements, des variables caractéristiques de la macrofaune, de l'activité biologique et du stock de carbone du sol dans le plan factoriel F1 et F2 pour la région du Lôh-Djiboua.

3.1.12. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol

3.1.12.1. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans la Nawa

Le test de corrélation de Spearman (Tableau XXI) a révélé une corrélation positive ($r = 0,60737$), significative ($p = 0,0362$) entre la vitesse de décomposition de litière de feuilles de cacaoyers et la proportion de sable. Par ailleurs, avec le ratio C/N, la CEC et le pourcentage de limon, la vitesse de décomposition de litière de feuilles de cacaoyers est corrélée négativement.

La densité de la macrofaune quant à elle est significativement corrélée à la matière organique ($r = 0,72640$), au carbone organique du sol ($r = 0,72655$), à la teneur en azote ($r = 0,72811$), à la teneur en calcium ($r = 0,61433$), à la teneur en magnésium ($r = 0,71917$) et à la saturation en bases du complexe absorbant ($r = 0,66470$).

S'agissant de la richesse spécifique, elle est significativement corrélée ($p = 0,0327$) à la teneur en azote du sol.

3.1.12.2. Relations entre décomposition de litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans le Lôh-Djiboua

Dans le Lôh-Djiboua, le test de corrélation de Spearman (Tableau XXII) fait observer des corrélations positives et significatives d'une part, entre la vitesse de décomposition de litière de feuilles de cacaoyers et la densité de macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon et d'autre part entre la vitesse de décomposition et la teneur en sable ($r = 0,63994$). Comme dans la Nawa, ici, la corrélation a été significative ($p = 0,0095$) et négative entre la vitesse de décomposition et la teneur en limon ($r = -0,71123$).

Concernant la relation entre les variables caractéristiques de la faune du sol et les caractéristiques physico-chimiques du sol, des corrélations positives et significatives ont été déterminées entre la densité de macrofaune et les teneurs en matière organique du sol, en carbone organique du sol, en azote du sol, en calcium, en magnésium et en limon. Par contre, la corrélation significative relevée entre la densité de la macrofaune et la teneur en sable est négative ($r = -0,61126$). Egalement, entre la richesse spécifique et la teneur en matière organique du sol, la teneur en carbone organique du sol, la teneur en azote total du sol, la teneur en calcium, la teneur en magnésium et la teneur en limon, des corrélations positives et significatives ont été révélées. A l'image de la densité de macrofaune, la richesse spécifique est négativement corrélée à la teneur en sable ($r = -0,61346$). Concernant, la relation entre l'indice

de Shannon et les variables physico chimiques, des corrélations significatives et positives ont été déterminées entre cet indice et la teneur en azote total du sol et la teneur en magnésium du sol. Pour cet indice, la corrélation avec la teneur en limon est apparue significative ($p = 0,0028$) et négative ($r = -0,77915$).

Tableau XXI : Résultat de la corrélation de Spearman entre vitesse de décomposition de la litière et variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans la Nawa

		Dm	Rs	IS	MOS	COS	Ntotal	Ca²⁺	Mg²⁺	V	CEC	Sable	Limon
Vd	r	-0,2266	-0,0125	-0,0881	-0,2503	-0,2506	-0,1543	-0,2227	-0,3636	-0,1412	-0,5839	0,6073	-0,6551
	p-value	0,4787	0,9692	0,7853	0,4326	0,4320	0,6320	0,4865	0,2453	0,6615	0,0462	0,0362	0,0207
Dm	r				0,7264	0,7265	0,7281	0,6143	0,7191	0,6647	0,0639	-0,4296	0,2673
	p-value				0,0075	0,0074	0,0073	0,0336	0,0084	0,0184	0,8435	0,1633	0,4009
Rs	r				0,4821	0,4821	0,6167	0,5554	0,4033	0,4825	-0,0975	-0,1287	-0,0463
	p-value				0,1124	0,1124	0,0327	0,0608	0,1936	0,1121	0,7629	0,6900	0,8862
IS	r				0,4359	0,4361	0,5172	0,4715	0,3946	0,4329	-0,0787	-0,1565	0,0346
	p-value				0,1566	0,1564	0,0850	0,1217	0,2043	0,1598	0,8078	0,6271	0,9150

Vd = vitesse de décomposition, Dm = densité de macrofaune, Rs = Richesse spécifique, IS = indice de Shannon, MOS = matière organique du sol, COS = Carbone organique du sol, Ntotal = Azote total, V = Saturation en bases échangeables, CEC = Capacité d'échange cationique, r = Coefficient de corrélation.

Tableau XXII: Résultat de la corrélation de Spearman entre vitesse de décomposition de la litière, variables caractéristiques de la macrofaune et variables physico-chimiques du sol dans le Lôh-Djiboua

		Dm	Rs	IS	MOS	COS	Ntotal	Caech	Mgech	sable	Limon
Vd	r	-0,7690	-0,7450	0,8639	-0,5031	-0,4993	-0,5231	-0,3847	-0,5147	0,6399	-0,7112
	p-value	0,0035	0,0054	0,0003	0,0954	0,0983	0,0809	0,2169	0,0868	0,0250	0,0095
Dm	r				0,6390	0,6318	0,8346	0,7214	0,7904	-0,6112	0,7888
	p-value				0,0253	0,0275	0,0007	0,0081	0,0022	0,0347	0,0023
Rs	r				0,6489	0,6423	0,8259	0,7049	0,8216	-0,6134	0,7802
	p-value				0,0224	0,0243	0,0009	0,0105	0,0010	0,0339	0,0028
IS	r				-0,5654	-0,5593	-0,7502	-0,5340	-0,6810	0,5577	-0,7791
	p-value				0,0554	0,0586	0,0049	0,0737	0,0148	0,0595	0,0028

Vd = vitesse de décomposition, Dm = densité de macrofaune, Rs = Richesse spécifique, IS = indice de Shannon, MOS = matière organique du sol, COS = Carbone organique du sol, Ntotal = Azote total, r = Coefficient de corrélation,

3.1.13. Discrimination des sources et des formulations des fertilisants minéraux

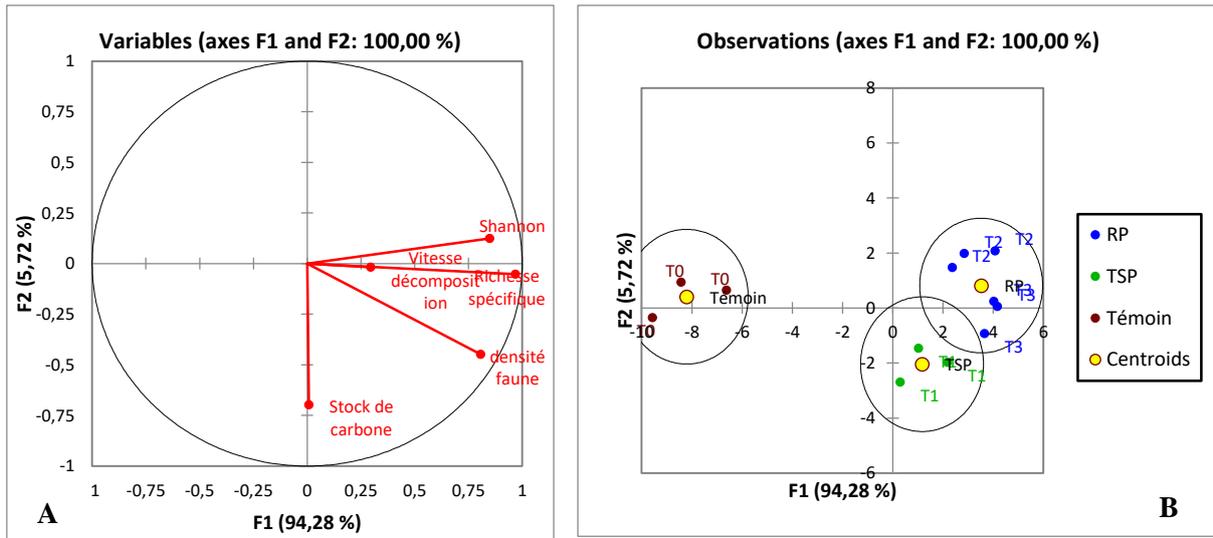
3.1.13.1. Cas de la région de la Nawa

Sur le cercle de corrélation (Figure 43 A), les variables les mieux représentées sont la densité de la macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon, du fait de leur proximité avec le cercle. Ces variables sont corrélées à l'axe F1. En revanche, le stock de carbone est lui corrélé à l'axe F2.

L'Analyse Factorielle Discriminante (Figure 43 B) montre que 94,28 et 5,72 % des informations relatives aux variables sont reliés, dans cet ordre, à l'axe F1 et F2. Suivant l'axe F1, T2 et T3 enrichis en phosphore provenant de roches phosphatées (RP) et T1 de phosphore de type Triple-super phosphate (TSP) dont leurs barycentres respectives sont 3,52 et 1,16 s'écartent de T0 de barycentre -8,20 avec $p\text{-value} = 0,001$ et une corrélation canonique égal à 0,98. T2 et T3 s'identifient par la présence d'une macrofaune plus dense et diversifiée. Suivant, l'axe F2, la discrimination entre T2, T3 représentés par RP et T1 désigné par TSP est non significative ($p\text{-value} = 0,115$). Toutefois, la corrélation canonique estimée à 0,81 déterminée suivant l'axe F2, montre un écartement de T1 désigné par TSP (-2,04) du couple T2, T3 représentés par RP (0,81). Les plus fortes valeurs du stock de carbone sont exprimées dans T1.

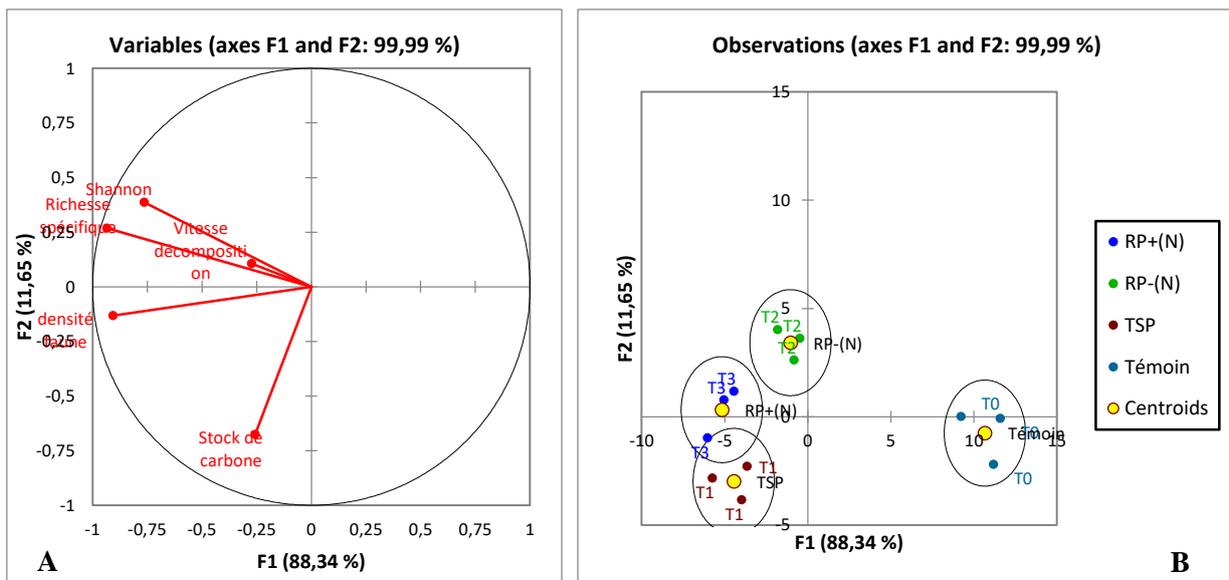
En intégrant la formulation de l'engrais minéral comme un paramètre de discrimination (Figure 44 A), les variables caractéristiques de la faune du sol apparaissent bien représentées sur le cercle de corrélation. Ces variables sont corrélées à l'axe F1, tandis que le stock de carbone du sol est lui corrélé à l'axe F2.

Au niveau de l'AFD (Figure 44 B), l'inertie totale est répartie comme suite : 88,34 % sur l'axe F1 et 11,66 % sur l'axe F2. L'analyse des résultats suivant l'axe F1 montre une discrimination significative entre T2 désigné par RP-N, T3 symbolisé par RP+N, T1 représenté par TSP et T0 ($p\text{-value} = 0,001$). Les trois premiers traitements sont caractérisés par une densité et diversité de la macrofaune plus importante que dans T0 qui s'identifie par une macrofaune moins dense et peu diversifiée. Malgré que la discrimination entre les traitements suivant l'axe F2 soit non significative ($p\text{-value} = 0,0634$), T1 (-0,94) semble s'écarter de T2 (3,80) et T3 (0,23). Les stocks les plus élevés en carbone du sol se rencontrent dans T1.



T2 + T3 = RP, T1= TSP et T0 =Témoin

Figure 43 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol (A) et AFD des sources des fertilisants minéraux (B) dans la région de la Nawa.



T1 = TSP (Triple super phosphate), T2 = RP-(N) (Roche phosphatée sans azote), T3 = RP+(N) (Roche phosphatée avec azote) et T0 = Témoin

Figure 44 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol (A) et AFD des formulations des fertilisants minéraux (B) dans la région de la Nawa

3.1.13.2. Cas de la région du Lôh-Djiboua

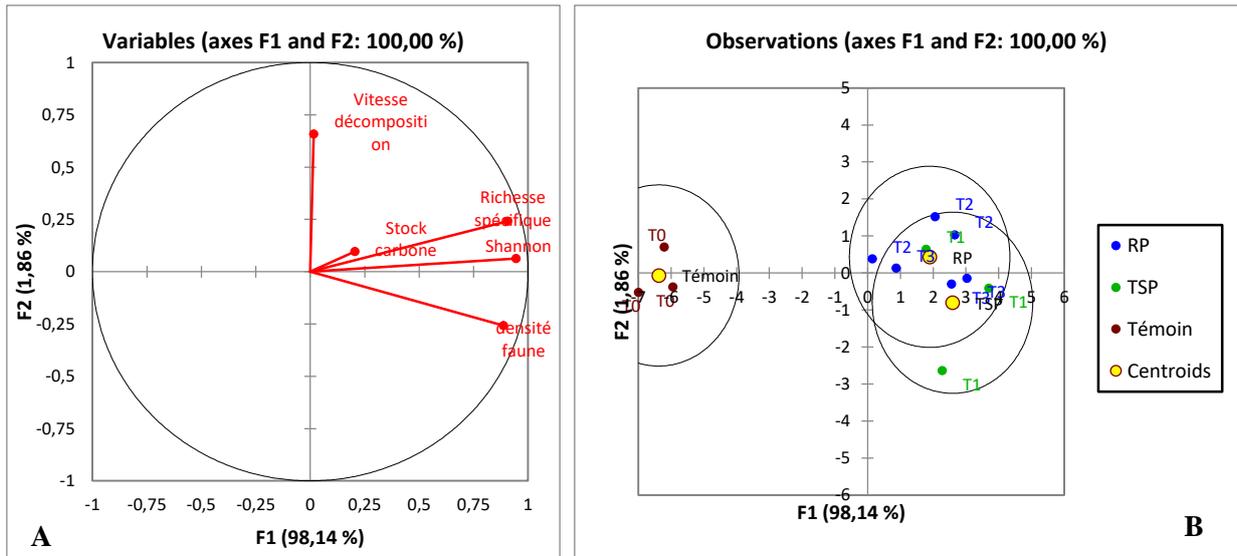
Les variables les mieux représentées sur cercle de corrélation (Figure 45 A) sont les mêmes que celles identifiées dans le cas de la région de la Nawa, à savoir : la densité de la macrofaune, la

richesse spécifique et l'indice de Shannon. Ces variables sont corrélées à l'axe F1. Par contre, la vitesse de décomposition est exprimée par l'axe F2.

Ici également, l'AFD (Figure 45 B) indique que l'axe F1 et l'axe F2 expliquent respectivement 98,14 et 1,86 % de l'écartement entre les barycentres dans l'espace initial; soit ils expliquent 100 % de l'écartement. Le pouvoir discriminatoire relatif de l'axe F1 suffit largement ici pour l'analyse des résultats. Avec $p\text{-value} = 0,012$, les moyennes (barycentres) conditionnelles s'écartent l'une de l'autre sur cet axe. Ainsi, la corrélation canonique suivant l'axe F1 valant 0,974, montre que les groupes RP (T2 et T3) et TSP (T1) avec pour barycentres respectives 1,89 ; 2,59 se discriminent de T0 dont le barycentre est -6,37 sur l'axe F1. Les valeurs les plus élevées de la densité de la macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon se rencontrent dans RP (T2 et T3) et TSP (T1).

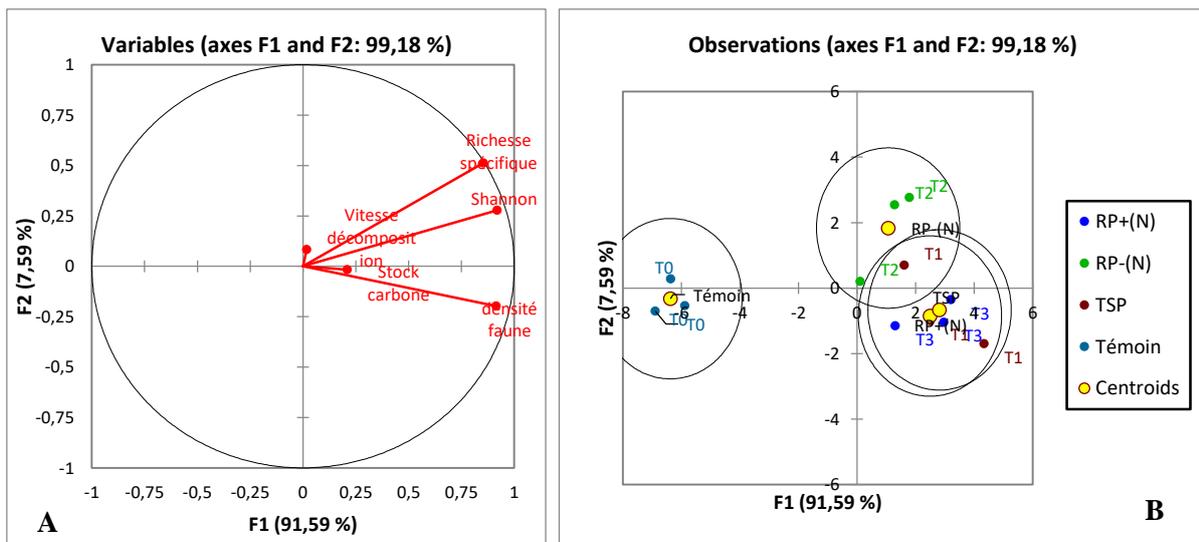
En considérant la formulation de l'engrais minéral comme un paramètre de discrimination (Figure 46 A), la densité de la macrofaune, la richesse spécifique et l'indice de Shannon apparaissent toujours bien représentés sur le cercle de corrélation et corrélés à l'axe F1.

L'AFD (Figure 46 B) montre que 91,59 % des informations sont reliées à l'axe F1 et 7,59 % sont portées par l'axe F2. D'où la considération de l'axe F1 seul pour l'analyse des résultats. Ainsi, suivant l'axe F1 les barycentres s'écartent des uns des autres avec $p\text{-value} = 0,014$. Avec 0,977 la corrélation canonique suivant l'axe F1 indique que T1 (TSP), T2 (RP-N) et T3 (RP+N) dont les barycentres sont, respectivement, 2,82 ; 2,49 et 1,06 s'écartent de T0 avec pour barycentre -6,37. Les trois premiers traitements sont caractérisés par de fortes densités de la macrofaune et des valeurs élevées de la richesse spécifique et de l'indice de Shannon.



T2 + T3 = RP, T1= TSP et T0 =Témoin

Figure 45 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol (A) et AFD des sources des fertilisants minéraux (B) dans la région du Lôh-Djiboua.



T1 = TSP (Triple super phosphate), T2 = RP-(N) (Roche phosphatée sans azote), T3 = RP+(N) (Roche phosphatée avec azote) et T0 = Témoin

Figure 46 : Cercle de corrélation des variables caractéristiques de l'activité biologique et du stock de carbone du sol (A) et AFD des formulations des fertilisants minéraux (B) dans la région du Lôh-Djiboua.

3.2. DISCUSSION

3.2.1. Effet de la fertilisation minérale sur la densité de la macrofaune du sol, sa diversité et son évolution à court et moyen termes

L'étude a montré que la densité et la diversité de la macrofaune des parcelles ayant reçu les fertilisants minéraux ont été supérieures, de manière significative, à celle de la macrofaune des parcelles dont les sols n'ont pas été fertilisés. Ce résultat serait lié principalement au développement de nouvelles conditions de nutrition et d'habitat favorables dans les parcelles fertilisées. En effet, les fertilisants apportés en général au sol favorisent un développement végétatif important, au regard des valeurs seuils indicatifs des variables physico-chimiques pour un bon développement des cacaoyers. Ces valeurs seuils indicatifs sont établis à 5 pour le pH, 30 g.kg⁻¹ pour la matière organique du sol, 1,26 g.kg⁻¹ pour l'azote total du sol, 11,5 g.kg⁻¹ pour le phosphore assimilable, 11 g.kg⁻¹ pour le Ca²⁺ et 2,45 g.kg⁻¹ pour le Mg²⁺ (Snoeck *et al.*, 2016 ; N'Guessan *et al.*, 2016). En plus, les parcelles fertilisées satisfont à la majeure partie des équilibres chimiques requis pour une bonne nutrition minérale de la plante. Ces équilibres chimiques sont établis à 8,9 ; 8 ; 68 et 24 respectivement pour les ratios (S+6,15)/N total, K⁺-Ca²⁺-Mg²⁺ (% de S). Cette fertilité des sols des parcelles fertilisées a conduit à une production plus élevée de litière de feuilles de cacaoyers. Cette litière constitue une quantité importante de nutriments pour la faune du sol. Lors de l'étude consacrée à la faune du sol dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers réalisée par Moço *et al.* (2010), une analyse similaire avait été faite par ces auteurs qui avaient aussi observé que la structure de la végétation était responsable du développement d'une couche de litière et constitue à cet effet, un facteur clé pour expliquer les variations observées dans les populations d'invertébrés du sol. Pour Yao *et al.* (2016), la production d'abondante litière dans les parcelles fertilisées maintient la couverture du sol. Ainsi, les sols sont protégés de l'insolation, faisant abaisser l'évaporation de l'eau du sol et maintenir l'humidité du sol. Cette situation crée de meilleures conditions d'habitat pour la faune du sol et, par conséquent, favorise la biodiversité dans les sols cultivés (Bertrand *et al.*, 2015). La prolifération de la macrofaune du sol observée dans les parcelles ayant été fertilisées peut découler aussi des bonnes conditions d'humidité qui y ont régné. Les systèmes de culture qui rendent alors la nourriture disponible en retournant systématiquement les résidus post-récolte et qui créent un pédoclimat propice au développement des animaux du sol en assurant une couverture permanente du sol favorisent la prolifération des invertébrés (Dupont *et al.*, 2009).

L'importance de la vie dans les sols dépendant en tout premier lieu de leur richesse énergétique, sans apport énergétique il ne peut y avoir de vie. La matière organique du sol et le carbone organique du sol constituent cette source énergétique de la plupart des organismes du sol à l'exception de certains protozoaires à chromatophores chlorophylliens qui sont autotrophes. Ils permettent de ce fait le maintien de l'activité biologique du sol ainsi que la productivité des écosystèmes (Chenu, 2009). Dans la présente étude, les teneurs en matière organique et en carbone organique du sol sont plus élevées dans les sols des parcelles fertilisées que dans le témoin. Ces deux éléments jouant donc des rôles majeurs dans la nutrition de la plupart des représentants de la faune du sol (Guéi & Tondoh, 2012), ont pu favoriser également les grandes diversités et densités de la macrofaune du sol observées. Cela se confirme dans les résultats par la définition de corrélations significatives et positives entre la densité de la macrofaune du sol et la matière organique et le carbone organique du sol. En outre, pour la FAO (2004), les produits et résidus provenant des cultures issues de sols fertilisés, notamment par les phosphates naturels moyennement ou fortement réactifs, ont une meilleure qualité alimentaire (teneur plus élevée en phosphore, calcium, magnésium) que les produits fournis par les plantes développées sur sols non fertilisés. Ainsi, dans le présent cas, la prolifération de la faune du sol dans les parcelles fertilisées serait liée aux litières. Les litières issues des parcelles ayant reçu les fumures riches en phosphore, calcium et magnésium seraient de bonne qualité, ce qui a favorisé la prolifération de la faune du sol dans les parcelles fertilisées.

L'acidité du sol affectant de façon négative l'abondance de certaines populations d'organismes du sol comme les diplopes (Toop *et al.*, 2005), cette tendance peut s'expliquer également par la faible acidité des sols des parcelles fertilisées (pH de 6,5 à 7,5). Dans la présente expérimentation, les fumures minérales appliquées sont des engrais composés qui fournissent au sol, en plus du phosphate soluble ou naturel, d'autres éléments nutritifs, tels que le potassium, le calcium et le magnésium. Ces éléments, notamment le calcium, jouent un rôle important dans la fixation des anions sur les sites d'échange. Il constitue un pont entre les anions et les colloïdes du sol. En occupant les sites au détriment des ions H^+ , Al^{3+} et Fe^{2+} , le Ca^{2+} contribue à baisser l'acidité des sols. Ces engrais se comportent donc comme des amendements minéraux en relevant le pH du sol. De tels environnements (sols à pH neutre), favorisent la prolifération de la plupart des organismes du sol selon Ponge (2004). En effet, un sol à pH neutre limite les phénomènes d'endosmose et crée de meilleures conditions d'habitat pour la vie de la faune du sol.

La prolifération de la faune du sol dans les parcelles fertilisées peut être liée à l'enrichissement du sol en cations comme le calcium et le magnésium, car les invertébrés du sol notamment les géophages ont une appétence pour les sols riches en sels minéraux (Bachelier, 1979). Cela est révélé dans la présente étude par des corrélations positives entre la densité de la macrofaune et le calcium, le magnésium et le taux de saturation en cations basiques.

Toutefois, la densité et la diversité de la macrofaune sont mieux exprimées dans les traitements fertilisés T3 (NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn) dans la Nawa et T3 (NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn) dans le Lôh-Djiboua que dans les autres traitements fertilisés. Les traitements T3 ont été généralement plus humides dans la Nawa (sites de Soubré et Méagui) et dans le Lôh-Djiboua (Divo). L'humidité du sol étant une condition pour la survie des organismes du sol, pourrait aussi expliquer ces fortes densités et diversités de la macrofaune du sol dans les traitements T3. En outre, selon Soussana & Lemaire (2014), l'accroissement des apports de N, P et K se traduit non seulement par une augmentation de la biomasse, mais aussi de la valeur nutritive du fourrage produit dans la grande majorité des essais. Les traitements T3 étant composés de N, P et K, ont pu donc produire des litières de valeur nutritive élevée qui ont attiré un plus grand nombre de macrofaune de diverses espèces.

S'agissant de l'évolution de la densité de la macrofaune du sol à court et moyen termes, les résultats montrent que sa plus forte variation a eu lieu dans les parcelles non fertilisées. Cela pourrait s'expliquer par la proximité des différentes parcelles. En effet, en proliférant dans les parcelles fertilisées, ces organismes du sol étudiés, par leur mouvement sur le site, ont aussi peuplé les parcelles non fertilisées. Aussi, les phénomènes d'érosion et de drainage ayant lieu sur les sites dont les trois quart sont fertilisés, l'hétérogénéité entre les milieux pourrait-elle être supprimée. Ainsi, tous les milieux pourraient produire des litières riches en éléments nutritifs et être colonisés par d'abondante faune. En plus l'expérimentation se déroulant dans des milieux ouverts, le passage d'une parcelle à une autre par les organismes à la recherche de nourriture n'est pas limité.

Cependant, il est arrivé que des parcelles non fertilisées à Divo soient envahies en 2019 et 2020 par une colonie de termites, ce qui y a entraîné une élévation de la densité de la faune dépassant quelquefois celle des parcelles fertilisées. Mais, de façon générale, la faune du sol était plus diversifiée dans les parcelles fertilisées que celles non fertilisées. Cela dénoterait de meilleures qualités de nutrition et d'habitat relevées dans les parcelles ayant reçue des engrais minéraux enrichis en bases. Dans certaines parcelles fertilisées, une baisse de la densité de la macrofaune du sol a été constatée. Cela serait dû à la migration de la faune sur tout le site, mais aussi, du

fait de la prédation, celle des chilopodes par exemple, qui était très marquée sur les parcelles concernées.

3.2.2. Effet de la fertilisation minérale sur la vitesse de la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers

Il ressort de l'étude que la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers est plus rapide dans les parcelles ayant reçu les fumures minérales. Ce constat est plus visible au cours des dix-huit premiers mois du temps de collecte des données dans la Nawa et douze premiers mois dans le Lôh-Djiboua.

La décomposition de la matière organique est dépendante de l'activité des décomposeurs qui utilisent cette matière organique comme source d'énergie (Kaba, 2017 ; Naik *et al.*, 2018). Ainsi, contrairement aux parcelles non fertilisées, la grande quantité et diversité de faune qui s'est développée sur les parcelles fertilisées dans la présente étude a conduit sur ces parcelles à la décomposition rapide de la matière organique issue de la litière de feuilles de cacaoyers. Les résultats des Analyses Factorielles de Correspondance (AFC) montrent que cette abondante faune est constituée des taxa d'insectes sociaux terricoles (termites, fourmis), diplopodes et surtout de vers de terre réputés pour leur rôle dans la fragmentation de la litière. En effet, Chapin *et al.* (2002) avaient montré que, par leur action de fragmentation de la litière, les vers de terre augmentaient la proportion de la masse de litière accessible aux attaques microbiennes de sorte que de grandes quantités de litière sont dégradées plus vite. De plus, selon Gosz *et al.* (1973) et FAO (2004) la litière produite dans les parcelles fertilisées aux engrais phosphatés est de bonne qualité, car elle est en général plus riche en phosphore, calcium, potassium et magnésium. Les présentes fertilisations portant sur des engrais phosphatés enrichis en cations basiques ont pu donc produire des litières de meilleures qualités nutritives pour les décomposeurs (vers de terre, les diplopodes et les insectes sociaux terricoles) qui les décomposent plus vite. Ce qui a pour conséquence la dégradation plus rapide de la litière produite dans les parcelles fertilisées que celle des parcelles sans engrais.

De plus, la période optimale de décomposition des litières de feuilles de cacaoyer dans les parcelles fertilisées s'observe durant les 12 premiers mois quand dans la parcelle non fertilisée, elle se révèle au-delà de cette durée.

Par ailleurs, il ressort, de cette étude, que la décomposition de la litière est plus rapide dans cet ordre T3, T2 et T1 dans les parcelles fertilisées dans les deux zones agro-écologiques. La litière se décompose donc plus vite dans les traitements T3. Cela se justifie, car les parcelles ayant été

traitées par les fertilisants T3 sont colonisées par un plus grand nombre de macrofaune aussi diversifiée, notamment, les vers de terre et les diplopodes comme le révèlent les résultats de l'AFC. En revanche, les T2 et T1 sont moins colonisés par la macrofaune du sol. Ces taxa sont réputés pour leurs actions de décomposition de la matière organique (Lavelle, 1983). Leur présence en plus grand nombre induit une décomposition plus rapide des litières de feuilles de cacaoyers dans les traitements T3.

Cependant, après un certain temps de décomposition dans un milieu fermé comme c'est le cas dans notre expérimentation, les litières pourraient acquérir une composition chimique très homogène, constituée essentiellement de composés très récalcitrants telle la lignine comme l'ont souligné Heim & Frey (2004), Berg & McLaugherty (2008) et Konan *et al.* (2021). Il en résulte un ralentissement de la vitesse de décomposition de la litière. Ce constat a été fait au 24^{ème} mois de notre expérimentation, rejoignant en cela Chapin *et al.* (2002), qui ont remarqué que la dynamique de la décomposition de litière se faisant sous l'action combinée de processus de fragmentation, d'altération chimique et de lessivage, n'est pas constante dans le temps. Mieux, Heim & Frey (2004), Berg & McLaugherty (2008) et Konan *et al.* (2021) ont même montré que, la décomposition des litières se fait généralement en deux principales phases : une phase de décomposition rapide et une deuxième phase au cours de laquelle la décomposition est relativement lente. La première phase correspond à la décomposition de composés solubles (sucres, protéines...), de la cellulose et de l'hémicellulose solubles non lignifiées et une deuxième phase caractérisée par la dégradation des tissus lignifiés qui demandent plus de temps, car plus difficiles à dégrader.

Plusieurs raisons peuvent être évoquées pour expliquer la similarité observée entre les traitements relativement à la vitesse de décomposition de la litière à Méagui et Guitry. Nous nous attarderons sur les raisons liées aux caractéristiques des sols. En effet, les sols identifiés à Méagui (*Manganiferric pseudo-gleyic plinthic arenic ferralsol*) et Guitry (*Albic arenosol*) ont de fortes teneurs en sable au niveau de l'horizon de surface (0 à 30 cm), ce qui leur confère une faible cohésion entre les particules et donc une très bonne porosité (macropores). L'eau, l'air et les organismes circulent facilement dans de tels sols, de même que les éléments nutritifs appréciés par les organismes du sol, qui sont, en conséquence, très vite lixiviés hors de la couche 0 à 30 cm. Se faisant, l'effet de la fertilisation s'atténue en un laps de temps et l'hétérogénéité entre les différents traitements disparaît. Cela pourrait justifier que la vitesse de l'activité biologique est uniforme sur le site (Barros *et al.*, 2004).

3.2.3. Effet de la fertilisation minérale sur le stock de carbone dans le sol

Le stock de carbone du sol n'a pas varié significativement d'un traitement à un autre dans les deux zones agroécologiques. Cette observation pourrait être liée à plusieurs facteurs, dont l'approche utilisée, la date d'échantillonnage et la durée de l'expérimentation.

La démarche utilisée dans cette présente étude pour déterminer le stock de carbone dans les sols est l'approche synchronique. Cette approche qui consiste à comparer, à un instant donné, le stock de C d'une parcelle correspondant à la pratique stockante menée depuis plusieurs années à celui d'une parcelle de référence (Bernoux *et al.*, 2006a, Olson *et al.*, 2014) a été faite à la troisième année de l'essai. Hors, à cette date, tous les traitements avaient produit de grande quantité de litière et étaient colonisés par d'abondante faune. Le carbone organique du sol des systèmes de culture découlant principalement de la biomasse végétale et animale (Bernoux, 2005), les stocks de carbone des sols qui en résultent des différents traitements seraient semblables.

Le temps (durée) étant un facteur très important dans l'accumulation du carbone organique dans le sol ; dans cette présente étude, le nôtre est de 3 ans. Ce pas de temps ne serait pas suffisant pour déceler des augmentations significatives du carbone stocké dans le sol, car selon Shi *et al.* (2013), le stockage du carbone organique du sol est un processus très lent ; une augmentation significative à court terme n'est donc pas évidente.

Outre ces facteurs, les engrais utilisés dans cette expérimentation peuvent être l'une des causes. En effet, selon Jones & Donnelly (2004), un apport élevé d'engrais N et P peut stimuler la minéralisation de la matière organique des sols ainsi libérer d'importantes quantités d'azote minéral pouvant être perdues par lessivage, entraîner le dégagement de CO₂ dans l'atmosphère et causer éventuellement une diminution du taux de matière organique dans le sol. Les engrais utilisés ici sont de formules NPK et ont été appliqués six fois en trois ans, soit tous les six mois. Ils pourraient stimuler la minéralisation de la matière organique et réduire le taux de carbone organique du sol.

Certes, les stocks de carbone déterminés dans les parcelles fertilisées et dans celles non fertilisées ne révélaient pas de différences significatives, mais les valeurs déterminées dans les sols des parcelles fertilisées étaient relativement supérieures à celles des sols non fertilisés, qui étaient caractérisés par une plus faible production de litière durant les deux premières années de l'étude. De façon générale, la fertilisation minérale semble stimuler le stockage de C. La restitution au sol de toute cette biomasse végétale aurait augmenté les stocks de carbone

organique du sol dans les parcelles fertilisées. Dungait *et al.* (2012), puis Poeppleau *et al.*, (2018) avaient obtenu des résultats similaires. Poeppleau *et al.*, (2018) ont montré que 1,15 kg de NPK est nécessaire pour stocker 1 kg de carbone. En outre, ce résultat est concordant avec ceux de Bernoux (2005) et de Duparque & Rigalle (2011). Pour le premier auteur, une production d'abondante litière augmente le niveau de carbone du sol, quand pour les seconds, 90 % de la matière organique du sol dans les systèmes de culture proviennent de la biomasse végétale. Par ailleurs, les teneurs en carbone organique du sol sont plus faibles dans les parcelles non fertilisées comparativement à celles des parcelles fertilisées.

Cependant, s'agissant des traitements fertilisés, ce sont T1 et T3 dans la Nawa et T2 et T3 dans le Lôh-Djiboua qui ont stocké les plus grandes quantités de carbone dans le sol. Ces résultats corroborent les travaux de Poeppleau *et al.* (2018). En effet, ces auteurs ont montré que la fertilisation minérale stimule le stockage de C, mais avec des nuances suivant la formulation de l'engrais (N, NP, PK, NPK) et sans qu'il y ait de réel consensus entre les études sur la formulation la plus efficace pour le stockage de C.

Les stocks de carbone mesurés dans la présente étude pour la strate 0-30 cm pour les traitements fertilisés sont compris entre $3221 \pm 189,5$ gC.m⁻² dans T2 et $6181,2 \pm 442,3$ gC.m⁻² dans T1 pour la Nawa et entre $3649,2 \pm 620,4$ gC.m⁻² et $7027,8 \pm 945,2$ gC.m⁻² dans T3 pour le Lôh-Djiboua. Les sols étudiés s'avèrent ainsi riches en carbone organique à l'instar de nombreux sols sous cacaoyers en condition agroforestière dans lesquels les stocks étaient de l'ordre de 4200 gC.m⁻² et 5000 gC.m⁻² (Palm *et al.*, 2000 et Montagnini & Nair, 2004). Ce résultat est la conséquence d'une production accrue et continue de biomasse végétale dans ce type de système de culture. En effet, la densité de plantation de 3 x 2,5 pour les cacaoyers permet une forte présence végétale sur la parcelle et contribue donc à une abondante production de biomasse végétale qui constituera la litière. Dans le présent cas, les apports d'engrais phosphatés ont induit davantage un effet sur la production de la litière des plantes et du rendement des cultures (FAO, 2004). La restitution au sol de toute cette biomasse a eu pour effet d'augmenter les stocks de carbone organique du sol dans les parcelles fertilisées. Jarecki & Lal (2003), avaient obtenu des résultats semblables. Par ailleurs, la couverture continue du sol par la litière qui empêche l'élévation de la température du sol, réduisant ainsi la vitesse de minéralisation de la matière organique, conduit aussi à stocker le carbone dans le sol (Arrouays *et al.*, 2002 ; Poissonnet *et al.*, 2007 ; Fissore *et al.*, 2008 ; FAO, 2012). De même, en limitant l'érosion, la couverture continue du sol réduit les pertes de carbone du sol (Scopel *et al.*, 2005). Aussi, faut-il noter la présence

d'abondante macrofaune dans le sol constatée en 3^{ème} année de l'étude et induite par la fumure minérale y constitue une réserve potentielle de carbone organique du sol à leur mort.

Par ailleurs, la nature du sol impacte le carbone stocké. Les sols riches en éléments fins (argile et limon) stockent plus de carbone organique que ceux plus riches en sable ; c'est le cas des sols de Méagui dans la Nawa et de Guitry dans le Lôh-Djiboua qui ont stocké moins de carbone organique. Ces derniers ont de fortes teneurs en sable au niveau de l'horizon de surface. De ce fait, ces sols sont caractérisés par une très bonne porosité (macropores). Le domaine des macropores facilite la circulation de l'eau et de l'air. Ceux-ci influencent la température et le pH du sol ; des conditions environnementales favorables sont créées pour une intense activité biologique dans le sol qui se caractérise par une rapide décomposition et minéralisation de la matière organique. Par contre, dans les sols riches en éléments fins, sols de Soubré, de Mayo dans la Nawa et sols de Divo et Lakota dans le Lôh-Djiboua, la circulation de l'air et de l'eau est ralentie par ces éléments fins (Chenu, 2009). La porosité est réduite à la microporosité hormis les galeries des vers de terres et de taupes. Les éléments fins empêchent les décomposeurs d'avoir accès à la matière organique ; la minéralisation est de ce faite ralentie comme la montre les résultats de la présente étude. Ainsi, sont stockées de grandes quantités de carbone dans les sols riches en éléments fins.

Ces résultats sont concordants avec les travaux de Barros *et al.* (2004). Ceux-ci ont déterminé des liens étroits entre la minéralisation de la matière organique du sol et les propriétés physiques des sols étudiés. Selon ces auteurs, la minéralisation de la matière organique du sol serait ralentie dans les sols dits lourds (texture à dominance d'éléments fins) et rapide dans les sols dits légers (texture sableuse).

*CONCLUSION,
RECOMMENDATIONS ET
PERSPECTIVES*

CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif d'identifier des fertilisants minéraux susceptibles d'enrichir les sols sous cacaoyers, d'impacter positivement l'activité biologique et le stockage de carbone du sol. Pour atteindre cet objectif, trois principaux axes dont les réponses constituent l'essentiel de ce travail, ont été dégagés.

Le premier objectif de ce travail était de déterminer l'effet de la fertilisation minérale sur l'abondance de la macrofaune du sol sous cacaoyers, sa diversité et son évolution à court et moyen termes. A cet effet, les résultats ont montré que l'application des fumures minérales a amélioré la disponibilité des éléments nutritifs indispensables au bon développement des cacaoyers, ce qui a induit une abondante production de litières de feuilles de cacaoyers créant de meilleures conditions d'habitat et d'alimentation pour la faune du sol. La macrofaune est donc apparue plus abondante dans les parcelles fertilisées avec les engrais NPK enrichis en cations basiques. En fonction de la zone agro-écologique, des tendances se dégagent. Ainsi, dans la Nawa au Sud-Ouest, la densité de la macrofaune, richesse spécifique et indice de Shannon sont apparus meilleurs avec le traitement T3 (NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.) et dans le Lôh-Djiboua au Centre-Sud, les traitements T3 (NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn) et T2 (NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn) sont apparus meilleurs dans ce sens. Par ailleurs, s'agissant de l'évolution des variables caractéristiques de la macrofaune du sol, la densité a fortement augmenté dans le traitement non fertilisé T0 dans les deux zones. En ce qui concerne la richesse spécifique et l'indice de Shannon, T1 (NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO) dans la Nawa et T1 et T3 dans le Lôh-Djiboua ont été les plus expressifs. Ceci montre que la fertilisation des sols sous cacaoyers à l'aide de fumures minérales crée des biotopes qui améliorent à court et moyen termes la densité et la diversité de la macrofaune du sol. L'hypothèse 1 selon laquelle la fumure minérale favoriserait la prolifération de la macrofaune des sols sous cacaoyers à court et moyen termes est donc vérifiée.

Le deuxième objectif a porté sur la décomposition des litières de feuilles de cacaoyers en condition de la fertilisation minérale. La présente étude a ainsi révélé que les sols fertilisés aux NPK enrichis en cations basiques ont favorisé une décomposition plus rapide des litières de feuilles de cacaoyers. Comme pour les caractéristiques de la macrofaune du sol, il faudra noter une gradation de l'effet des engrais sur la vitesse de décomposition dans chaque zone d'étude. A ce titre, T3, T1 et T2 dans la Nawa et T3, T2 et T1 dans le Lôh-Djiboua, se sont révélés, dans ces ordres, meilleurs.

Enfin, le dernier objectif consistait à étudier l'effet de la fertilisation minérale sur le stock de carbone dans les sols sous cacaoyers. A cet effet, les résultats ont montré que les sols fertilisés ne stockent pas, de manière significative, plus de carbone organique que les sols n'ayant pas reçu d'engrais. L'usage des fumures minérales en cacaoculture n'a pas augmenté le stock de carbone dans les sols sous les cacaoyers. Cependant, des tendances se dégagent en fonction de la zone d'étude : T3 et T1 dans la Nawa et T2 et T3 dans le Lôh-Djiboua ont stocké les plus grandes quantités de carbone dans les sols.

Aussi, l'étude a-t-elle montré que les différentes sources de fumures minérales ont induit les mêmes aptitudes à favoriser l'abondance et la diversité de la faune du sol. Elles ont aussi contribué similairement à stocker le carbone dans le sol. Cependant, en se rapportant aux groupes taxonomiques, des affinités ont été observées entre la source de la fumure et certains groupes. Pour finir, on retient que l'usage des fumures minérales enrichies en cations basiques en cacaoculture peut être assimilé à une pratique de gestion durable du sol. En effet, les fertilisants minéraux n'affectent pas négativement la faune du sol, mieux, ils boostent cette faune.

RECOMMANDATIONS

La fertilisation des terres agricoles est très délicate dans la mesure où les engrais minéraux ont souvent contribué à dégrader les sols en impactant négativement sur la biodiversité animale du sol. Il est donc nécessaire de formuler des engrais qui sont écologiques. Au vu des résultats de notre étude, les engrais minéraux utilisés pourraient être utilisés par les cacaoculteurs si certaines dispositions sont prises, notamment :

- entretenir manuellement les parcelles ;
- éviter l'usage des herbicides ;
- faire un diagnostic du sol pour préconiser les besoins nutritifs adéquats des plantes afin de réduire la pollution du sol ;
- apporter les doses recommandées à l'hectare en respectant les périodes d'application.

PERSPECTIVES

Il est primordial de retenir que malgré les grands enseignements qui se dégagent, l'effet des fumures minérales sur l'activité biologique et le stock de carbone dans les sols mérite d'être approfondi en vue d'une meilleure gestion de la fertilité des terres agricoles. Pour cela, les investigations devraient, non seulement, s'étendre sur les autres types d'indicateurs de l'activité

biologique du sol, surtout sur les bioindicateurs microbiologiques comme la biomasse microbienne du sol, la minéralisation du carbone et de l'azote, le pool de la matière organique et la mesure des activités enzymatiques. Par ailleurs, il est nécessaire de mener cette étude sur un long terme pour voir les éventuelles modifications qui pourraient survenir avec le temps, tout en quantifiant le carbone du sol. Aussi, est-il indéniable de connaître l'impact des fumures minérales sur la catégorie de décomposeurs que sont les vers de terre qualifiés d'ingénieur du sol.

RÉFÉRENCES

- Abdesselam R. (2021). Statistique - Analyse des données – Modélisation. Programmes d'application SAS. Université Lumière Lyon 2, Lyon, France, 82 p. <http://perso.univ-lyon2.fr/~rabdesse/fr/>. [Consulté le 31 janvier 2022].
- Abga P.T. (2013). Détermination des options de fertilisation organo-minérale et de densité de semis pour une intensification de la production du maïs dans la région de l'Est du Burkina Faso. Mémoire de Master II en Science du sol, Institut du Développement Rural (IDR), Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB), Burkina Faso. 85 p.
- Adesemoye A.O. & Kloepper J.W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Application Microbiology Biotechnology*, 85 (1): 1 - 12.
- Afrifa A.A., Ofori-Frimpong K., Appiah M.R., Acquaye S. & Snoeck D. (2006). Nitrogen, phosphorus and potassium budget under the cocoa ecosystem: produce harvesting phase. *In: Proceedings of the 15th international cocoa research conference, 9 - 14 Oct. 2006, San José (Costa Rica)*, pp 395 - 404.
- Ahenkorah Y., Akrofi G. & Adri A. (1974). The end of the first cocoa shade and manorial experiment at the Cocoa Research Institute of Ghana. *Journal of Horticultural Science*, 49: 43 - 51.
- Akanbi O.S.O., Ojeniyi S.O., Famaye A.O., Ipinmoroti R.R., Oloyede A.A., Oyewumi I.K., Ayegbonyin K., Adejobi K.B. & Idrisu M. (2014). Soil nutrients and cocoa seedling performance as influenced by plant residue ash and NPK fertilizer addition on a depleted soil in Ibadan, South Western, Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil science*, 4 (1): 1 - 4.
- Anderson J.M. & Ingram J.S.I. (1993). Tropical Soil biology and Fertility (TSBF): A handbook of Methods, second edition, CAB international, Wallingford, United Kingdom, 102 p.
- Arrouays D., Balesdent J., Jayet P.A. & Stengel P.S. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Effets des pratiques agricoles en sols cultivés, Paris, France : 124 - 130.
- Asigbaase M. (2019). Contribution of organic cocoa agroforestry to sustainable land management. PhD thesis, School of Biosciences, University of Nottingham, United Kingdom, 145 p.

- Assiri A.A., Yoro G.R., Deheuvelds O., Kébé B.I., Kelo J.Z., Adiko A. & Assa A. (2009). “Les Caractéristiques Agronomiques des Vergers de Cacaoyer (*Theobroma Cacao* L.) en Côte d’Ivoire.” *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2 (1) : 55 - 66.
- Assiri A.A. (2007). Identification des pratiques paysannes dans la conduite des vergers de cacaoyers en Côte d’Ivoire. DEA, Agropédologie, Université d’Abidjan-Cocody, Abidjan, Côte d’Ivoire, 61 p.
- Bachelier G. (1979). La faune des sols, son écologie et son action. IDT n°38 ORSTOM, Paris, France, 391 p.
- Bado V.B. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 166 p.
- Baldock J.A. & Skjemstad J.O. (2000). Role of the soil matrix and minerals in protecting natural materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31: 697 - 710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Balesdent J., Chenu C. & Balabane M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53 (3-4): 215 - 230.
- Barlog P. & Grzebisz W. (2004). Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) II. Nitrogen uptake dynamics and fertilizer efficiency. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190 (5): 314 - 323.
- Barrios E., Shepherd K. & Sinclair F. (2015) Agroecology for food security and nutrition; Proceedings of the FAO International Symposium, 18–19 September 2014, Rome, Italy, pp. 130 - 155.
- Barros E., Grimaldi M., Sarrazin M., Chauvel A., Mitja D., Desjardins T. & Lavelle P. (2004). Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon. *Applied Soil Ecology*, 26 (2): 157 - 168.
- Berg B. & McClaugherty C. (2008). Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. (3e éd.). Springer-Verlag: Berlin Heidelberg Germany, 279 p.
- Bernoux M., Feller C., Eschenbrenner V., Cerri C.C. & Cerri C.E.P. (2006). Soil carbon sequestration. In: Roose EJ, Lal R, Feller C, *et al.* (eds) *Soil Erosion and Carbon Dynamics*. CRC Publisher, Boca Raton, FLorida, USA: 13 - 22.

- Bernoux M., Cerri C.C. & Cerri C.E.P., Siqueira Neto M., Metay A., Perrin A.S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M.C., Pavei M. & Milne E. (2006). Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 26: 1 - 8.
- Bertrand M., Barot S., Blouin M., Whalen J., de Oliveira T. & Roger-Estrade J. (2015). Earthworm services for cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35: 553 - 567.
- Birmingham D.M. (2003). Local knowledge of soils: the case of contrast in Côte d'Ivoire. *Geoderma*, 111 (3-4) : 481 - 502.
- Bispo A., Jolivet C., Ranjard L., Cluzeau D., Hedde M. & Pérès G. (2017). Mise en place d'outils et bio-indicateurs pertinents de qualité des sols. Les sols et la vie souterraine : des enjeux majeurs en agroécologie, Chapitre 9, QUAE, Versailles, France, 328 p.
- Bispo A., Grand C. & Galsomies L. (2009). Le programme ADEME « Bioindicateurs de qualité des sols ». *Etude et gestion des sols*, 16 (3-4) : 145 - 158.
- Blandin P. (1986). Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. Paris, Société d'écologie, Tome 17, Paris, France, 306 p.
- Boa D. (1989). Caractérisation des propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités des sols gravillonnaires : cas de Boro-Borotou. Thèse de Doctorat-Ingénieur, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 131 p.
- Boli Z. & Roose E. (2000). Rôle de la jachère de courte durée dans la restauration de la productivité des sols dégradés par la culture continue en savane soudanienne humide du Nord- Cameroun. *In* : La jachère en Afrique tropicale. Floret Ch. et Pontanier R., eds. Paris (France):149 - 154.
- Bolton P.J. & Phillipson J. (1976). Energy equivalents of earthworms, their egesta and a mineral soil. *Pedobiologia*, 16 : 443 - 450.
- Boni D. (1978). Aspects géographiques du binôme Cacao-Café dans l'économie ivoirienne. Les Nouvelles Éditions Africaines, Abidjan, Côte d'Ivoire, 111 p.
- Bouché M.B. & Al-Addan F. (1997). Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments. *Soil Biology and Biochemistry*, 29 : 41 - 452.
- Bouillon A. & Mathot G. (1965). Quel est ce termite africain ? *Zooleo*, 1: 1-115.

- Bourgeois E. (2015). Contribution au développement de bioindicateurs microbiens pour l'évaluation de l'impact de pratiques agricoles sur les sols. Thèse de doctorat Sciences de la Vie Spécialité Ecologie Option Ecologie microbienne de l'Université de Bourgogne, Bourgogne, France, 188 p.
- Boyer J. (1972). Evolution saisonnière de la production de litière et de la décomposition des feuilles dans une cacaoyère camerounaise. Quatrième Conf. Intern. Rech. Cacaoyères, Janvier 1972, Port-d'Espagne, Trinidad, 10 p.
- Braudeau J. (1969). Le cacaoyer, Ed, G.P, Maisonneuve et Larose, 2dit. Colletion Techniques agricoles et productions tropicales. Volume 1, Bordeaux, France, 304 p.
- Brou Y. T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Habilitation à diriger des recherches, Université des sciences et technologies de Lille, Lille, France, 226 p.
- Brou Y.T., Akindès F. & Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*, 14 (6): 533 - 540.
- Brown C.D., Fryer C.J. & Walker A. (2002). "Influence of topsoil tilth and soil moisture status on losses of pesticide to drains from a heavy clay soil." *Pest Management Science*, 57 : 1127 - 1134.
- Brown G.G., Barois I. & Lavelle P. (2000). "Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphicfunctionaldomains. *European Journal of Soil Biology*, 36 (3-4) :177 - 198.
- Bunker E.D., De Clerck F., Bradford C.J., Colwell K.R., Perfecto I. Phillips L.O., Sankaran M. & Naeem S. (2005). Species Loss and Aboveground Carbon Storage in a Tropical Forest; in *Science*, 310 p.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G. & de Goede R. (2018). Soil quality a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105 - 125
- Busson S., Chabalier P.F., Cottineau J.S., DE Laburthe B., Fournier P., Leroux K., Van de Kerchove V. & Salgado P. (2012). Amendements et engrais. Guide des bonnes pratiques agricoles à la Réunion et système d'information sur l'eau du bassin Réunion, Réunion, pp 62 - 115.
- Cakmak D., Saljnikov E., Petrovic V., Jaramaz D. & Mrvic V. (2010). Effect of long-term nitrogen fertilization on main soil chemical properties in cambisol, *19th World Congress*

- of Soil Science, Soil Solution for a changing world*, 1-6 Aug. 2010 Brisbane, Australia, published on dvd, pp 291 - 293.
- Castillon P., Colomb B., Decroux J., Diab M., Fardeau J.C., Laurent F., Masse J., Plet P. & Villemin P. (1995). Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée 8, Avenue du Président Wilson, Paris, France, 37 p.
- CCC. (2017). Évolution de la filière Café-Cacao de 2012 à 2017. 4^{ème} Édition des journées Nationales du cacao et du chocolat. Du 29 septembre au 1^{er} octobre 2017, Abidjan, Côte d'Ivoire, 48 p.
- Chapin III S.F.L., Matson A.P. & Mooney A.H. (2002). Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag New York Inc., New York, USA, 423 p.
- Chen J.H. (2006). The combined use of chemical and organic fertilizers and /or biofertilizer for crop growth and soil fertility. National Chung Hsing University, Taiwan, 11 p.
- Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C. & Metay A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37 : 23 - 37.
- Chenu C., Virto I., Plante A.F. & Elsass F. (2009). Clay-size organo-mineral complexes in temperate soils: relative contributions of sorptive and physical protection. In: D.A. Laird, J. Cervini-Silva (Eds.), Carbon Stabilization by Clays. CMS workshop lectures. The Clay Minerals Society, Chantilly, VA, pp. 120-135.
- CILSS. (2016). Les paysages de l'Afrique de l'Ouest. Une fenêtre sur un monde en pleine évolution. Ouagadougou, Burkina Faso, 236 p.
- Compaoré E., Frossard E., Sinaj S., Fardeau J.C. & Morel J.L. (2003). Influence of land-use management on isotopically exchangeable phosphate in soils from Burkina Faso. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, 34 (1-2): 201 - 223.
- Costa P.M.O., de Araújo M.A.G., de Souza-Motta C.M. & Malosso E. (2017). Dynamics of leaf litter and soil respiration in a complex multistrata agroforestry system, Pernambuco, Brazil. *Environment Development and Sustainability*, 19: 1189 - 1203.
- Costa-Junior C., Corbeels M., Bernoux M. & De cassia Piccolo M. (2013). Assessing soil carbon storage rates under no-tillage: Comparing the synchronic and diachronic approaches. *Soil and tillage research*, 134: 207 - 212.

- CPCS. (1967). Commission de Pédologie et de Cartographie des sols, classification des sols : Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes des sols. Service de classification des sols. INRA, France. 96 p.
- Crane J.H., Balerdi C.F. & Joyner G. (2013). Cocoa (Chocolate Bean) Growing in the Florida Home Landscape. IFAS Extension, HS1067, University of Florida, USA, 6p.
- Crusciol C.A.C., Artigiani A.C.C.A., Arf O., Carmeis-Filho A.C.A., Soratto R.P., Nascente A.S. & Alvarez R.C.F. (2016). Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phospho-gypsum in a tropical no-till system. *Catena*, 137: 87 - 99.
- Curry J.P. (1998). Factors affecting earthworm abundance in soils. *In*: Edwards, C. A. Earthworm ecology. Boca Raton, USA: 37 - 64.
- Dabbadie L.M. (1996). Etude de la viabilité d'une pisciculture rurale à faible niveau d'intrant dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire : approche du réseau trophique. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, Paris, France, 214 p
- Dalenberg J.W. & Jager G. (1989). Priming effect of small glucose addition to ¹⁴C labelled soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 21: 443 - 448.
- Dalenberg J.W. & Jager G. (1981). Priming effect of small glucose addition to ¹⁴C labelled soil. *Soil Bioloogy & Biochemistry*, 13: 129 - 223.
- Dawoe E.K., Isaac M.E. & Quashie-Sam J. (2010). Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant Soil*, 330 :55 - 64
- De Rouw A., Huon S., Soullileuth B., Jouquet P., Pierrot A., Ribolzi O., Valentin C. & Bourdoun B. (2010). Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valeley, Laos). *Agriculture, Ecosysystems & Environment*, 136: 148 - 161.
- Decäns T., Jiménez J.J., Gioia C., Measey J. & Lavelle P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European journal of Soil Biology*, 42: 23-28.
- Deheuvelds O. (2011). Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica, Thèse de Doctorat de SupAgro Montpellier, Montpellier, France, 185 p.

- Delaune M., Reiffsteck M. & Feller C. (1991). L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre « Sedigraph 5000 ET ». Comparaison avec la méthode « pipette Robinson ». *Cahiers ORSTOM pédologie*, 26 (2) : 183 - 189.
- Dmitrienko A., Christy C. & Ralph D. (2007). *Pharmaceutical Statistics Using SAS®: A Practical Guide*: SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA, 429 P.
- Johann C. (2017). La production de cacao à l'échelle industrielle, 43 p.
- Deprince A. (2003). Etude la faune du sol « diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives ». *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 123 (49), 16 p.
- Domínguez A., Bedano C.J., Becker A.R. & Arolfo R.V. (2014) Organic farm-ing fosters agroecosystem functioning in Argentinian temperate soils: evidence from litter decomposition and soil fauna. *Applied Soil Ecology*, 83:170–176.
- Dungait J.A.J., Hopkins D.W., Gregory A.S. & Whitmore A P. (2012). Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 18 (6) : 1781 - 1796.
- Dupont S.T., Ferris H. & Van Horn M. (2009). Effects of cover crop quality and quantity on nematode-based soil food webs and nutrient cycling. *Applied Soil Ecology*, 41:157-167.
- Duprarque A. & Rigalle P. (2011) : Composition des MO et turn over ; Rôles et fonctions des MO, actes du colloque « Gestion de l'état organique des sols », 27 janvier 2011, Amiens, France : 210 - 222.
- Edwards C.A. & Lofty J.R. (1979). The effect of straw residues and their dispersal on the soil fauna. *In*: Grossbard, E. *Straw decay and its effect on utilization and disposal*, J. Wiley, Chichester: 37 - 44.
- Elalaoui C.A. (2007). Fertilisation minérale des cultures. Bulletin n° 156, PNTTA, Rabbat, Maroc, 4 p.
- Enriquez G.A. (1985). Curso sobre el cultivo del cacao. Serie manuales de enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 240 p.
- Evi J.B., Yavo W., Barro-Kiki., Menan E.H.I. & Koné M. (2007). Helminthoses intestinales en milieu scolaire dans six villes du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 100 (3) : 176 - 177.

- Eze S., Palmer S.M. & Chapman P.J. (2018). Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *Journal of Environmental Management*, 223: 74-84.
- FAO. (2013). Climate-Smart Agriculture Source book [en ligne], 570 p. Disponible sur : <http://www.fao.org/climatechange/climatesmart/en/> [Consulté le 29 mars 2021].
- FAO. (2012). Peatlands-guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use. FAO and Wetlands International, Rome, Italie : 340 p.
- FAO. (2009). L'étude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA) : Document national de prospective Côte d'Ivoire, <http://www.fao.org/docrep/003/X6780F/X6780F00>, [Consulté le 20 novembre 2019].
- FAO. (2004). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Bulletin Engrais et Nutrition Végétale, Rome, Italie : 27 - 28.
- Fissore C., Giardina C.P., Kolka R.K., Trettin C.C., King G.M., Jurgensen M.F., Barton C.D. & McDowell S.D. (2008). Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. *Global Change Biology*, 14 (1): 193 - 205.
- Foley J.A., De Fries R. & Asner G.P. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570 - 574.
- Fornara D.A., Wasson E.A., Christie P. & Watson C.J. (2016). Long-term nutrient fertilization and the carbon balance of permanent grassland: any evidence for sustainable intensification? *Biogeosciences*, 13 (17): 4975 - 4984.
- Fotio D., Monkiedje A., Maniepi N.J.S., Nguéack J. & Amvam Z.P.H. (2006). Evaluation des résidus pesticides et de leurs effets sur la qualité des récoltes et du sol en zone périurbaine de Yaoundé à cultures maraîchères. Proceedings, Journée, Pôle de Compétence en Partenariat Grand-Sud Cameroun (PCP). Résumés d'opérations de recherche participative menées en 2004, Yaounde, Cameroun.
- Freud E.H., Petithuguenin P. & Richard J. (2000). Les champs de cacao : un défi de compétitivité Afrique Asie. Editions Karthala & CIRAD, Paris, France, 207 p.
- Gibbs K.H., Brown S., Niles O.J. & Foley A.J. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2:30 - 43.

- GIEC. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker TF *et al.* eds. Cambridge, United Kingdom, 1535 p.
- Gockowski J. & Sonwa D.J. (2011). Cocoa intensification scenarios and their predicted impact on CO₂ emissions, biodiversity conservation, and rural livelihoods in the Guinea rainforest of West Africa. *Environmental Management*, 48 : 307 - 321.
- Goor F., Pereira B. & Sonnet P. (2006). "La contamination diffuse des sols". In CEEW (2007) *op. cit.*: 486 - 499.
- Gosz J.R., Likens G.E. & Bormann F.H. (1973). Nutrient Release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. *Ecological Society of America*, 43(2) :173 - 191.
- Grall J. & Hily C. (2003). Traitement des données stationnelles (faune), 10 p.
http://www.rebent.org//medias/documents/www/contenu/pdf/document/Fiches_techniques/FT10-2003-01.pdf [Consulté le 11 Janvier 2018].
- Grassé P.P. (1944). Recherches sur la biologie des termites champignonnistes (Macrotermitinae). *Annales des Sciences Naturelles*, VI : 97-171.
- Greenland D.J. (1995). Land use and soil carbon in different agroecological zones. *In: Soils and global Change*. Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds). CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, USA: 1 - 24.
- Grigera M.S., Drijber R.A. & Wienhold B.J. (2007). Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research*, 94:550 - 554.
- Griffiths B.S. & Philippot L. (2013). Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. *FEMS Microbiology reviews*, 37 (2): 112 - 129.
- Gryndler M., Larsen J., Hrselová H. & Řezáčová V. (2006). Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza*, 16 (3): 159 - 166.
- Guéi A.M. & Tondoh E.J. (2012). Ecological preferences of earthworms for land-use types in semi-deciduous forest area, Ivory Coast. *Ecological Indicators*, 18: 644 - 651.

- Gyaneshwar P., Naresh-kumar G, Parekh L.J. & Poole P.S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and soil*, 245 (1): 83 - 93.
- Hati K.M., Swarupt A., Mishrab B., Manna M.C., Wanjari R.H., Mandal K.G. & Misra A.K. (2008). Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. *Geoderma*, 148 (2): 173 - 179.
- Heim A. & Frey B. (2004). Taux de décomposition de la litière à un stade précoce pour les forêts suisses. *Biogéochimie*, 70 (3): 299– 313.
- Houghton R.A. (2007). Balancing the Global Carbon Budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 313 - 347.
- ICCO. (2020). ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLVI, No.4, Cocoa year 2019/2020, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1 p. <http://www.icco.org/statistics/production.aspx>. Consulté le 10 mars 2021.
- ICCO. (2017). ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLIV, No.3, Cocoa year 2016/2027, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1 p. <http://www.icco.org/statistics/production.aspx>. Consulté le 10 mars 2021.
- ICCO. (2012). Rapport Annuel 2010/2011. ICCO. Londres, Royaume Uni, 76 p.
- ICRAF. (2011). Présentation synoptique du département de Soubré World Agroforestry Center Vision for Change Project, Internal document, 115 p.
- IFDC. (2015). Une revue rapide du marché des engrais cacao en Côte d'Ivoire et leur utilisation par les cacaoculteurs ; Revue réalisée par IFDC pour l'initiative engrais cacao en Côte d'Ivoire. Version 7 décembre 2015, Abidjan, Côte d'ivoire, 30 p.
- IIFA. (2014). La fertilisation et les sols : les experts en parlent. International Fertilizer Industry Association, 28 rue Marbeuf, 75008, Paris, France, 8 p.
- INS. (2015). Rapport d'activité de l'INS, Abidjan, Côte d'Ivoire, 11 p.
- Issouf B., Adi Mama D.F.R., Neuba K.J.K., Dossahoua T., Marjolein V., Brice S., Jean L. & Jan B. (2008). Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio- temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Sciences & Nature*, 5 (1) : 49 - 60.

- Jadin P. & Snoeck J. (1985). La méthode du diagnostic sol pour calculer les besoins en engrais des cacaoyers. *Café Cacao Thé*, 29 (4) : 255 - 272.
- Jagoret P. (2011). Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme : Application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au Centre Cameroun. Thèse de Doctorat en agronomie de SupAgro Montpellier, Montpellier, France, 220 p.
- Janzen H.H. (2006). The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology & Biochemistry*, 38 : 419 - 424. [https:// www.elsevier.com/locate/soilbio](https://www.elsevier.com/locate/soilbio) [Consulté le 5 avril 2021].
- Jarecki M.K. & Lal R. (2003). Crop Management for Soil Carbon Sequestration. *Critical reviews in plant Sciences*, 22 (6): 471 - 502.
- Johann C. (2017). La production de cacao à l'échelle industrielle. Invest securities, Paris, France, 44 p.
- Jones A., Breuning-Madsen H., Brossard M., Dampha A., Deckers J., Dewitte O., Gallali T., Hallett S., Jones R., Kilasara M., Le Roux P., Micheli E., Montanarella L., Spaargaren O., Thiombiano L., Van Ranst E., Yemefack M. & Zougmore R. (2013). Soil Atlas of Africa (éd). Luxembourg, European Commission, 176 p.
- Jones M.B. & Donnelly A. (2004). Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. *New Phytologist*, 164 (3): 423-439.
- Kaba J.S. (2017). Nitrogen nutrition of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in intercropping systems with gliricidia (*Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp.). PhD Thesis of the Free University of Bozen Bolzano, Faculty of Science and Technology, Bolzano, Italy, 135 p.
- Kalms J.M., Kesse A., 1977. Opération connaissance du climat. Rapport Analytique 1977. Ministère ivoirien de la recherche scientifique, Institut des Savanes, Bouaké, Côte d'Ivoire, 42 p.
- Kassin E., Snoeck D., N'guessan J.C., Yao-Kouamé A. & Camara M. (2016). Projet de cartographie des sols. Rapport final CNRA, CIRAD, Abidjan, Côte d'Ivoire, 17 p.
- Kaur T., Brar B.S. & Dhillon N.S. (2008). Soil organic matter dynamics as affected by longterm use of organic and inorganic fertilizers under maize–wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81 : 59 - 69.

- Kébé B.I. (2003). Programme de 2ème génération : sous-commission Plantes Stimulantes CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 24 p.
- Kébé B.I., N'guessan F., N'goran K.J. & Irié Bi Z. (2005). Bien cultiver le cacaoyer en Côte d'Ivoire. Fiche technique. CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 4 p.
- Kébé B.I., N'Guessan F.K., Tahy G.M., Assiri A.A., Koko L.K., Kohi N.J., Irié B.Z., Koffi N. (2009). Bien cultiver le cacaoyer en Côte d'Ivoire. CNRA/CTA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 4p.
- Keho Y., Diallo S.S. & Agkpo J.L. (2008). Modélisation de la production cacaoyère en Côte d'Ivoire. IITA/STCP.
- Kibblewhite M.G., Ritz K. & Swift M.J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of Royal Society B: Biological Sciences*, 363: 685 - 701.
- Kidd J., Manning P. Simkin J., Peacock S., Stockdale E. (2017). Impacts of 120 years of fertilizer addition on a temperate grassland ecosystem. *PloS One*, 12 (3) : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174632>
- Kipewarlic A.F. (1963). Problème de l'influence de la chaux et des engrais sur la faune des sols (en russe). *Pedobiologia*, 3 (4) : 274 - 285.
- Koko L.K. (2014). Teractiv cacao as a new fertilizer based reactive phosphate rock for cocoa productivity in Côte d'Ivoire: A participatory approach to update fertilization recommendation. *Procedia Engineering*, 83 : 348 - 353.
- Koko L.K. (2008). Influence des caractères morpho-pédologiques et chimiques des sols sur la dégradation précoce des cacaoyers dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat en Pédologie, Université de Cocody- Abidjan, Côte d'Ivoire, 148 p.
- Koko L.K., Kassin K.E., Assiri A.A., Yoro G., Ngoran K. & Snoeck D. (2011). Fertilisation minérale du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire : acquis vulgarisables et perspectives de recherche. *Agronomie Africaine*, 23 (3) : 217 - 225.
- Koko L.K., Kassin K.E., Yoro G., N'goran K. & Yao-Kouamé A. (2009). Corrélations entre le vieillissement précoce des cacaoyers et les caractéristiques morphopédologiques dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 24 : 1508 - 1519.
- Koko L.K., Yoro R.G., N'Goran K. & Assa A. (2008). Evaluation de la fertilité des sols sous cacaoyers dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire : pp. 82–95.

- Konan K.F., Brahima K., Koné W.A., Traoré M.J., N'gazoua K.R., Akassimadou E.F., Zadi F., Yao G.F., Yao-Kouamé A. & Koné D. (2017). Soil Organic Carbon as observed in Lowlands of Continuous Rice Cropping in Guinea Savanna Ecology: Towards an Improvement of Organic Matter Amendment. *Journal of Research in Environmental and Earth Science*, 3 (3): 25 - 34.
- Konan L.N., N'Guessan D.J.A., Kone A.W., Yapo G.R., Sall S.N., Hien E. & YAO-Kouamé A. (2021). Qualité et vitesse de décomposition des litières des principaux arbustes natifs de la savane humide au centre de la côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 33 (2) : 191 - 201.
- Kotaix A.J.A., Kouadio K.H., Angui K.T.P., Kassin K.E., Gbeuli T.A., Assi M.E., Kouamé N.N., Coulibaly K., Koko L.A. & Bakayoko S. (2021). Les engrais minéraux issus du diagnostic sol améliorent la fertilité chimique et la production cacaoyère à l'Est de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal and plant Sciences*, 47 (1) : 8387 - 8399.
- Kouadio K.H. (2016). Incidence des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers sur la fertilité des sols au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas des départements de Soubré et Méagui. Mémoire de master de pédologie, Université Félix Houphouët Boigny, Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 68 p.
- Kouadio Y.D. & Aloko-N'guessan J. (2015). Dynamique démographique et économique, facteurs déterminants de la croissance spatiale des villes du département de Soubré (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 11 (26) : 1857 - 7881.
- Kouakou K. (2014). Diversité moléculaire du CSSV (Cocoa Swollen Shoot Virus) et épidémiologie de la maladie du Swollen Shoot du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, phytovirologie, Université Félix Houphouët Boigny, Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 141 p.
- Kouamé B., Kone D. & Yoro G.R. (2007). La pluviométrie en 2005 et 2006 dans la moitié sud de la Côte d'Ivoire. Bulletin Le CNRA en 2006, document technique. Abidjan, Côte d'Ivoire : 12 - 13.
- Kouamé E.B.H. (2012). Risk aversion and agricultural decision-making under uncertainty: evidence from cocoa farmers in western Côte d'Ivoire. Faculty of Economics and Management, University of Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 205 p.

- Kouamé K.F. (2011). Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL. Thèse d'Etat ès sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 379 p.
- Kouamelan A.N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de la Côte d'Ivoire. Implication pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de Doctorat Université de Rennes 1, France, 277 p.
- Koudjega T. & Tossah B.K. (2009). Improvement of soils fertility management in cocoa plantations in Togo. *Proceeding of the 7th international symposium on plant-soil interactions at low pH*, 17 - 21 may, Guangzhou, China, pp. 184 - 185
- Krna M.A. & Rapson G.L. (2013). Clarifyng 'carbon sequestration'. *Carbon Manage*, 4 : 909 - 322.
- Lachenaud P. (2005). Densité évolutive en cacaoculture : la nécessité des éclaircies. *In* : Actes de la 14 ème Conférence Internationale sur la Recherche Cacaoyère, Accra (Ghana), 13-18 octobre 2003. Lagos, Nigeria, Cocoa Producers Alliance, pp. 309 - 315.
- Laganiere J., Angers D.A. & Pare D. (2010). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation : a meta-analysis. *Global Change Biology*, 16 (1): 439-453.
- Lal R. (2011). Sequestering carbon in soils of agroecosystems. *Food Policy*, 36: 533 - 539.
- Lavelle P., Spain A., Blouin M., Brown G., Decaens T., Grimaldi M., Jimenez J.J., McKey D., Mathieu J., Velasquez E., Zangerle A. (2016). Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil: A Review of Concepts and Future Research Questions. *Soil Science*, 181 (3-4): 91-109.
- Lavelle P., Decaëns T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., Margerie P., Mora P. & Rossi J.P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. ICSZ - Soil Animals and Ecosystems Services, Proceedings of the XIVth International Colloquium on Soil Biology. *European Journal of Soil Biology*, 42: 3 - 15.
- Lavelle P. & Spain A.V. (2001). Soil ecology. Kluwer Académie Publishers, Dordrecht-Boston-Londres, Londres, United Kingdom, 654 p.

- Lavelle P. (1983). The structure of earthworm communities. *In: Earthworm ecology: from Darwin to vermiculture*. Satchell J.E (Ed). Chapman & hall, London, p 449-466.
- Lebreton J.D., Chessel D., Richardot-Coulet M. & Yoccoz N. (1988). L'analyse des relations espèces-milieu par l'analyse canonique des correspondances. *OEcologia Generalis*, 9 (2) : 137 - 151.
- Lehmann, J & Kleber M (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580): 60 – 68.
- Liu B., Mørkved P.T., Frostegård Å. & Bakken L.R. (2010). Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N₂O and N₂ production as affected by soil pH. *FEMS Microbiology Ecology*, 72 : 407 - 417.
- Loor-Solorzano R.G. (2007). Contribution à l'étude de la domestication de la variété de cacaoyer National d'Équateur : recherche de la variété native et de ses ancêtres sauvages. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, sup Agro, France, 201 p.
- Marco P., Henry M., Blavet D. & Bernoux M. (2010). Variation des stocks de carbone organique du sol après plantation forestière : essai de méta-analyse incluant quelques situations d'Amérique latine. *Bois et forêts des tropiques*, 305 : 21 - 32.
- Mbao C D. (2015). Les peuplements de termites (Isoptera) de vergers du plateau de Diass et de la Niaye de Bayakh (Sénégal). Mémoire de Master II, Université Cheikh. Anta. Diop de Dakar, 30p.
- Menard O. (2005). Les ouvriers du sol et les pratiques agricoles de conservation. Colloque en agroenvironnement. 23 février 2005, drummondville, Canada, 6 p.
- Metz B., Davidson O., De Coninck H., Loos M. & Meyer L. (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, New York: 443 p. Disponible sur: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf [Consulté le 31 mars 2021].
- Mickael H. & Marine Z. (2020). Faune du sol et production végétale, 18 P. <https://www.plantevie.ens.fr>; Consulté le 19 Mars 2022
- Mills A.J. & Fey M.V. (2003). Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of science*, 99: 429 - 436.

- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke S., Richerde-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G.X., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui C.C., Vagen T.G., van Wesemael B. & Winowiecki L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292: 59-86.
- Mitscherlich E.A. (1909). Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbücher*, Tome 38: 537 - 552.
- Moço S.K.M., Gama-Rodrigues F.E., Gama-Rodrigues C.A., Machado R.C.R. & Baligar C.V. (2010). Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 46: 347 - 354.
- Montagnini F. & Nair P.K.R. (2004). Carbon sequestration. An underexploited environmental benefit of agroforestry system: *Agroforestry systems*, 61 (1): 281 - 295.
- Mossu G. (1990). Le cacaoyer, Série : Le technicien d'Agriculture tropicale, Ed, G.P, Maisonneuve et Larose, Paris, France, 160 p
- Motamayor J.C. (2001). Etude de la diversité génétique et de la domestication des cacaoyers du groupe Criollo (*Theobroma cacao* L.) à l'aide de marqueurs moléculaires. Mémoire de Thèse de Doctorat, Sciences de la vie, Université de Paris-Sud, France, 179 p.
- Muller G. (1957). Recherche sur les relations entre les engrais minéraux et l'activité biologique dans le sol. *Deutsch. Landwirtschaft*, 8 : 24 - 31.
- Naik S.K., Maurya S., Mukherjee D., Singh A.K. & Bhatt B.P. (2018). Rates of decomposition and nutrient mineralization of leaf litter from different orchards under hot and dry sub-humid climate. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64 : 560 – 573.
- Ndiaye A B. (2014). Contribution à la connaissance des Termites (Isoptera Brullé, 1832) du Sénégal Systématique et Ecologique. Thèse de doctorat ès-Sciences, spécialité Entomologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, p. 257.
- N'Guessan K.F. (2013). Acquis des projets antérieurs de lutte contre le Swollen Shoot en Côte d'Ivoire. Abidjan, Côte d'Ivoire, 46 p.

- N'Guessan K.J.C, Akotto O.F., Snoeck D., Camara M. & Yao-Kouamé A. (2016). Potentiel de fertilité chimique des vergers de cacaoyer *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 18 (3) : 868 - 879.
- N'Guessan K.J.C. (2017). Comportements, dynamiques et équilibres des cations majeurs et de certains oligo-éléments dans les sols cacaocultivés de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 141 p.
- Niemenak N., Awah T. & Lieberei R. (2012). Establishment of suspension culture in *Theobroma cacao* and polyamines associated with cacao embryogenesis. *Plant Growth Regulation*, 67 (1): 112 - 124.
- Norris K., Asase A., Collen B., Gockowski J., Mason J., Phalan B. & Wade A.S.I. (2010). Biodiversity in a forest-agriculture mosaic - the changing face of West African rainforests. *Biological Conservation*, 143: 2341 - 2350.
- Olson K.R., Al-Kaisi M.M., Lal R. & Lowery B. (2014). Experimental Consideration, Treatments, and Methods in Determining Soil Organic Carbon Sequestration Rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78: 348 - 355.
- Olson K.R., Al-Kaisi M., Lal R. & Lowery B. (2014). Examining the paired comparison method approach for determining soil organic carbon sequestration rates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69 : 193 - 197.
- OPVT. (2015). Clé d'identification de lombriciens en 4 groupes fonctionnels. Université de Rennes 1/CNRS – OSUR – UMR Ecobio : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr> [Consulté le 08/07/2020]
- Oro Z.F. (2011). Analyse des dynamiques spatiales et épidémiologie moléculaire de la maladie du swollen shoot du cacaoyer au Togo. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier SupAgro, Montpellier, France. 262 p.
- Ouédraogo M., Maquet A. & Baudoin J.P. (2005). Etude comparative de la diversité et de la structure génétique de la population sauvage de *Phaseolus lunatus* L. à l'aide des marqueurs enzymatiques et microsatellites. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 9 (3) : 195 - 205.
- Palm C.A., Gachengo C.N., Delve R J., Cadisch G.C. & Giller K.E. (2001). Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database Agriculture. *Ecosystems and Environment*, 83 : 27 - 42.

- Papon A. (1977). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : synthèse de l'opération SASCA, 1962-1968. Edition B.R.G.M, Paris, France, 285 p.
- Papon A. & Lemarchand R. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968. Edition B.R.G.M, Paris, France, 284 p.
- Parnaudeau V. (2005). Caractéristiques biochimiques de produits organiques résiduaux, prédiction et modélisation de leur minéralisation dans les sols. Thèse de Doctorat, Agro-Campus Rennes, Rennes, France, 85 p.
- Pedel & Fabri. (2012). État de l'art sur les indices existants concernant l'État Écologique des habitats benthiques du domaine profond. Rapport IFREMER, Toulon, France, 76 p.
- Pérez F., Florin D., Grollier T., Feurtet-Mazel A., Coste M., Ribeyre F., Ricard M. & Boudou A. (1996). "Effects of the phenylurea herbicide isoproturon on periphytic communities in fresh water indoor microcosms." *Environmental Pollution*, 94 : 141 - 152.
- Phillipson J. & Bolton P.J. (1976). The respiratory metabolism of selected Lumbricidae. *Oecologia*, 22: 135 - 152.
- Pignard G., Dupouey J.C., Arrouays D. & Loustau D. (2004). Carbon stocks estimates for French forests : *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 4 (4): 285 -2 89.
- Pimentel D. (2006). Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8: 119 - 137.
- Poepfleau C., Zopf D., Greiner B., Geerts R., Korvaar H., Thumm U., Don M., Heidkamp A. & Flessa H. (2018). Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 265: 144 - 155.
- Poissonnet F., Mikaël H., Christophe O. & Jean-Miche C. (2007). Un réseau de zones pilotes pour la gestion durable des forêts de l'Arc Atlantique. Rapport final régional Aquitaine, 124 p.
- Ponge J.P. (2004). Effets des composés organiques sur la faune du sol. Perturbation des communautés et recolonisation des substrats pollués. Muséum National d'Histoire Naturelle, CNRS UMR 7179, 19 p.
- Prevot A.R. (1970). Humus. Biogenèse, Biochimie, Biologie. Ed. De la Tourelle, Paris, France, 342 p.

- Romans J.C.C. & Robertson L. (1975). Some general characteristics of the freely drained soils of the Ettrick association in east Scotland. *Geoderma*, 14 : 297 - 317.
- Roose E.J., Albergel J., De Noni G., Sabir M. & Laouina A. (2008). Efficacité de la GCES en milieu semi-aride, AUF, EAC et IRD éditeurs, Paris, France, 425 p.
- Ruf O.F., Tanoh R. & Kla G.A. (2014). Engrais et cacao : un binôme inévitable et complexe plateforme de partenariat public-privé de la filière café-cacao troisième session plénière, à Abidjan (1) CIRAD / UMR Innovation (2) ALP, 36 p.
- Ruf O.F. & Zadi H. (1998). Cocoa: from deforestation to reforestation. First International Workshop on sustainable cocoa growing. Smithsonian Institute, du 29-03 au 03-04-1998 Panama City, Panama, 29 p.
- Saha S., Prakash V., Kundu S., Kumar N. & Mina B.L. (2008). Soil enzymatic activity as affected by long term application of farm yard manure and mineral fertilizer under a rainfed soybean-wheat system in N-W Himalaya. *European Journal of Soil Biology*, 44 : 309 - 315.
- Schöl V.L. (1998). Gérer la fertilité du sol. Agrodock 2, quatrième édition, Agromisa, Wageningen, Pays-Bas, 88 p.
- Sharpley A.N., Weld J.L., Beegle D.B., Kleinman P.J.A., Gburek W.J., Moore P.A. & Mullins G. (2003). Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58 (3): 137 – 152.
- Shi S.W., Zhang W., Zhang P., Yu Y.Q. & Ding F. (2013). A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. *Forest Ecology and Management*, 296: 53-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.026>
- Scopel E., Findeling A., Chaves Guerra E. & Corbeels M. (2005). Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy for Sustainable Development*, 25: 425 - 432.
- Singh A.K., Sharma S.K. & Gupta R.C. (2015). Soil fertility and fertilizer use. School of Agricultural Sciences and rural Development, University of Nagaland, Medziphema, 58 p.
- Six A. (2014). Analyse des facteurs impactant la biodiversité écologique des vers de terre dans trois sols typiques du Poitou-Charentes, Mémoire de fin d'étude option Agricultural sciences, Université Agrocampus Anger-rennes, France, 29 p.

- Six J., Ogle S.M., Breid F.J., Conant R.T., Mosier A.R. & Paustian K. (2004). The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long-term. *Global Change Biology*, 10: 155 - 160. <https://escholarship.org/uc/item/1bz3k63v> [Consulté le 08/02/2021]
- Smith P. (2004). How long before a change in soil organic carbon can be detected? *Global Change biology*, 10 (11) : 1878 - 1883.
- Snoeck D., Koko L., Joffre J., Bastide P. & Jagoret P. (2016). Cacao Nutrition and Fertilization. I : Sustainable Agriculture Reviews, Vol. 19, Chapter 4. E. Lichtfouse (Ed.). Cham, Springer International Publishin : 155-202.
- Snoeck D. (2010). Importance d'une bonne gestion de la fertilité des sols pour une cacaoculture durable. Atelier sur la gestion des sols des vergers cacaoyers et l'agroforesterie appliquée à la cacaoculture en Afrique de l'Ouest et du Centre Organisé par la COPAL, du 16 au 18 mars 2010 à Kumassi (Ghana).8 p.
- SODEFOR. (1992). Société de développement des plantations forestières. Rapport d'activité de l'année 1992- 1993. SODEFOR, Abidjan, Côte d'Ivoire, 61 p.
- Soussana J.F. & Lemaire G. (2014). Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 190: 9-17.
- Sperow M., Eve M. & Paustian K. (2003). Potential Soil C Sequestration on U.S Agricultural Soils. *Climatic change*, 57 (3): 319 - 339.
- Strudley M.W., Green T.R. & Ascough II J.C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and tillage research*, 99 (1) :4 - 48
- Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. Rapport SODEMI. Côte d'Ivoire. Thèse Doct. Ès Sc. Nat. Université de Lausanne, Lausanne, Suisse, 266 p.
- Tarjot M. (1971). Nouvelle contribution à l'étude de la pourriture des cabosses du cacaoyer due au Phytophthora palmivora (Butl.) Butl. en Côte d'Ivoire. *Café, Cacao, Thé*, 15 (1): 31 - 48.
- Tondoh E.J., Guéi A.M., Csuzdi C. & Okoth P. (2011). Effect of land-use on the earthworm assemblages in semi-deciduous forest of Central-West Ivory Coast. *Biodiversity Conservation*, 20 : 169 - 184.

- Toop W., Kappes H., Kulfan J. & Zach, P. (2005). Distribution pattern of woodlice (Isopoda) and millipedes (Diplopoda) in four primeval forests of the Western Carpathians (Central Slovakia). *Soil Biol. Biochem.*, 38 : 43-50.
- Touzard J.M. (1993). L'économie coloniale du cacao en Amérique centrale. Collection repères, Montpellier, France, 95 p.
- UNIFA. (2014). Les engrais minéraux composés. Source: [https:// fertilisation-edu.fr/production-ressources/engrais-mineraux-composes.html](https://fertilisation-edu.fr/production-ressources/engrais-mineraux-composes.html), consulté le 9 Janvier 2022).
- Uribe A., Méndez H. & Mantilla J. (2001). Effect of balanced fertilizers on cocoa yield. *Better Crops International*, 15 (2), 3 p.
- USAID. (2004). Fiche d'informations du bureau Afrique de l'USAID sur l'engrais, 5 p. www.encapafrika.org/docs.htm#specificagriculture, consulté le 7 avril 2018
- USDA. (1987). Soil mechanics level I. Module 3, USDA Soil conservation service, Washington DC, USA, 53 p.
- Walkley A. & Black I.A. (1934). An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37 : 29 - 37.
- Weissen F. (1973). Evolution d'une litière de hêtraie après fertilisation. *Bulletin de Recherche d'Agronomie de Gembloux*, 8 (1) : 42 - 55.
- West T.O. & Post W.M. (2002). Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (6): 1930 - 1946.
- Wood G.A.R. & Lass R.A. (1985). Cultures pérennes tropicales : Enjeux économiques et écologiques de la diversité, Ed. Quae, Versailles, France, 620 p.
- WRB. (2014). World reference base for soil resources 2016. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps World Soil Resources Reports no. 106. FAO, Rome. 203 p.
- Wu J., Joergensen R.G., Pommerening B., Chaussod R. & Brookes P.C. (1990). Measurement of microbial biomass C by fumigation- extraction - An automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (1) : 167 - 169.

- Yao K.T. (2009). Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apport de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrochimie. Thèse Unique de Doctorat. Hydrogéologie-Hydrochimie. Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 216 p.
- Yao Y., Wang X., Zeng Z., Liu Y., Peng S., Zhu Z. & Piao S. (2016). The effect of afforestation on soil moisture content in North-eastern China. *Plos one*, 11 (8) : 1 - 14.
- Yoro G. (2004). Reconnaissance des sols favorables aux cacaoyers. Cours de formation des producteurs de cacao et des agents ANADER détachés auprès de STCP. Convention CNRA-STCP. Document interne du CNRA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 24 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de description de profil pédologique

date:	lieu:	feuille:	profil:	roche:	utilisation du sol:
pente:	position topographique:	végétation:	microrelief:	type de sol:	
profondeur					
couleur	humidité				
	matière org				
texture	% argile				
% éléments grossiers	% quartz				
	concrétions et nodules				
	autres éléments				
structure générale	taille				
structure du débit	taille				
cohésion générale	cohésion agrégat				
Porosité générale	taille				
abondance des racines	taille				
orientation des racines	classe de drainage				
transition	limite				
contraintes					
type d'horizon					
observation complémentaires					

Annexe 2 : Méthode de détermination de la texture du sol

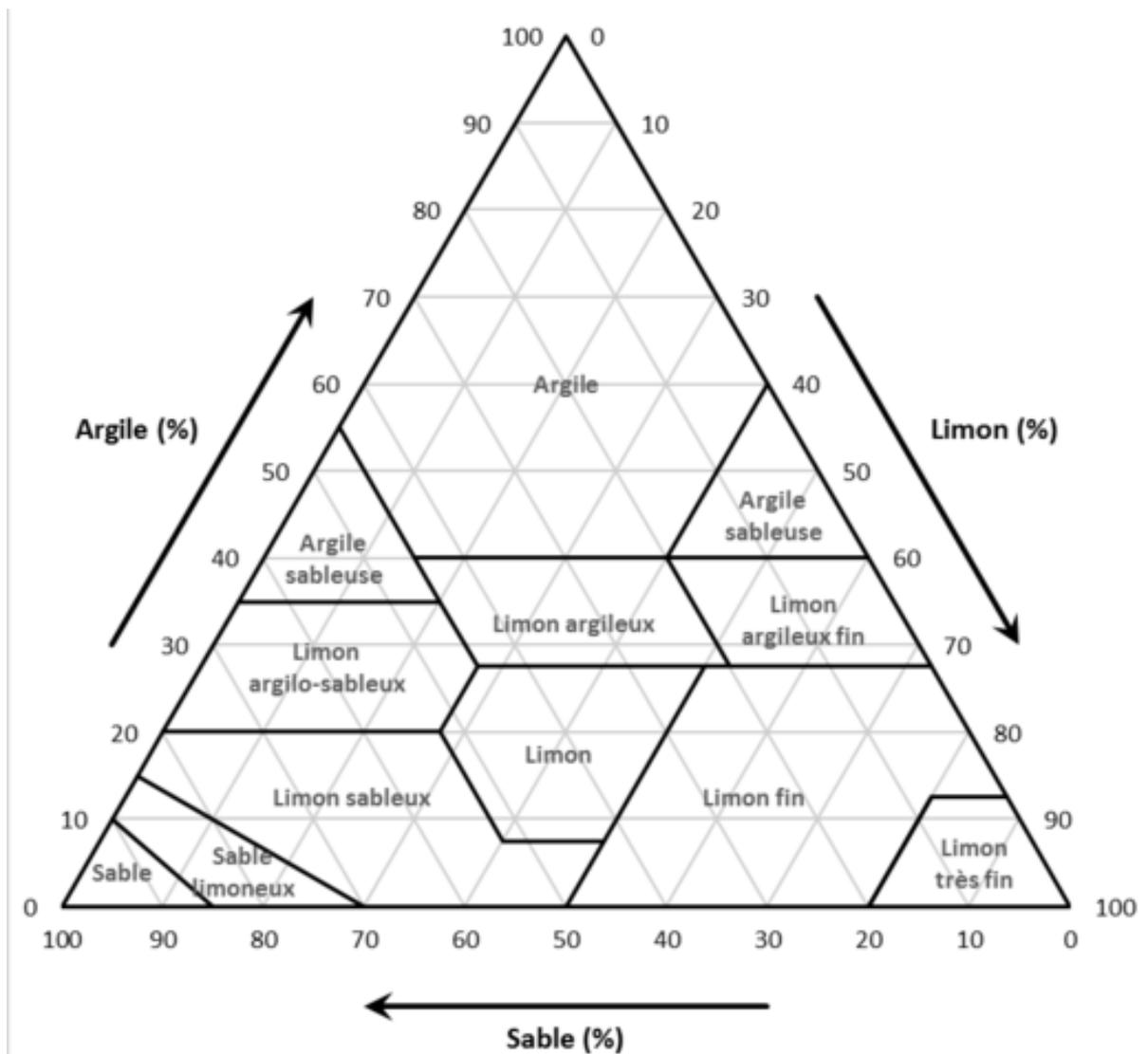
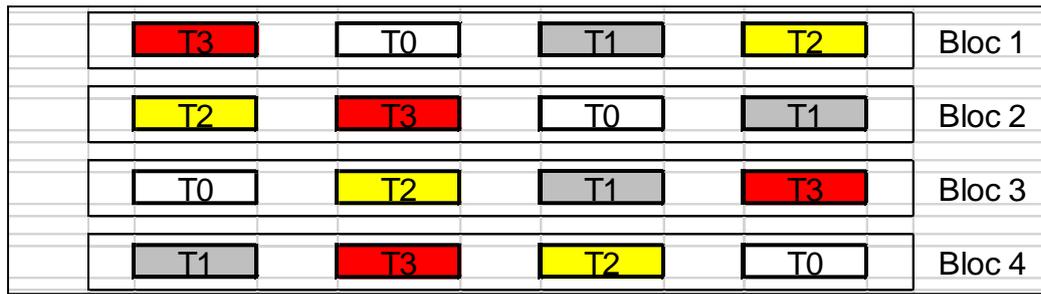
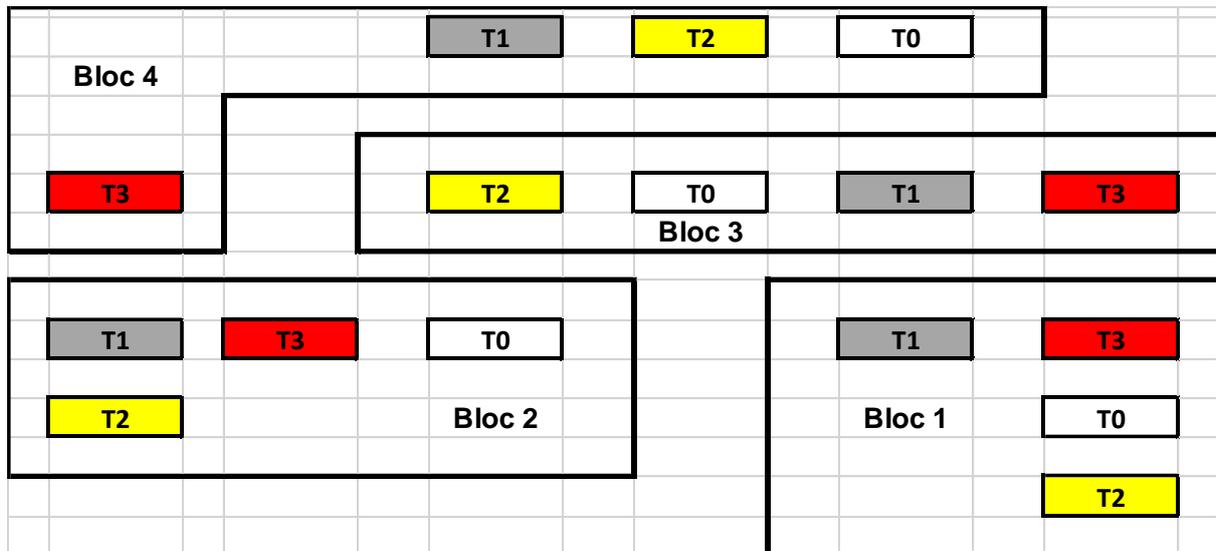


Diagramme texturale USDA (1987, modifié)

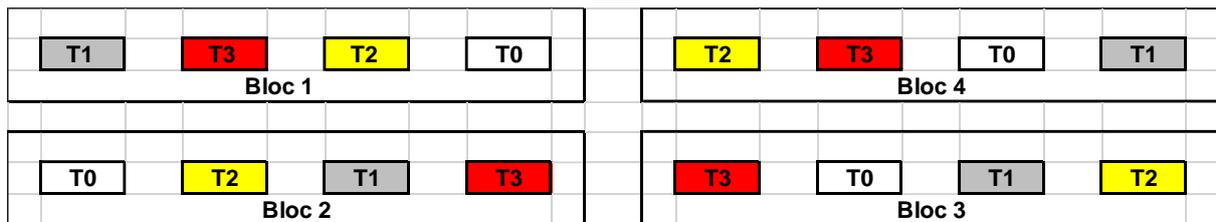
Annexe 3 : Dispositifs expérimentaux sur les différents sites



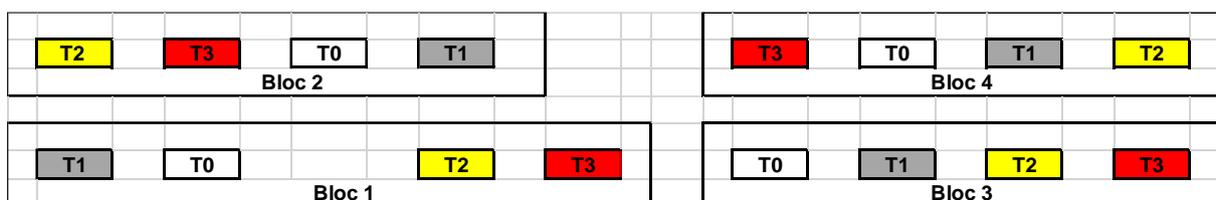
Plan du dispositif expérimental de Divo



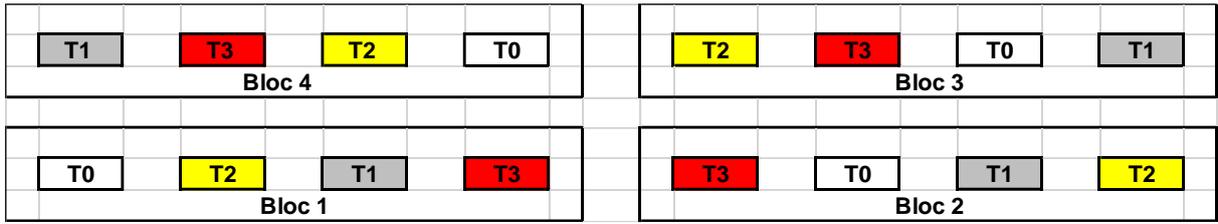
Plan du dispositif expérimental de Lakota



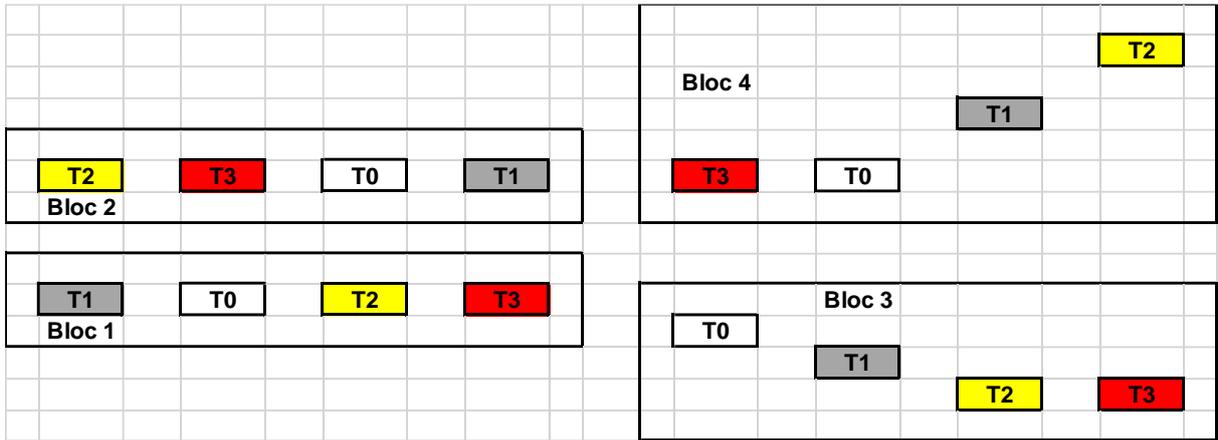
Plan du dispositif expérimental de Guitry



Plan du dispositif expérimental de Soubré

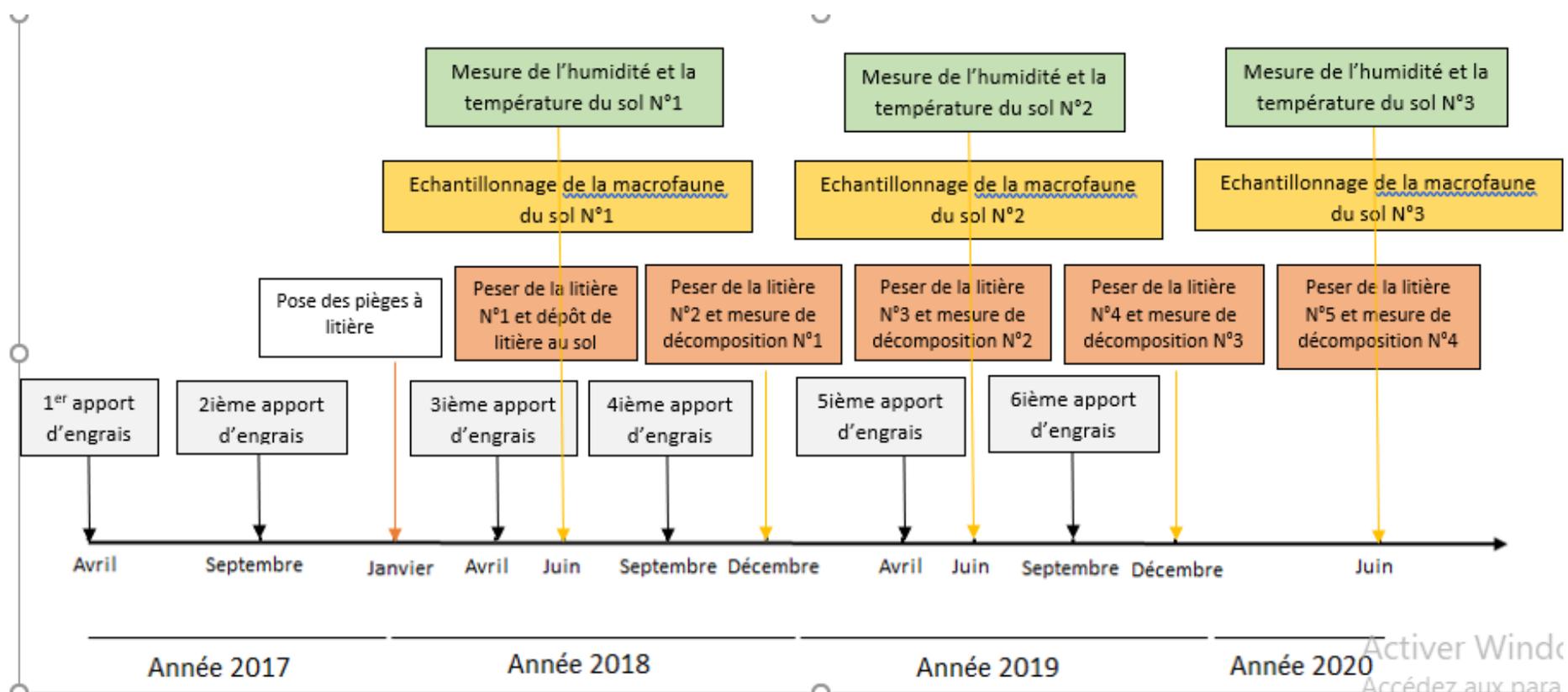


Plan du dispositif expérimental de Méagui



Plan du dispositif expérimental de Mayo

Annexe 4 : Frise temporelle des activités de collecte de données



Annexe 5 : Fiche de collecte de données sur la macrofaune du sol

Parcelle : Date : Strate :cm		TRAITEMENTS																																							
		GRIS (T1)										ROUGE (T3)										JAUNE (T2)										TEMOINS (T0)									
Organismes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VERS DE TERRE																																									
MICROARTHROPODES																																									
DIPLOPODES																																									
CHILOPODES	A																																								
	B																																								
	C																																								
AUTRES ORGANISMES																																									

Annexe 6 : Méthodes de collecte de données de la macrofaune du sol et de la litière de feuilles de cacao



Réalisation d'un monolithe de terre



Tri manuel des échantillons de sol



Collecte des feuilles de cacao tombées

Annexe 7 : Quelques représentants de la macrofaune recensés sur les différents sites d'étude



A : *Oxidus gracilis* (Diplopode), B : *Acatina acatina* (gastéropode), C : autre organisme, D : vers de terre, E et F : Lulides (myriapodes)

Annexe 8 : Caractéristiques d'une intense activité biologique du sol



Annexe 9 : Décomposition de la litière de feuilles de cacao



Litière de feuilles de cacao



Litière de feuilles de cacao au contact du sol



Litière en décomposition après 6 mois



Vue de la litière après 24 mois de décomposition

Annexe 10 : Description des sols de la région de la Nawa

➤ Site de Soubré

Le profil pédologique décrit sur le site de Soubré, présente 6 horizons à savoir :

- l'horizon de surface A₀ (0 - 2 cm) est constitué de débris végétaux partiellement dégradés, très poreux.

- l'horizon de surface A₁₁ (2 - 20/21 cm) a une teinte brun grisâtre foncé 10 YR 4/2. Il est très humifère et a une texture limono-sablo-argileuse avec un taux d'argile allant de 15 à 20 %. La structure de cet horizon est grumeleuse à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux. Il renferme de très nombreuses racines de taille millimétrique à centimétrique à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un bon indice de drainage évalué à 1,1.

- l'horizon sous-jacent A₁₂ (20/21 - 30/31 cm) est de couleur brun grisâtre (10 YR 5/2), humifère et de texture limono-sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile. Cet horizon a une structure grumeleuse à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, peu cohérent et poreux, contient d'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un bon indice de drainage estimé à 1,2.

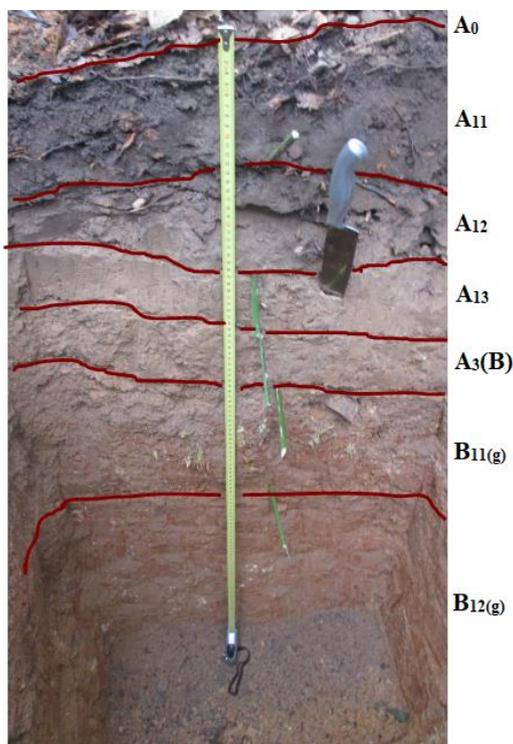
- l'horizon A₃₁ (30/31 - 46/47 cm) qui suit, est de couleur brun (7,5 YR 4/3), peu humifère, de texture sablo-argileuse avec 20 à 25 % d'argile et contient 5 à 10 % de concrétions manganifériques. La structure identifiée est massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux. Cet horizon contient d'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un bon indice de drainage de valeur 1,4.

- l'horizon A₃₂(B) (46/47 - 60 cm) a une couleur rouge (2,5 YR 4/6) et n'est pas humifère. Il a une texture argilo-sableuse avec 25 à 30 % d'argile et contient 20 à 25 % de concrétions manganifériques. Sa structure est massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux. Il renferme quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale et a un bon indice de drainage estimé à 1,5.

- l'horizon B₁₁ (60 - 82 cm) est également de couleur rouge (2,5 YR 4/6), pas humifère, de texture argilo-sableuse avec 30 à 35 % d'argile et contient 20 à 25 % d'éléments grossiers (concrétions manganifériques et graviers). Sa structure est massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux. Cet horizon présente de rares racines et un indice de drainage moyen 1,7.

- l'horizon de profondeur B₁₂(g) qui s'étend de 82 à 120 cm a une couleur rouge (2,5 YR 4/6) avec des taches de couleur jaune olive (2,5 Y 6/8) et n'est pas humifère. Il présente une texture

argilo-sableuse à sable fin avec 30 à 35 % d'argile, une structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux, avec la présence de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale. L'indice de drainage est mauvais et est estimé à 3.



Fosse pédologique sur le site de Soubré (*Manganiferric pseudo-gleyic plinthic ferralsol*)

➤ Site de Méagui

Le profil pédologique décrit sur le site de Méagui comporte 6 horizons qui sont :

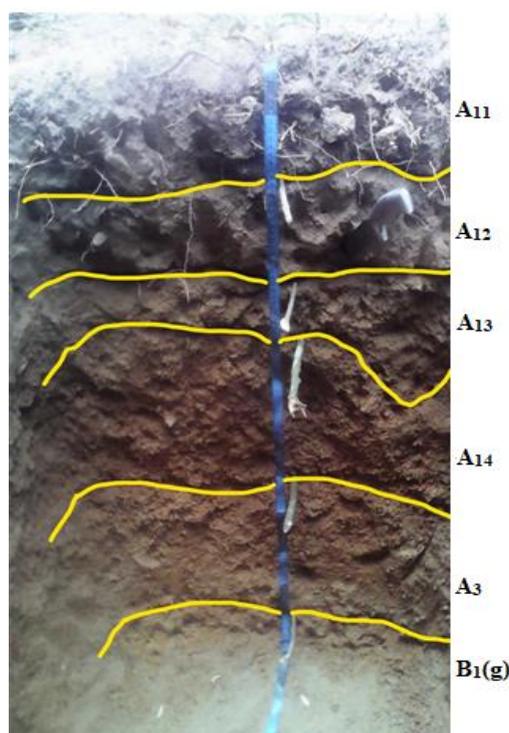
- l'horizon de surface A₁₁ (0 - 18/19 cm) a une couleur brun grisâtre (10 YR 5/2), humifère, de texture sablo-argileuse avec 10 à 15 % d'argile. Il a une structure grumeleuse peu nette à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux et contient de très nombreuses racines de taille millimétrique à centimétrique à orientation horizontale à sub-horizontale, L'indice de drainage est évalué à 1 et est qualifié de bon.
- l'horizon A₁₂ (18/19 - 36 cm) est de couleur brun (10 YR 5/4), peu humifère, de texture sablo-argileuse avec 10 à 15 % d'argile, de structure grumeleuse peu nette à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux. Il renferme d'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale et a un indice de drainage équivalent à 1,2.
- l'horizon A₁₃ (36 - 46/50 cm) de couleur brun 7,5 YR 5/4 est apparemment pas humifère. Sa texture est sablo-argileuse avec 10 à 15 % d'argile et possède 10 à 15 % de concrétions

manganifériques. Il présente une structure particulière, peu cohérente et très poreuse, quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un bon indice de drainage estimé à 1,1.

- l'horizon A₁₄ (46/50 - 78/79 cm) a une couleur rouge (2,5 YR 5/6) et est apparemment pas humifère. Il a une texture sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile et renferme 30 à 35 % d'éléments grossiers (concrétions manganifériques, cailloux et graviers). La structure de cet horizon est gravillonnaire à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et très poreux. Cet horizon contient de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et présente un bon indice de drainage de valeur égale à 1,2.

- l'horizon A₃ (78/79 - 109 cm) est également de couleur teinte rouge 2,5 YR 5/6. Il n'est pas humifère, de texture sablo-argileuse avec 20 à 25 % d'argile et une proportion d'éléments grossiers (concrétions manganifériques, cailloux et graviers) évaluée entre 25 et 30 %. La structure générale est massive et de débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux. Cet horizon présente de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un bon indice de drainage 1,4.

- l'horizon de profondeur B₁(g) qui s'étend de 109 à 120 cm, est de couleur rouge (2,5 YR 5/6) avec des taches de couleur jaune olive (2,5 Y 6/8) et pas humifère. Il a une texture argilo-sableuse avec 25 à 30 % d'argile, une structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, peu poreux et cohérent. Il contient de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un mauvais indice de drainage évalué à 3.



Fosse pédologique sur le site de Méagui (*Manganiferri pseudo-gleyic plinthic arenic ferralsol*)

➤ Site de Mayo

Sur le site de Mayo la fosse pédologique ouverte comporte 5 horizons qui sont les suivants :

- l'horizon de surface A₁₁ (0 - 14/15 cm) a une couleur brun foncé (7,5 YR 3/2), très humifère, de texture limono-sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile et contient 5 à 10 % de concrétions manganiferriques. Sa texture est grumeleuse à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et poreux. Cet horizon renferme de très nombreuses racines de taille millimétrique à centimétrique à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un bon indice de drainage estimé à 1,2.

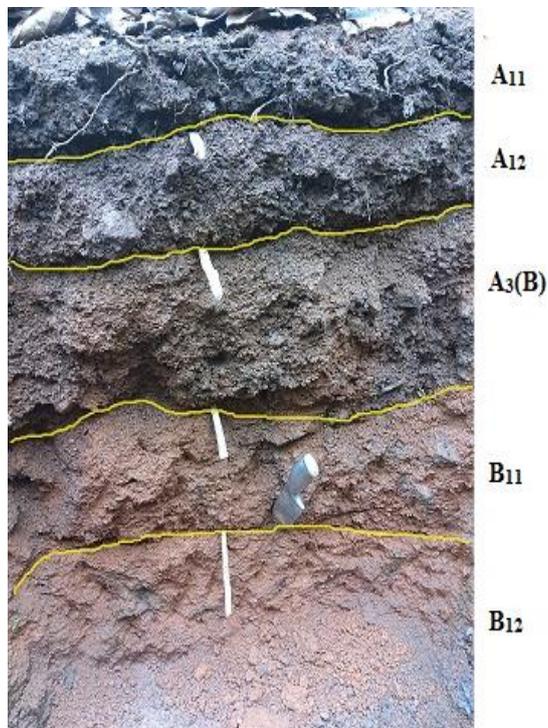
- l'horizon A₁₂ (14/15 - 37/40 cm) qui suit est de couleur brun 7,5 (YR 4/2), humifère, de texture sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile et renferme 50 à 55 % d'éléments grossiers (concrétions manganiferriques, cailloux et graviers). La structure est gravillonnaire à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, peu cohérente à cohérente et poreuse, contenant d'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale. Cet horizon a un bon indice de drainage évalué à 1,2.

- l'horizon A₃(B) (37/40 - 70/71 cm) est de couleur rouge (2,5 YR 4/8), apparemment pas humifère, de texture argilo-sableuse avec 25 à 30 % d'argile et un taux élevé d'éléments grossiers (concrétions manganiferriques et graviers) estimé à 50 à 55 %. Cet horizon a également une structure gravillonnaire à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux, renferme quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un bon indice de drainage de valeur 1,4.

- l'horizon B₁₁ (70/71 - 101 cm) est de couleur rouge (2,5 YR 4/8), apparemment pas humifère, de texture argilo-sableuse avec 25 à 30 % d'argile et un taux élevé d'éléments grossiers (concrétions manganiferriques et graviers) estimé à 30 à 35 %. Cet horizon a également une structure gravillonnaire à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux, renferme quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un bon indice de drainage de valeur 1,4.

- l'horizon B₁₂ (101 - 120 cm) est encore de couleur rouge 2,5 YR 4/8, apparemment pas humifère, il a une texture argilo-argileuse avec 30 à 35 % d'argile et renferme 10 à 15 % d'éléments grossiers (concrétions manganiferriques et graviers). La structure de cet horizon est massive avec un débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux, contenant de

rare racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un bon indice de drainage estimé à 1,5.



Fosse pédologique sur le site de Mayo (*Manganiferic plinthic ferralsol*)

Annexe 11: Description des sols de la région du Lôh-djiboua

➤ Site de Divo

Le profile pédologique décrit sur le site de Divo est composé de 6 horizons à savoir :

- l'horizon A₁₁ (0 - 11 cm) est de couleur brun (7,5 YR 4/2), humifère, de texture limono-sableuse avec 15 à 20 % d'argile et contient 10 à 15 % de concrétions manganiferriques. La structure de cet horizon est grumeleuse à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux. Il est traversé par de nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale et possède un bon indice de drainage d'une valeur de 1,1.

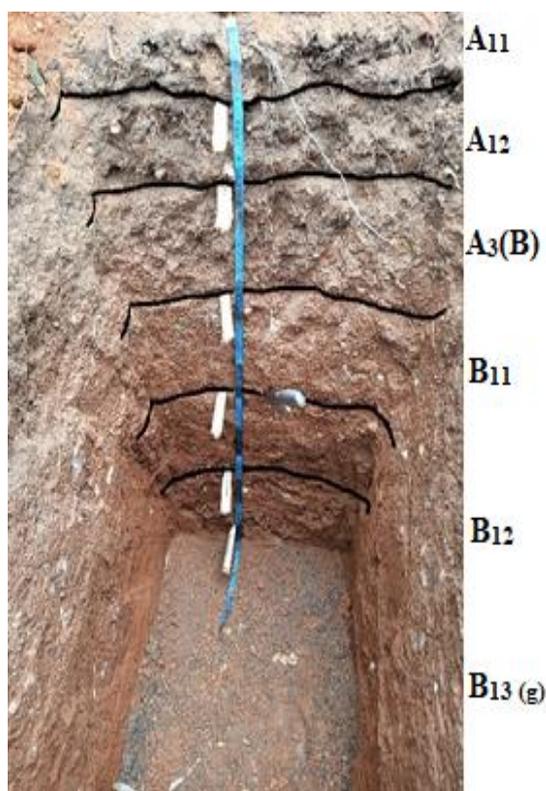
- l'horizon A₁₂ (11 - 22 cm) de couleur brun 7,5 (YR 4/2) est humifère et a une texture limono-sableuse avec 20 % d'argile. Il contient 15 à 20 % de concrétions manganiferriques. La structure est grumeleuse à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, meuble et poreux, contenant d'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale. L'indice de drainage de cet horizon est bon (1,2).

- l'horizon A₃(B) (22 - 42 cm) de couleur brun rougeâtre (5 YR 5/4) est peu humifère. Sa texture est argilo-limono-sableuse avec 25 à 30 % d'argile. Le taux de concrétions manganiferriques est estimé à 25 à 30 %. La structure est massive polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux. Quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale apparaissent dans cet horizon. Il a un bon indice de drainage évalué à 1,4.

- l'horizon B₁₁ (42 - 67 cm) est de couleur rouge jaunâtre (5 YR 5/6). Il n'est pas humifère et a une texture argilo-limono-sableuse avec 30 % d'argile et un taux de concrétions manganiferriques de l'ordre de 30 à 35 %. La structure ici, est massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux. Les racines sont rares. L'indice de drainage est moyen (1,7).

- l'horizon B₁₂ (67 - 95 cm) a une couleur rouge (2,5 YR 5/6). Il n'est pas humifère et présente une texture argilo-limono-sableuse avec 35 % d'argile et un taux de concrétions manganiferriques de 25 à 30 %. Cet horizon a une structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux. Les racines sont rares et l'indice de drainage est moyen (1,8).

- l'horizon B_{13(g)} (95 - 120 cm) de couleur rouge (2,5 YR 5/6) avec des taches de couleur jaune olive (2,5 Y 6/8), n'est pas humifère et a une texture argilo-sableuse avec 35 % d'argile et un taux de concrétions manganifériques allant de 25 à 30 %. Cet horizon a une structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux et contient de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et révèle un mauvais drainage avec un indice de l'ordre de 3.



Fosse pédologique sur le site de Divo (*Manganiferric pseudo-gleyic plinthic ferralsol*)

➤ Site de Lakota

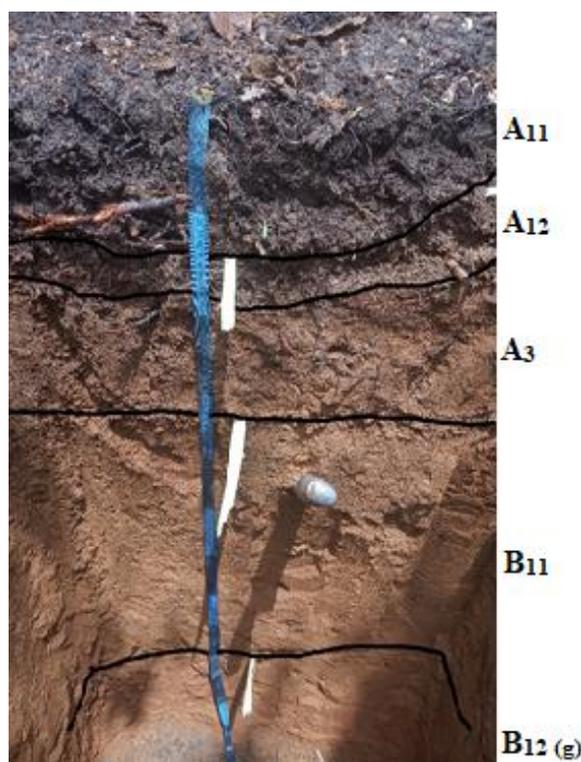
Sur le site de Lakota, le profil pédologique réalisé présente 5 horizons qui sont :

- l'horizon superficiel A₁₁ (0 - 15/20 cm) est de couleur brun grisâtre très foncé (10 YR 3/2) et très humifère. Il a une texture sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile, une structure grumeleuse à débit polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux et contient de très nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale, Son drainage est estimé à 1.
- l'horizon A₁₂ (15/20 - 23/24 cm) a une couleur brun jaunâtre foncé (10 YR 4/4). Il est humifère et présente une texture sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile. Sa structure est grumeleuse à débit polyédrique à tendance grumeleuse, peu cohérent et poreux. D'assez nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale sont présents dans cet horizon et présente un bon indice de drainage de valeur 1,1.

- l'horizon A₃ (23/24 - 40 cm) de couleur brun jaunâtre (10 YR 5/6), peu humifère, de texture sablo-argileuse avec 20 à 25 % d'argile, de structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, peu cohérent et poreux, contient quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale et donne un bon indice de drainage de valeur 1,2.

- l'horizon B₁₁ (40 - 91 cm) a une couleur brun jaunâtre (10 YR 5/8). Il n'est pas humifère. Il a une texture argilo-sableuse avec 25 à 30 % d'argile, une structure massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et poreux, contenant de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un indice de drainage moyen 1,5.

- l'horizon B_{12(g)} (91 - 120 cm) est de couleur brun jaunâtre (10 YR 5/8) avec des taches de couleur jaune olive (2,5 Y 6/8). Il n'est pas humifère. Sa texture est argilo-sableuse avec 30 à 35 % d'argile. La structure est massive à débit polyédrique à tendance sub-anguleuse, cohérent et peu poreux. L'horizon révèle de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale et un mauvais indice de drainage de valeur 3,1.



Fosse pédologique sur le site de Lakota (*Pseudo-gleyic Ferralsol*)

➤ Site de Guitry

Le profil pédologique réalisé sur le site de Guitry montre 4 horizons, à savoir :

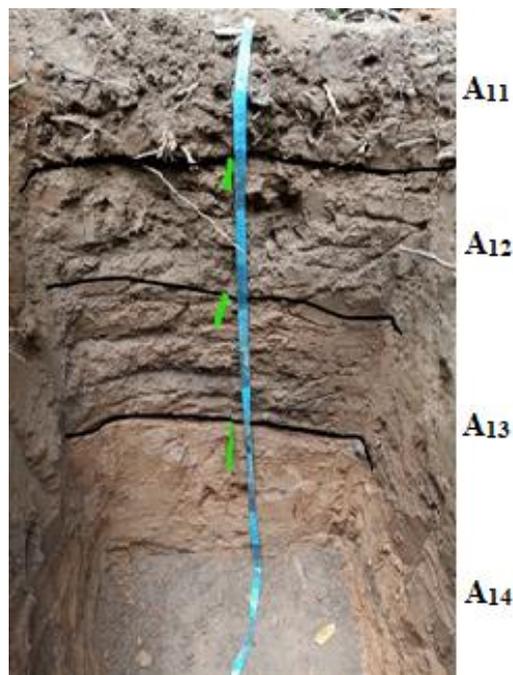
- l'horizon A₁₁ (0 - 20 cm) a une couleur brun grisâtre (10 YR 5/2) et est humifère. Il a une texture sablo-argileuse avec 10 à 15 % d'argile. La structure est grumeleuse peu nette à débit

polyédrique à tendance grumeleuse, meuble et très poreux. De nombreuses racines à orientation horizontale à sub-horizontale sont visibles. Il a un bon indice de drainage de valeur égale 1,1.

- l'horizon A₁₂ (20 - 50 cm) est de couleur brun grisâtre (10 YR 5/2), peu humifère, de texture sablo-argileuse avec 5 à 10 % d'argile, de structure particulaire à tendance polyédrique, très meuble et très poreux. Quelques racines à orientation horizontale à sub-horizontale sont vues dans cet horizon. Il a un bon indice de drainage de valeur égale à 1.

- l'horizon A₁₃ (50 - 80 cm) de couleur brun (10 YR 5/3) n'est pas humifère. Il présente une texture sablo-argileuse avec 5 à 10 % d'argile, une structure particulaire à tendance polyédrique, meuble et très poreux et renferme de rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale. Il a un bon indice de drainage estimé à 1.

- l'horizon de profondeur A₁₄ (80 - 120 cm) a une couleur jaune brunâtre (10 YR 6/6). Il n'est pas humifère et présente une texture sablo-argileuse avec 15 à 20 % d'argile. La structure est particulaire à tendance polyédrique, peu cohérent et poreux. De rares racines à orientation horizontale à sub-horizontale sont observables dans cet horizon. Il a également un bon indice de drainage qui est égal à 1,1.



Fosse pédologique sur le site de Guitry (*Arenosol albique*)

Annexe 12 : Caractéristiques physiques des sols de la Nawa

Paramètres	Soubré						Meagui						Mayo					
	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV (%)	p
Granulométrie																		
Argile (%)	9,9b (1,1)	27,9a (1)	27,8a (1,5)	25,8a (1,6)	10,43	<,0001	5,7b (0,3)	5,2b (0,6)	9a (0,5)	9,6a (0,4)	12,05	0,0005	31,2a (1)	20,3c (0,6)	25,9b (0,9)	19,7c (0)	6,00	0,0001
Limon (%)	18,5b (0,7)	24,4a (1,9)	18,2b (0,7)	18,8b (0,7)	10,18	0,0005	14a (1,7)	12,7a (0,3)	13a (0,7)	13,3a (0,3)	12,85	0,8106	14,6b (0,9)	16,5ab (0,4)	18,2a (0,6)	16,8ab (0,2)	6,44	0,0212
Sable (%)	71,6a (1,4)	47,7c (0)	54b (2,3)	55,4b (0,9)	4,70	<,0001	80,3a b(1,4)	82,1a (0,6)	78bc (1,3)	77,1c (0,8)	1,99	0,0030	54,2b (0,5)	63,2a (0,3)	55,9b (0)	63,5a (0,5)	1,97	<,0001
Densité apparente																		
Strate 1 (0-10 cm)	1,8a (0,1)	1,7a (0,1)	1,7a (0)	1,8a (0)	7,27	0,5175	1,4b (0)	1,6a (0)	1,2c (0)	1,4b (0)	1,46	0,0002	1,8a (0)	1,4a (0,1)	1,2a (0,1)	1,7a (0,4)	21,86	0,3615
Strate 2 (10-20 cm)	1,9a (0,1)	1,6a (0,4)	1,8a (0,2)	1,8a (0,2)	22,73	0,9327	1,7a (0,1)	1,9a (0,2)	1,5a (0,2)	1,5a (0,2)	17,25	0,4586	2,1a (0,1)	1,7a (0,2)	1,6a (0)	1,8a (0)	11,91	0,2876
Strate 3 (20-30 cm)	1,9a (0,3)	1,9a (0)	1,6a (0,3)	2a (0)	18,98	0,7579	1,8a (0)	1,9a (0,2)	1,7a (0,2)	1,8a (0,1)	12,49	0,8580	1,8a (0,1)	1,8a (0,2)	1,5a (0)	1,7a (0,2)	16,24	0,5754

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Annexe 13 : Caractéristiques physiques des sols du Lôh-Djiboua

Paramètres	Divo						Lakota						Guitry					
	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV (%)	p
Granulométrie																		
Argile (%)	19c (1,1)	31,8b (1)	34,1b (1,5)	45,4a (1,6)	18,65	0,0005	38,1a (0,3)	34,1a (0,6)	30,3a (0,5)	30a (0,4)	22,65	0,4148	8,5b (1)	10,9a (0,6)	7,1b (0,9)	6,6b (0)	16,27	0,0031
Limon (%)	16,6b (0,7)	20,4a (1,9)	18,6ab (0,7)	20,9a (0,7)	7,66	0,0054	25,9a (1,7)	19,9a (0,3)	21,1a (0,7)	19,2a (0,3)	19,32	0,1526	12,6a (0,9)	11,2a (0,4)	15,9a (0,6)	14,4a (0,2)	17,75	0,0769
Sable (%)	64,4a (1,4)	47,8b (1)	47,3b (2,3)	33,7c (0,9)	11,76	<,0001	36a (1,4)	46a (0,6)	48,6a (1,3)	50,8a (0,8)	19,86	0,1529	78,9a (0,5)	77,9a (0,3)	77a (1,0)	79a (0,5)	4,41	0,8386
Densité apparente																		
Strate 1 (0-10 cm)	1,6a (0)	1,6a (0)	1,6a (0)	1,4a (0,1)	8,95	0,6521	1,5a (0,2)	1,4a (0,1)	1,4a (0)	1,3a (0,3)	21,37	0,9354	1,5a (0)	1,6a (0,1)	1,6a (0)	1,3a (0,1)	9,51	0,3863
Strate 2 (10-20 cm)	1,7a (0)	1,7a (0,2)	1,7a (0)	1,6a (0)	10,76	0,9599	1,5a (0,3)	1,8a (0,2)	1,7a (0)	1,7a (0,2)	20,09	0,8147	1,6a (0,1)	1,7a (0,1)	1,8a (0,2)	1,8a (0,1)	13,69	0,7005
Strate 3 (20-30 cm)	2ab (0)	2,1a (0)	1,7b (0)	1,8ab (0)	4,22	0,0324	1,6a (0,1)	1,8a (0,1)	1,8a (0,2)	2,1a (0)	13,72	0,4488	1,8a (0,1)	1,8a (0,1)	2,1a (0)	1,7a (0,2)	13,09	0,3884

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

Annexe 14 : Caractéristiques chimiques des sols de la Nawa

	Soubré						Méagui						Mayo					
	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV (%)	p
pHeau	6,4c (0,1)	7,2a (0,1)	6,5c (0,1)	6,9b (0,1)	2,96	<,0001	6,5c (0,2)	6,8c (0,2)	7,3b (0)	7,6a (0)	3,03	0,0016	6,1b (0)	6,9a (0)	6,8a (0)	6,8a (0)	1,22	<,0001
V (%)	38,3c (4,4)	72,4a (0,4)	58,4b (2,3)	54,9b (1,7)	8,23	<,0001	25,1c (0,6)	22,6c (0,7)	61,2a (2,4)	51,4b (1,6)	6,70	<,0001	26,4c (0,2)	44,1b (0,6)	43,6b (0,8)	46,8 (1,3)	3,04	<,0001
MOS (g.kg ⁻¹)	24c (0)	49,8a (7)	37,8b (2)	32,7bc (0)	18,44	0,001	12c (0,1)	13,7c (0,1)	27,5a (0,3)	20,6b (0,1)	21,91	0,0058	27b (0,1)	29b (0,1)	34a (0,1)	36a (0,1)	8,80	0,0026
COS (g.kg ⁻¹)	14c (3)	29a (4)	22b (1)	19bc (0)	18,44	0,001	7c (0,1)	8c (0,1)	16a (0,2)	12b (0,1)	21,81	0,0056	16b (0)	17b (0,2)	20a (0,1)	21a (0,1)	8,82	0,0027
N (g.kg ⁻¹)	1,3c (0)	2,6a (0)	2,4 (0)	1,8b (0)	14,39	<,0002	0,6b (0)	0,8b (0)	1,5a (0)	1,2a (0)	19,51	<,0001	0,1b (0)	0,1b (0,1)	0,2a (0)	0,2a (0,5)	10,18	0,0007
C/N ratio	10,6a (1,8)	11a (0,3)	9,2a (0,1)	10,6a (0,3)	12,92	0,259	11,9a (1,1)	10a (1,2)	11a (2,4)	10a (3)	19,79	0,7486	12,3a (1,4)	10,6 a (0,6)	10,8a (1,6)	10,5a (0,8)	15,57	0,4492
P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹)	0b (0)	11,8a (0,9)	0b (0)	0b (0)	33,58	<,0001	0,6d (0)	13,3a (1,2)	5,2c (0,3)	10,5b (0,9)	20,68	<,0001	0b (0)	36a (1,4)	0b (0)	27a (6,7)	43,31	<,0001
K ⁺ (g.kg ⁻¹)	0,3b (0)	0,5a (0)	0,4b (0)	0,4b (0)	13,88	<,0001	0,2b (0)	0,3b (0)	0,5a (0)	0,4ab (0)	20,82	0,0007	0,1c (0)	0,6a (0)	0,2b (0)	0,2b (0)	10,78	<,0001
Ca ²⁺ (g.kg ⁻¹)	3,8c (0,5)	17,7a (0,1)	9,3b (0,6)	8,5b (0,2)	8,34	<,0001	2,8b (0)	2,4b (0,1)	7,8a (0,3)	7,4a (0,2)	7,82	<,0001	3,5c (0)	5,9b (0)	6,7a (0,1)	6,2b (0,1)	3,10	<,0001
Mg ²⁺ (g.kg ⁻¹)	1,1d (0)	2,9a (0)	2,3b (0)	2,2c (0)	4,56	<,0001	0,5b (0)	0,6b (0)	1a (0)	1,1a (0,1)	15,22	0,06	0,8c (0)	1,4b (0,2)	1,6b (0)	2a (0,1)	11,82	<,0001
Bore (ppm)	0,1b (0)	0,5a (0)	0,2b (0)	0,2b (0)	4,07	0,0213	0,2a (0)	0,2a (0)	0,2a (0)	0,3a (0)	7,12	0,5182	0,1a (0)	0,2a (0)	0,3a (0)	0,2a (0)	5,67	0,2415
Zinc total (ppm)	17,2a (2,3)	20,4a (2,3)	20,4a (2,1)	23a (1,1)	9,47	0,1058	12b (0,5)	13,5b (1,1)	19,1a (1,8)	17,3a (0,9)	12,69	0,0086	19,2c (0,9)	32,2b (4,1)	26,5b (1)	64,3a (1,8)	12,18	<,0001
(K ⁺ x100) /S	2,5b (0,1)	6,6a (0,1)	3,1b (0,1)	2,9b (0,2)	10,98	<,0001	4,9a (1,2)	9,4a (1,5)	5,1a (0,4)	6,6a (0,6)	12,78	0,0529	3b (0,3)	7,7a (0,5)	2,8b (0,2)	2,8b (0)	14,42	<,0001
(Ca ²⁺ x100)/S	83,3b (0,5)	83,3a (0,5)	76,7b (1,2)	77b (0,2)	3,33	0,0038	72c (1,5)	78,7b (1,6)	83,6a (0,7)	82,6a (0,3)	2,65	0,0008	76,6a (0,4)	74,9a (1,9)	78,4a (0,5)	73,2a (0,7)	1,27	0,0554
(Mg ²⁺ x100)/S	13,9b (0,4)	13,9b (0,4)	19,7a (1,2)	20a (0,3)	5,71	0,0103	13,6b (1,6)	17,8a (1,1)	10,9b (0,7)	11,8b (0,4)	13,92	0,0087	18,8b (0,4)	17,3b (2,4)	18,2b (0,4)	23,6a (0,8)	11,72	0,0388
(S+6,15)/N _t	5,6b (1,1)	8,6a (1,1)	6,4b (0,5)	8,5a (0,5)	9,31	0,0229	7,3a (1)	4,8b (0,1)	6,7ab (0,5)	8,1a (0,5)	8,24	0,0432	3,7c (0,2)	5,7a (0,3)	4,9ab (0,3)	4,5ab (0,1)	11,5	0,0130

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn, T3: NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn.

Annexe 15 : Caractéristiques chimiques des sols du Lôh-Djiboua

Paramètre	Divo						Lakota						Guitry					
	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV(%)	p	T0	T1	T2	T3	CV (%)	p
pH _{eau}	6,3c (0,1)	6,7bc (0,1)	6,8bc (0,1)	7,5a (0,1)	2,10	<,0001	6,2c (0,2)	6,5c (0,2)	7b (0)	7,4a (0)	3,72	<,0001	6,4c (0)	7b (0,1)	7,6a (0)	7,2b (0)	1,95	0,0005
V (%)	46,5c (4,4)	56,5b (0,4)	53,7c (2,3)	70,6a (1,7)	9,78	<,0001	35,3b (0,6)	50,8a (0,7)	55,2a (2,4)	51,5a (1,6)	14,25	0,0069	39,1b (0,2)	41,5b (0,6)	53,2a (0,8)	44,8b (1,3)	9,61	0,0032
MOS (g.kg ⁻¹)	24,1b (0,5)	31ab (0,7)	34,5ab (0,2)	43,1a (0)	24,16	0,0376	18,9b (0,1)	34,5a (0,1)	37,9a (0,3)	43,1a (0,1)	24,53	0,0080	15,5b (0,1)	17,2ab (0,1)	20,6a (0,3)	18,9ab (0,1)	13,48	0,0459
COS (g.kg ⁻¹)	14c (0,3)	18ab (0,4)	20ab (0,1)	25a (0)	24,18	0,0382	11b (0)	20a (0,1)	22a (0,2)	25a (0,1)	24,60	0,0081	9b (0,1)	10ab (0,1)	12a (0,2)	11ab (0,1)	13,46	0,0463
N (g.kg ⁻¹)	1,4b (0)	1,8b (0)	2ab (0)	2,5a (0)	18,48	0,0069	0,9c (0)	1,8b (0)	2,2a (0)	2,3a (0)	17,71	0,0020	1a (0)	1,4a (0,1)	1,4 a (0)	1,1a (0,5)	24,48	0,1853
C/N ratio	10,2a (1,8)	11,3a (0,3)	10,9a (0,1)	10,3a (0,3)	46,61	0,9880	12,2a (1,1)	11,1a (1,2)	10a (2,4)	10,9a (3)	43,65	0,8847	9,3a (1,4)	7,4a (0,6)	9a (1,6)	10,1a (0,8)	21,77	0,2848
P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹)	0c (0)	9,4b (14)	6bc (0)	21,1a (0)	17,32	<,0001	4b (0,5)	12,7a (17)	13,9a (3,7)	1,8b (12,7)	24,48	<,0001	11d (9,5)	45,8a (1)	40,1b (0)	32,9c (0)	9,23	<,0001
K ⁺ (g.kg ⁻¹)	0,4ab (0)	0,4ab (0)	0,3b (0)	0,5a (0)	25,54	0,0488	0,3b (0)	0,3b (0)	0,3b (0)	0,7a (0,1)	25,07	0,0002	0,4a (0)	0,4a (0)	0,5a (0)	0,4a (0)	14,86	0,4158
Mg ²⁺ (g.kg ⁻¹)	6,7c (0,5)	9,7b (0,1)	7,3c (0,6)	14,2a (0,2)	7,71	<,0001	4,3c (0)	7,7b (0,1)	12,4a (0,2)	8,2b (0,2)	11,44	<,0001	5c (0)	6,3b (0) b	7,4a (0,1)	5,6bc (0,1)	9,33	0,0005
Bore (ppm)	1,2c (0)	2b (0)	1,6b (0)	2,8a (0)	13,2	<,0001	1c (0)	1,7b (0,1)	2,1ab (0,1)	2,5a (0,1)	16,03	<,0001	0,7bc (0)	0,9ab (0,2)	0,6a (0)	1a (0,1)	15,11	0,0030
Zinc total (ppm)	0,1b (0)	0,3ab (0)	0,3ab (0)	0,4a (0,1)	5,84	0,0317	0,1b (0)	0,1b (0)	0,4a (0)	0,2ab (0)	4,37	0,0354	0,2a (0)	0,3a (0)	0,2 (0)	0,3a (0)	5,02	0,683
(K+x100) /S	14,8c (0,7)	21,2b (1,9)	19,8b (0,9)	29,2a (2,5)	6,36	0,0016	16,7b (1,8)	21,5a (2,5)	25,7a (2,2)	25a (1,4)	8,59	0,045	17,4a (1,5)	19,6a (1,5)	17,2a (0,4)	17,1a (2,4)	8,09	0,7009
(Ca ²⁺ x100) /S	2,5a (0)	4,1a (0,1)	3,1a (0,8)	3,9a (0,4)	11,89	0,209	2b (0,4)	5ab (1,5)	2,7b (0,2)	6,5a (0,9)	15,91	0,0172	5,1a (0,5)	6,7a a	0,75,3a (0,3)	5,8a (0,2)	7,14	0,7378
(Mg ²⁺ x100) /S	77a (0,7)	81,9a (1,2)	80,7a (1,8)	81a (1,4)	1,46	0,5922	75,7b (0,7)	77,2ab (2)	80,3a (2,1)	78,1ab (0,5)	1,7	0,0265	81,1b (2)	82,4ab (0,4)	86,4a (1,1)	79,5b (0,7)	1,29	0,0227
(S+6,15) /N total	14a (0,5)	16,6a (1,4)	17,7a (1,3)	15,6a (1,4)	6,5	0,2667	16,5a (0,6)	17,6a (3,1)	16,5a (1,9)	20a (0,9)	9,57	0,5958	12,2a (2)	11,7a (0,4)	7,1b (0,6)	14a (0,8)	8,72	0,0127

Nb : Les moyennes suivies des mêmes lettres dans une ligne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

T0: témoin absolu; T1: NPK 0-23-19 + 10 CaO + 5 MgO; T2: NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn et T3: NPK 3,5-14-7 + 21 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn

RÉSUMÉ

En Côte d'Ivoire, la dégradation et la baisse de la fertilité des sols sous cacaoyères incitent les cacaoculteurs à faire usage des fumures minérales pour les y restituer. Cette pratique suscite des inquiétudes au niveau de la biologie du sol et de l'environnement. C'est pourquoi la présente étude a été menée durant 3 années avec pour objectif d'identifier des fertilisants minéraux susceptibles d'enrichir les sols sous cacaoyers, d'impacter l'activité biologique et le stock de carbone du sol. Les travaux ont été menés dans 6 cacaoyères équitablement répartie dans les régions de la Nawa et du Lôh-Djiboua. Dans chaque cacaoyère, le dispositif expérimental est composé de 4 blocs complets de Fisher avec 4 traitements : T0, T1, T2 et T3. T0 est le témoin sans engrais et T1 et T2 sont respectivement NPK 0-23-19 (F1) et NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn (F2). T3 se présente sous deux formulations qui diffèrent par les doses d'azote, de phosphore et de potassium NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn correspondant à F3 et F4 où NPK= 3,5-14-7. La densité, la diversité de la macrofaune du sol et la vitesse de décomposition des feuilles de cacaoyers ont permis de mesurer l'activité biologique. Pour les deux premières variables l'on s'est servi de 96 monolithes de terre de 25 x 25 x 30 cm³ issu de l'horizon 0-30 cm ; et pour la troisième variable autant de quadrats grillagés de 1 m² ont utilisés. Dans chaque parcelle élémentaire le stock de carbone a été déterminé pour les horizons 0 - 10, 10 - 30 et 0 - 30 cm. Les résultats montrent que les variables caractéristiques de la macrofaune du sol et la décomposition des litières sont significativement améliorées dans les sols fertilisés dans les deux zones agro-écologiques étudiées. En effet, la richesse spécifique varie entre 3,9±0,4 et 4,6±0,5 espèces dans les sols témoins contre 6,7±0,4 et 7,6±0,6 espèces pour les autres sols. Il en est de même de l'indice de Shannon qui est compris entre 1,5 et 1,6±0,1 dans les sols témoins contre 2,1±0,2 et 2,3±0,1 dans les autres sols. Quant à la densité de la macrofaune, elle diffère seulement dans la Nawa où elle vaut 124±24,2 ind.m⁻² dans les sols non fertilisés, tandis qu'elle varie entre 247,1±34 et 317±65 ind.m⁻² dans les sols fertilisés. En outre, la décomposition des feuilles de cacaoyers a été plus rapide dans les sols fertilisés. Contrairement à l'activité biologique, les stocks de carbone du sol ne diffèrent pas significativement entre les types de traitement. Dans l'ordre des traitements T0, T1, T2 et T3, les teneurs en carbone sont de 4379,6 ; 5517,3 ; 3676,6 et 4747,5 gC.m⁻² dans la Nawa et 4716 ; 5180,7 ; 5160,5 et 5386,8 gC.m⁻² dans le Lôh-Djiboua. Ces résultats montrent qu'il est possible de durabiliser la cacaoculture en adoptant la fertilisation minérale, car les valeurs obtenues sont comparables à celles d'un système agroforestier à base de cacaoyers.

Mots clés : Impact - Fertilisation minérale - Activité biologique - Stock carbone – Sol - Côte d'Ivoire

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, the degradation and decline in soil fertility under cocoa farms has prompted cocoa farmers to use mineral fertilizers to restore the soil. This practice raises concerns about soil biology and the environment. This is why the present study was carried out during 3 years with the objective of identifying mineral fertilizers likely to enrich soils under cocoa trees, to impact biological activity and the soil carbon stock. The work was carried out in 6 cocoa farms equally distributed in the Nawa and Lôh-Djiboua regions. In each cocoa farm, the experimental set-up was composed of 4 complete Fisher blocks with 4 treatments: T0, T1, T2 and T3. T0 is the control without fertilizer and T1 and T2 are NPK 0-23-19 (F1) and NPK 0-15-15 + 17 CaO + 5 MgO + 1 B₂O₃ + 0,5 Zn (F2) respectively. T3 is presented in two formulations that differ in the nitrogen, phosphorus and potassium doses, NPK 4-10-10 + 19 CaO + 4 MgO + 0,8 B₂O₃ + 0,3 Zn corresponding to F3 and F4 where NPK = 3.5-14-7. The density and diversity of the soil macrofauna and the rate of decomposition of cocoa leaves were used to measure biological activity. For the first two variables, 96 soil monoliths of 25 x 25 x 30 cm⁻³ from the 0-30 cm horizon were used; and for the third variable, the same number of gridded quadrats of 1 m² were used. In each elementary plot the carbon stock was determined for the 0 - 10, 10 - 30 and 0 - 30 cm horizons. The results show that the characteristic variables of soil macrofauna and litter decomposition are significantly improved in the fertilized soils in the two agro-ecological zones studied. Indeed, the specific richness varies between 3.9±0.4 and 4.6±0.5 species in the control soils against 6.7±0.4 and 7.6±0.6 species for the other soils. The same is true for the Shannon index, which is between 1.5 and 1.6±0.1 in the control soils compared to 2.1±0.2 and 2.3±0.1 in the other soils. Macrofaunal density differed only in Nawa, where it was 124±24.2 ind.m⁻² in unfertilized soils, while it varied between 247.1±34 and 317±65 ind.m⁻² in fertilized soils. In addition, decomposition of cocoa leaves was more rapid in fertilized soils. Unlike biological activity, soil carbon stocks did not differ significantly between treatment types. In the order of treatments T0, T1, T2 and T3, the carbon contents are 4379.6; 5517.3; 3676.6 and 4747.5 gC.m⁻² in the Nawa and 4716; 5180.7; 5160.5 and 5386.8 gC.m⁻² in the Lôh-Djiboua. These results show that it is possible to make cocoa production sustainable by adopting mineral fertilization, as the values obtained are comparable to those of an agroforestry system based on cocoa trees.

Key words: Impact - Mineral fertilization - Biological activity - Carbon stock - Soil - Côte d'Ivoire