

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

UNION-DISCIPLINE-TRAVAIL

UNIVERSITE NANGUI ABROGOUA



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

N° d'ordre : 159

UFR DES SCIENCES DE LA NATURE

Année Académique 2012-2013

THESE UNIQUE

Présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE NANGUI ABROGOUA

Spécialité :

ECOLOGIE DES SOLS

Par

GUEI Arnauth Martinez

THEME

**DIVERSITE BIOLOGIQUE ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES
DES PEUPELEMENTS DE VERS DE TERRE EN ZONE DE
FORÊT SEMI-DECIDUE DE CÔTE D'IVOIRE**

Soutenu le **06 Juillet 2013** devant le jury composé de :

M. ZORO-Bi Arsène	Professeur Titulaire	Université Nangui Abrogoua	Président
M. TONDOH E. Jérôme	Maître de Conférences	Université Nangui Abrogoua	Directeur de thèse
M. MAMADOU Dagnogo	Professeur Titulaire	Université Nangui Abrogoua	Rapporteur
M. KOUASSI Philippe	Professeur Titulaire	Université Félix H. Boigny	Rapporteur
M. KONATE Souleymane	Maître de Conférences	Université Nangui Abrogoua	Examineur
M. DOUMBIA Mamadou	Maître de Conférences	Université Nangui Abrogoua	Examineur

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à :

La mémoire de mon oncle, **SIA** Gueye Gustave trop tôt rappelé auprès du Seigneur.

Der Lehrer, repose en paix...

Mon adorable petit garçon **GUEI** Peniel Marc Aurel

Mon Père **GUEI** Bruno

Ma Mère **NANTOH** Suzanne

Trouvez ici l'honneur que je vous dois, vous n'avez pas failli à votre devoir.

Ce résultat en est la preuve. Merci pour votre soutien et vos prières.

Mes oncles **NEMEGNAN** Emile et **GNONKOUÉ** Didier

Tout le soutien que vous m'avez apporté n'est pas resté vain.

Mes frères : Florent, Yves, Olivier, Ange, Aristide, Onésine,

Mes sœurs : Viviane, Florence, Elise, Anita, Marina, Nadège, Neige,

Votre contribution et vos prières m'ont soutenu pendant tout ce travail.

Merci pour tout.

SOYEZ TOUS BENIS ET COMBLES DES GRACES DE L'ETERNEL DIEU

TOUT PUISSANT.

REMERCIEMENTS

Cette thèse a entièrement bénéficié du soutien financier du projet «Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity» (CSM-BGBD). Je tiens à remercier la coordination internationale du projet CSM-BGBD pour avoir rendu possible ce travail.

Mes sincères remerciements au Professeur **TANO** Yao à double titre. D'abord en votre qualité de Coordonnateur national du projet CSM-BGBD, vous avez accepté mon intégration au sein du groupe de travail « Qualité biologiques des sols ». Puis au titre de Président de l'Université Nangui Abrogoua, vous avez autorisé mon inscription à l'école doctorale de l'UFR-SN. Soyez sincèrement remercié Professeur pour votre grande disponibilité et vos sollicitudes inouïes.

Je remercie Professeur **DJE** Yao et Docteur **TIHO** Seydou, respectivement Doyen et Vice-doyen de l'UFR des Sciences de la Nature pour leur sollicitude dans la résolution des questions administratives.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance au Professeur **ZORO-BI** Arsène qui a accepté de présider le jury de ce travail de thèse, et aux Professeurs **KONATE** Souleymane et **DOUMBIA** Mamadou qui ont bien voulu examiner ce mémoire.

Je tiens sincèrement à remercier le Professeur **KOUASSI** Philippe de l'Université Félix Houphouet Boigny, les Professeurs **OTCHOUMOU** Atcho et **MAMADOU** Dagnogo, respectivement Président du Conseil Pédagogique de l'UFR-SN et Président du Conseil Scientifique dudit UFR, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse. Leurs critiques et remarques pertinentes m'ont permis d'aboutir à la version améliorée de ma thèse.

J'exprime ma reconnaissance et mon infinie gratitude à l'endroit du Professeur **TONDOH** E. Jérôme qui assure la direction de cette thèse. Malgré vos multiples occupations, vous avez toujours su accorder une importance particulière à ce travail de recherche, depuis la formulation du sujet jusqu'aux derniers jours de la correction du présent document. Vous avez su m'aider à construire la réflexion et à m'inculquer l'amour du travail bien fait. Professeur, merci pour vos leçons de rigueur, de savoir-faire, de ponctualité.

Ma gratitude va aussi au Professeur **ANGUI** Pascal Téhua, Coordonnateur National Adjoint dudit projet.

Mes sincères remerciements à l'endroit du Docteur **TAHOUX** Martine, Directrice du Centre de Recherche en Ecologie (CRE), pour m'avoir accueilli au CRE, un cadre propice de travail.

Je suis reconnaissant aux Docteurs **KONE** W. Armand, **N'DRI** Julien et **ASSI** Hervé pour leurs conseils très avisés lors de la rédaction.

Je ne saurais taire les inestimables services et soutiens que m'ont apportés les étudiants de mon entourage lors du traitement des données et de la rédaction. Il s'agit en l'occurrence de **DJEKE** Mathieu, **TRA** Bi, **EDOUKOU** Flavien, **KASSI** serges, **BOSSO** Marcel, **GOLI** Siagbé, **BAIDAI** Yannick, **GBAPA** Ange, **TANO** Ekra, **KABLAN** Aurore, **MELEJDE** Hermanne, **MANI**-Bi.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer mon infinie gratitude à mon petit cercle d'amis : **KONAN** Marcel, **KOUAKOU** Théodore, **KOKORE** Baudouin, **N'GBALA** Fulbert, **KOFFI** Toungbo D. Michel et **YAO** D. Bernard. Vous avez su entretenir en moi l'espoir et le courage d'arriver au bout de ce parcours aux multiples lacets.

Le terrain requiert toujours la participation importante des personnes. Alors, je voulais remercier les techniciens du village Goulikao, **N'GUESSAN** Charly, **ANI** Marie Pierre, **KAKOU** Olivier pour leur coup de main acharné au cours des travaux de terrain et pour m'avoir si souvent renseigné sur l'historique des parcelles. Merci aussi à Eric, le technicien N°1, ce n'était pas du terrain, mais cela s'en rapprochait...Merci particulièrement à Madame **KOUASSI** Henriette pour ses plats succulents.

Ma dernière phrase de remerciement s'adresse à ma compagne **KOUASSI** Carole, merci d'avoir été à mes côtés pendant cette aventure, d'avoir si bien su me comprendre ; merci pour notre adorable garçon.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	xv
RESUME.....	xvii
ABSTRACT	xvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I.1. BIODIVERSITE : CONCEPT ET ENJEUX.....	6
I.1.1. Emergence du concept de biodiversité	6
I.1.2. Biodiversité : de la notion de "conservation" à la notion de "services"	7
I.1.3. Biodiversité du sol et fonctionnement de l'écosystème.....	8
I.1.4. Diversité de la faune du sol : cas des vers de terre	9
I.2. FONCTIONS ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES DES VERS DE TERRE.....	11
I.2.1. Création de galeries.....	11
I.2.2. Alimentation et rejets	12
I.2.3. Création de middens	12
I.3. VERS DE TERRE ET FONCTION D'INDICATEURS BIOLOGIQUES DE LA QUALITE DU SOL	14
I.3.1. Concept de qualité des sols	14
I.3.2. Indicateurs de la qualité des sols.....	15
I.3.3. Vers de terre comme indicateurs de la qualité des sols	17
I.4. INDICATEURS SYNTHETIQUES DE LA QUALITE DES SOLS : CAS DE L'INDICE GENERAL DE LA QUALITE DES SOLS (IGQS).....	18
CHAPITRE II: MILIEU D'ETUDE.....	21
II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	22
II.2. CLIMAT	22
II.2.1. Pluviométrie.....	22
II.2.2. Température et durée d'insolation	25
II.2.3. Humidité atmosphérique.....	25
II.3. SOLS	25
II.4. VEGETATION.....	27
II.5. POPULATIONS HUMAINES ET PRATIQUES CULTURALES	27
II.5.1. Populations	27

II.5.2. Dynamique démographique.....	28
II.5.3. Pratiques culturelles.....	28
II.5.3.1. Cultures de rente.....	28
II.5.3.2. Cultures vivrières.....	29
II.6. TYPES D'USAGE DES SOLS	29
II.7. PARCELLES EXPERIMENTALES	33
CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES.....	34
III.1. MATERIEL.....	35
III.1.1. Matériel d'étude de la diversité biologique des vers de terre.....	35
III.1.2. Matériel d'étude des paramètres physicochimiques des sols et d'inventaires floristiques.....	35
III.1.2.1. Matériel végétal.....	35
III.1.2.2. Matériel technique.....	35
III.1.2.3. Matériel chimique.....	35
III.1.3. Matériel d'étude des services écosystémiques des vers.....	36
III.1.3.1. Matériel végétal.....	36
III.1.3.2. Matériel animal	36
III.1.3.3. Matériel technique.....	38
III.1.3.4. Matériel chimique.....	38
III.2. METHODES	39
III.2.1. Etude de la diversité biologique des vers de terre	39
III.2.1.1. Stratégie d'échantillonnage des vers de terre	39
III.2.1.2. Echantillonnage	39
III.2.1.3. Identification des espèces de vers de terre	41
III.2.1.4. Abondance.....	41
III.2.1.5. Diversité des peuplements des vers de terre.....	41
III.2.1.5.1. Richesse spécifique	41
III.2.1.5.2. Indice de diversité de Shannon.....	41
III.2.1.5.3. Equitabilité	42
III.2.1.5.4. Détermination d'espèces indicatrices.....	42
III.2.2. Etude des paramètres physicochimiques des sols et inventaires floristiques.....	43
III.2.2.1. Paramètres physiques du sol	43
III.2.2.1.1. Densité apparente	43
III.2.2.1.2. Humidité.....	44

III.2.2.1.3. Résistance à la pénétration	44
III.2.2.2. Morphologie du sol	44
III.2.2.3. Analyses chimiques de sol	44
III.2.2.3.1. Carbone et azote totaux	45
III.2.2.3.2. Phosphore, pH, bases échangeables et capacité d'échange en cations (CEC)	45
III.2.2.4. Inventaire floristique et identification des espèces.....	45
III.2.3. Elaboration de l'indice général de la qualité du sol (IGQS) tenant compte des vers de terre.....	47
III.2.4. Services écosystémiques des vers	49
III.2.4.1. Unité expérimentale	49
III.2.4.2. Intrans organique et fertilisants chimiques	49
III.2.4.3. Dispositifs expérimentaux et taux d'inoculation des vers.....	51
III.2.4.3.1. Expérimentation 1 : étude de l'impact des vers de terre sur les propriétés physiques et la séquestration du carbone du sol.....	51
III.2.4.3.2. Expérimentation 2 : étude de l'impact des vers de terre sur la production agricole dans les systèmes d'agriculture à faibles intrants.....	52
III.2.4.4. Détermination des paramètres physiques du sol	55
III.2.4.4.1. Infiltration de l'eau.....	55
III.2.4.4.2. Densité apparente et résistance à la pénétration.....	57
III.2.4.4.3. Distribution des classes d'agrégats et diamètre moyen pondéral (DMP)	57
III.2.4.5. Paramètres chimiques du sol : stocks de carbone et d'azote total.....	57
III.2.4.6. Croissance et production de maïs.....	59
III.2.4.7. Taux de survie des vers de terre	59
III.2.4.8. Détermination de l'efficace d'utilisation des nutriments et de l'eau par le maïs....	59
III.2.4.8.1. Efficace d'utilisation de l'eau (EUE)	60
III.2.4.8.2. Efficace d'utilisation de l'azote (EUA).....	60
III.2.4.8.3. Efficace d'utilisation du phosphore (EUP)	60
III.3. ANALYSES STATISTIQUES	60
CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION.....	62
IV.1. ETUDE DE L'IMPACT DE L'AGRICULTURE TRADITIONNELLE SUR LES PEUPELEMENTS DE VERS TERRE DANS LA ZONE DE GOULIKAO	63
IV.1.1. Composition des peuplements de vers de terre	63
IV.1.2. Abondance	63
IV.1.2.1. Densité	63

IV.1.2.2. Biomasse	68
IV.1.3. Diversité des peuplements de vers de terre	73
IV.1.3.1. Richesse spécifique	73
IV.1.3.1.1. Nombre d'espèces cumulées	73
IV.1.3.1.2. Nombre moyen d'espèces	75
IV.1.3.2. Indice de Shannon (H') et l'équitabilité (E).....	76
IV.1.4. Richesse floristique des sites d'étude.....	77
IV.1.5. Facteurs à l'origine de la variation des peuplements	80
IV.1.6. Analyse à l'échelle du paysage de l'impact de l'agriculture sur les peuplements	82
IV.1.6.1. Abondance	84
IV.1.6.2. Diversité	86
IV.2.6.3. Facteurs à l'origine de la variation des peuplements	87
IV.1.7. Discussion	88
IV.1.7.1. Variations de l'abondance et de la diversité des vers de terre	88
IV.1.7.2. Facteurs de variation des peuplements des vers de terre.....	90
IV.1.7.3. Analyse scalaire de l'impact de la déforestation sur les peuplements de vers de terre	91
IV.1.8. Conclusion partielle	91
IV.2. RELATION ENTRE LES PEUPELEMENTS DE VERS DE TERRE ET LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX DU SOL.....	93
IV.2.1. IMPACT DE LA MISE EN CULTURE DES FORÊTS SUR LA QUALITE MORPHO-PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS	93
IV.2.1.1. Analyses de la morphologie des sols	93
IV.2.1.2. Caractéristiques physiques des sols	96
IV.2.1.2.1. Résistance à la pénétration	96
IV.2.1.2.2. Teneur en eau	99
IV.2.1.2.3. Densité apparente	100
IV.2.1.3. Matière organique	102
IV.2.1.3.1. Carbone organique	102
IV.2.1.3.2. Azote total	103
IV.2.1.3.3. Rapport C/N	103
IV.2.1.4. Caractéristiques chimiques	103
IV.2.1.4.1. Phosphore assimilable et pH _{eau}	103
IV.2.1.4.2. Bases échangeables et capacité d'échange cationique (CEC).....	105

IV.2.1.5. Facteurs controlant la variation des caractéristiques des sols	107
IV.2.1.6. Discussion.....	110
IV.2.1.6.1. Variations des paramètres environnementaux des sols.....	110
IV.2.1.6.2. Facteurs explicatifs de la variation des paramètres environnementaux.....	114
IV.2.1.7. Conclusion partielle	114
IV.2.2. RELATIONS ENTRE PEUPEMENTS DE VERS DE TERRE ET PARAMETRES EDAPHIQUES : ANALYSE DE CO-INERTIE	115
IV.2.2.1. Co-inertie entre les peuplements de vers de terre et les caractéristiques physico-morphologiques	115
IV.2.2.2. Co-inertie entre les peuplements de vers de terre et les caractéristiques chimiques et la matière organique	116
IV.2.2.3. Discussion	121
IV.2.2.4. Conclusion partielle	123
IV.3. PEUPEMENTS DES VERS DE TERRE COMME BIOINDICATEURS DE L'ETAT DES ECOSYSTEMES	124
IV.3.1. Typologie des types d'usage des sols et caractéristiques faunistiques	124
IV.3.2. Peuplements des vers de terre comme indicateurs des écosystèmes naturels.....	127
IV.3.3. Discussion	131
IV.3.4. Conclusion partielle	132
IV.4. ELABORATION D'UN INDICATEUR MULTIFONCTIONNEL DE LA QUALITE DU SOL A PARTIR DES PEUPEMENTS DE VERS DE TERRE : INDICE GENERAL DE LA QUALITE DES SOLS (IGQS).....	133
IV.4.1. Elaboration de l'IGQS des sols du site "Petit Bouaké"	133
IV.4.1.1. Recherche des variables de différenciation des milieux	133
IV.4.1.1.1. Peuplements des vers de terre	133
IV.4.1.1.2. Matière organique	134
IV.4.1.1.3. Paramètres chimiques	135
IV.4.1.1.4. Paramètres physiques	135
IV.4.1.1.5. Paramètres morphologiques	136
IV.4.1.6. Analyses de co-inertie	137
IV.4.1.2. Sélection des variables discriminant mieux les types d'usage des sols	138
IV.4.1.2.1. Peuplements des vers de terre	138
IV.4.1.2.2. Matière organique	138
IV.4.1.2.3. Paramètres chimiques	139

IV.4.2.2.4. Paramètres physiques	140
IV.4.1.2.5. Paramètres morphologiques	140
IV.4.1.3. Calcul des sous-indicateurs de la qualité des sols	141
IV.4.1.4. Formulation et calcul de l'IGQS des types d'usage des sols	142
IV.4.2. Validation de l'IGQS avec les données des sites" Djè Koffikro" et "N'Kroiédjô" ...	143
IV.4.3. Relations entre l'IGQS et l'abondance globale des vers de terre.....	146
IV.4.4. Discussion	148
IV.4.4.1. Méthode agrégative et relations entre sous-indicateurs	148
IV.4.4.2. Effet des types d'usage des sols sur l'IGQS et relation IGQS/vers de terre.....	149
IV.4.5. Conclusion partielle	151
IV.5. MODIFICATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL PAR LES VERS DE TERRE DANS UN AGROSYSTEME TROPICAL : RÔLE DES ATTRIBUTS FONCTIONNELS DES ESPECES.....	152
IV.5.1. Abondance et taux de survie des espèces de vers de terre	152
IV.5.2. Caractéristiques physiques du sol	152
IV.5.2.1. Infiltration de l'eau	152
IV.5.2.2. Densité apparente	155
IV.5.2.3. Résistance à la pénétration	155
IV.5.2.4. Agrégats biogéniques et diamètre moyen pondéral (DMP).....	156
IV.5.3. Matière organique et rapport C/N	159
IV.5.4. Discussion	159
IV.5.4.1. Impact des vers de terre sur les caractéristiques physiques du sol comme fonction des traits fonctionnels.....	159
IV.5.4.2. Impact des vers de terre sur le stockage de la matière organique du sol	162
IV.5.4.3. Effet de la richesse spécifique sur le fonctionnement du sol : l'hypothèse d'assurance ?	163
IV.5.5. Conclusion partielle	163
IV.6. GESTION INTEGREE DE LA FERTILITE DES SOLS DANS LES AGROSYSTEMES : INFLUENCE DE L'ASSOCIATION DE DEUX VERS A EFFETS ANTAGONISTES SUR LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DE MAÏS.....	164
IV.6.1. Biomasse et taux de survie des vers inoculés	164
IV.6.2. Impact sur les propriétés physiques du sol.....	164
IV.6.3. Impact des vers sur la croissance du maïs.....	166
IV.6.4. Impact des vers sur les rendements de maïs	167

IV.6.5. Relation entre la production de maïs et les caractéristiques du sol.....	169
IV.6.6. Efficience d'utilisation des nutriments et de l'eau par le maïs	170
IV.6.6.1. Efficience d'utilisation de l'azote et du phosphore.....	170
IV.6.6.2. Efficience d'utilisation de l'eau	170
IV.6.7. Discussion	170
IV.6.8. Conclusion partielle	174
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	175
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	179
ANNEXES.....	197

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

- Figure 1 :** Coupe longitudinale d'une galerie de vers de terre avec le monticule associant déjections et fragments organiques, réalisée par une espèce anécique (Cluzeau et al., 2005)..13
- Figure 2 :** Schéma du concept de qualité des sols utilisant des indicateurs en relation avec les fonctions du sol (Mausbach & Tugel, 1997)..... 16
- Figure 3 :** Représentation de la place d'un indice dans les étapes de structuration de l'information..... 19

Chapitre II

- Figure 4 :** Carte du Département d'Oumé montrant l'emplacement géographique de la zone d'étude (Source : BNEDT, CTT) 23
- Figure 5 :** Diagrammes ombrothermiques (a) sur 18 ans (1990–2007) et (b) au cours des années 2008 et 2009. 24
- Figure 6 :** Carte pédologique de la région d'Oumé (Avenard *et al.*, 1971) 26
- Figure 7 :** Principaux types d'occupation du sol (Photos GUEI, 2008)..... 30
- Figure 8 :** Carte des différents types d'usage des sols des différents sites d'étude..... 32

Chapitre III

- Figure 9 :** Récolte des vers de terre au champ et les trois espèces de vers inoculées 37
- Figure 10 :** Protocole d'échantillonnage des peuplements de vers de terre : (a) Schéma de la méthode d'échantillonnage; (b) délimitation d'un monolithe de sol. 40
- Figure 11 :** Mesure de la résistance à la pénétration horizontale du sol 46
- Figure 12 :** Cube de sol de dimension 5 x 5 x 5 cm 46
- Figure 13 :** Schéma du protocole de prélèvement d'échantillon de sol 46
- Figure 14 :** Unité expérimentale présentant une jeune pousse de maïs..... 50
- Figure 15 :** Dispositif expérimental sur chacune des 10 parcelles de jachère..... 53
- Figure 16 :** Dispositif expérimental..... 56
- Figure 17 :** Mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol 58
- Figure 18 :** Prélèvement d'un cylindre de sol pour la détermination des classes d'agrégats.. 58
- Figure 19 :** Agrégats biogéniques produits par les vers de terre 58

Chapitre IV.1

- Figure 20 :** Variation de la densité des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "Petit Bouaké" 66

Figure 21 : Variation de la densité des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "Djè Koffikro".....	67
Figure 22 : Variation de la densité des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "N'Kroiêdjô".....	69
Figure 23 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "Petit Bouaké".....	71
Figure 24 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "Djè Koffikro".....	72
Figure 25 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols du site de "N'Kroiêdjô".....	74
Figure 26 : Courbes d'accumulation des espèces de vers de terre des différents sites d'étude : (a) site "Petit Bouaké", (b) site "Djè Koffikro" et (c) site "N'Kroiêdjô".	75
Figure 27 : Analyse en Composantes Principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "Petit Bouaké".	81
Figure 28 : Analyse en Composantes principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "Djè Koffikro".	81
Figure 29 : Analyse en Composantes principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "N'Kroiêdjô".	83
Figure 30 : Variation de l'abondance des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols.....	85
Figure 31 : ACP réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre.....	87

Chapitre IV.2

Chapitre IV.2.1

Figure 32 : Morphologie des sols du site "Petit Bouaké" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols.....	93
Figure 33 : Morphologie des sols du site "Djè Koffikro" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols.....	95
Figure 34 : Morphologie des sols du site "N'Kroiêdjô" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols.....	96

Figure 35 : Variation de la résistance du sol à la pénétration à travers les différents types d'usage des sols	98
Figure 36 : Variation de la densité apparente à travers les différents types d'usage des sols	101
Figure 37 : Analyses en Composantes Principales des caractéristiques physico-micromorphologiques de sols.....	109
Figure 38 : Analyses en Composantes Principales des caractéristiques chimiques et la matière organique de sols	111
Chapitre IV.2.2	
Figure 39 : Résultats de l'analyse de co-inertie	117
Figure 40 : Représentation graphique du tableau croisé synthétisant l'information des tableaux faunistique et physico-morphologiques	118
Figure 41 : Analyse de co-inertie réalisée entre le tableau de données faunistiques et le tableau de données édaphiques.	120
Figure 42 : Représentation graphique du tableau croisé synthétisant l'information des tableaux faunistique et des variables chimiques et de la matière organique	121
Chapitre IV.3	
Figure 43 : Classification hiérarchique des 23 types d'usage des sols	125
Figure 44 : Espèces indicatrices associées aux différents groupes de types d'usages des sols.	128
Figure 45 : Variation des valeurs IndVal des vers de terre indicateurs significatifs du groupe des forêts en fonction des niveaux de partitions.	129
Figure 46 : Classification hiérarchique des 23 types d'usage des sols de l'étude en utilisant les données faunistiques regroupées au niveau du genre.	130
Chapitre IV.4	
Figure 47 : Analyse en Composantes Principales réalisée sur la biomasse des peuplements des vers de terre.....	133
Figure 48 : Analyses en Composantes Principales des variables de la matière organique ...	134
Figure 49 : Analyses en Composantes Principales des variables chimiques	135
Figure 50 : Analyses en Composantes Principales des variables physiques.....	136
Figure 51 : Analyses en Composantes Principales des variables morphologiques.....	137
Figure 52 : Variation de l'IGQS à travers les différents types d'usage des sols du site "Petit Bouaké".	143

Figure 53 : Variation de l'IGQS à travers les différents types d'usage des sols : (a) site "Djè Koffikro" et (b) site "N'Kroiédjô".	147
--	-----

Chapitre IV.5

Figure 54 : Infiltration de l'eau : (a) Vitesse d'infiltration de l'eau en fonction du temps et (b) variation de la vitesse moyenne d'infiltration à travers les différents traitements.....	154
---	-----

Figure 55 : Distribution des agrégats biogéniques des sols des traitements : (a) strate 0-10 cm et (b) strate 10-20 cm.	157
---	-----

Figure 56 : Variation du diamètre moyen pondéral des agrégats biogéniques des sols des traitements en fonction des strates : (a) strate 0-10 cm et (b) strate 10-20 cm.....	158
--	-----

Figure 57 : Relation entre la résistance à la pénétration et le DMP dans la strate 10-20 cm du sol.	158
---	-----

Chapitre IV.6

Figure 58 : Hauteur du plant de maïs aux différents jours après semis (JAS).....	167
---	-----

Figure 59 : Production du maïs en fonction des traitements.....	168
--	-----

Figure 60 : Relation entre la biomasse racinaire et la résistance à la pénétration dans la strate 0-10 cm du sol.	169
---	-----

Figure 61 : Efficience d'utilisation des nutriments et de l'eau par le maïs en présence et en absence des vers.	171
---	-----

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I : Principales caractéristiques des trois catégories écologiques de vers de terre décrites par Bouché (1972; 1977). 10

Chapitre II

Tableau II : Différents types d'usages des sols de la zone d'échantillonnage 31

Tableau III : Parcelles de jachère à *C. odorata* abritant les expérimentations..... 33

Chapitre III

Tableau IV : Caractéristiques chimiques des dix premiers centimètres du sol expérimental 50

Tableau V : Composition chimique des résidus de café (Tondoh & Lavelle, 1997)..... 50

Tableau VI : Nombre d'individus des espèces de vers de terre inoculées par traitement. 54

Chapitre IV.1

Tableau VII : Occurrence des espèces de vers de terre par sites d'étude (1 : présence, 0 : absence)..... 64

Tableau VIII : Nombre moyen d'espèces, indice de Shannon et équitabilité des peuplements de vers de terre. 78

Tableau IX: Richesse floristique des sites d'étude.....78

Tableau X : Coefficients de corrélation entre la richesse floristique et les paramètres biotiques (test de Spearman) 79

Tableau XI : Paramètres de diversité des peuplements de vers de terre..... 86

Chapitre IV.2

Chapitre IV.2.1

Tableau XII : Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "Petit Bouaké" 99

Tableau XIII : Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "Djè Koffikro" 99

Tableau XIV : Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "N'Kroiêdjô" 100

Tableau XV : Teneurs de sol (0-10 cm) en matière organique et rapport C/N des différents types d'usage des sols 104

Tableau XVI : pH et teneurs en P assimilable du sol (0-10 cm) des types d'usage des sols 105

Tableau XVII : Teneurs en bases échangeables et CEC des sols de "Petit Bouaké" 106

Tableau XVIII : Teneurs en bases échangeables et CEC des sols de "Djè Koffikro" 108

Tableau XIX : Teneurs en bases échangeables et CEC des sols de "N'Kroiêdjô" 108

Chapitre IV.2.2

Tableau XX : Résultats de l'analyse de co-inertie..... 115

Tableau XXI : Résultats de l'analyse de co-inertie. 119

Chapitre IV.3

Tableau XXII : Classification des espèces de vers selon l'abondance relative entre les quatre groupes de types d'usage des sols. 126

Chapitre IV.4

Tableau XXIII : Analyses de co-inertie entre chaque paire de jeux variables 137

Tableau XXIV : Contributions relatives des espèces de vers de terre sur les facteurs (F) 1 et 2 de l'ACP..... 138

Tableau XXV : Contributions relatives des variables de la matière organiques sur les facteurs (F) 1 et 2 de l'ACP. 139

Tableau XXVI : Contributions relatives des variables chimiques sur les axes 1 et 2 139

Tableau XXVII : Contributions relatives des variables physiques sur les axes 1 et 2. 140

Tableau XXVIII : Contributions relatives des variables morphologiques sur les axes 1 et 2. 140

Tableau XXIX : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "Petit Bouaké" 141

Tableau XXX : Contribution et inertie de chaque sous-indicateur aux facteurs 1 et 2 142

Tableau XXXI : Analyses de co-inertie entre chaque paire de jeux variables 144

Tableau XXXII : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "Djè Koffikro" 145

Tableau XXXIII : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "N'Kroiêdjô" 145

Tableau XXXIV : Corrélations entre l'IGQS et les paramètres de l'abondance globale des vers de terre. 148

Chapitre IV.5

Tableau XXXV : Abondance et taux de survie des espèces des vers de terre récolté par traitement.....153

Tableau XXXVI : Densité apparente et pénétrométrie des différents traitements. 155

Tableau XXXVII : Stocks de C organique et N total, et rapport C/N des sols des différents traitements. 160

Chapitre IV.6

Tableau XXXVIII : Abondance et taux de survie des espèces de vers inoculées et récoltées par traitement.....	165
Tableau XXXIX : Résistance à la pénétrométrie et densité apparente des sols des traitements	166

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

ACP	: Analyse en Composantes Principales
Anova	: Analyse de la variance
BNETD	: Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
Ca	: Cacaoyère
CDB	: Convention sur Diversité Biologique
CEC	: Capacité d'Echange en Cations
CO ₂	: Dioxyde de Carbone
CORPEN	: Comité d'Orientation pour les Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement
COT	: Concentration en C organique
CSM-BGBD	: Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity
CV	: Culture vivrière
DMP	: Diamètre Moyen Pondéral
Dt	: <i>Dichogaster terraenigrae</i>
EUA	: Efficience d'Utilisation de l'Azote
EUE	: Efficience d'Utilisation de l'Eau
EUP	: Efficience d'Utilisation du Phosphore
Fs	: Forêt secondaire
GIFS	: Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols
Ha	: <i>Hyperiodrilus africanus</i>
H ₃ BO ₃	: Acide Borique
H ₂ SO ₄	: Acide Sulfurique
IBQS	: Indice Biologique de la Qualité des Sols
IDDRI	: Institut de Développement Durable et des Relations Internationales
IGQS	: Indice Général de la Qualité des Sols
INS	: Institut National des Statistiques
J	: Jachère
K ₂ SO ₄	: Sulfate de potassium
MEA	: Millenium Ecosystem Assessment
Mo	: <i>Millsonia omodeoi</i>
Ms	: Maïs
NaHCO ₃	: Bicarbonate de Sodium

NaOH	: Hydroxyde de Sodium
NH ₄ F	: Fluorure d'Ammonium
PIB	: Produit Interieur Brut
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'habitat
S _C	: Stock de carbone
SI _q	: Sous-Indicateur de la qualité
SODEXAM	: Société d'Exploitation Aérienne et Météorologique
TK	: Teckeraie

RESUME

Les vers de terre de forêt de la Côte d'Ivoire sont très peu étudiés malgré leur rôle significatif dans le fonctionnement du sol. La présente étude réalisée dans la région du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire et se propose d'évaluer le rôle des vers de terre dans la fourniture des services écosystémiques au niveau des agrosystèmes. Pour ce faire, deux principaux types de travaux ont été réalisés. Le premier consiste en un échantillonnage des peuplements de vers de terre dans un contexte d'intensification agricole en vue de montrer leur grande sensibilité aux divers paramètres édaphiques qui en font d'excellents indicateurs de qualité des sols. Dans le deuxième travail, il s'agissait d'évaluer à travers des expérimentations en conditions semi-naturelles, les impacts à court terme de 2 vers de terre compactants (*Millsonia omodeoi* et *Dichogaster terraenigrae*) et d'un décompactant (*Hyperiodrilus africanus*) sur les services écosystémiques notamment (i) la régulation de la structure physique des sols, (ii) le stockage de la matière organique et (iii) l'amélioration de la production du maïs. La mise en culture des forêts entraîne une modification de la diversité et de l'abondance des vers de terre dans les champs cultivés à travers une modification des paramètres édaphiques qui en retour influence l'assemblage des populations (Analyses de co-inertie ; $p < 0,001$; $RV > 0,70$). Par ailleurs, cinq espèces dont *Millsonia nilesi* (62%), *Dichogaster saliens* (63%), *D. eburnea* (73%), *D. mamilatta* (93%) et *Stuhlmannia palustris* (66%) se sont révélées indicatrices des milieux forestiers, avec *Millsonia nilesi* identifiée comme la seule espèce spécialiste. L'indice général de la qualité des sols (IGQS) attribue des valeurs de bonne qualité ($0,7 \leq IGQS \leq 1$) aux sols des parcelles de forêts, jachères de 5 ans et la teckeraie de 8 ans, tandis que les parcelles de cultures vivrières, cacaoyers de 5 ans et la teckeraie de 14 ans sont de mauvaise qualité ($0,1 \leq IGQS < 0,55$). Les corrélations positives entre l'IGQS, la densité et la biomasse des vers ($R^2 \geq 0,63$; $N = 35$; $p < 0,05$) suggèrent que ces organismes peuvent être utilisés comme indicateurs de la qualité du sol. Les essais en pots ont révélé que les vers de terre n'ont pas eu d'impact significatif sur le stockage de la matière organique du sol. Toutefois, ils ont amélioré significativement la vitesse d'infiltration de l'eau de 22 à 77% et augmenté le rendement en grain, la production de biomasse épigée et racinaire du maïs, respectivement de +266,9 ; +171,2 et +190% par rapport au témoin. La cooccurrence des vers de terre compactants et décompactant favorise la régulation de la structure du sol ; le diamètre moyen pondéral présente des valeurs intermédiaires de 1,32 et 1,64 mm.

Mots clés : Vers de terre, qualité du sol, espèces indicatrices, indicateurs de qualité, structure du sol, production de maïs.

ABSTRACT

Despite their significant influence on ecosystem services in agrosystems, earthworm communities especially in West-Centre region of Côte d'Ivoire, remain very poorly studied. This study aimed to assess the role of earthworm communities in the deliverance of ecosystem services in agrosystems. Two main studies were conducted to achieve these goals. The first part dealt with the survey of earthworm populations in highly intensified agricultural landscapes in order to show their sensitivity to soil conditions. The second study assessed by means of mesocosm experiments, the effect of two compacting earthworm species (*Millsonia omodeoi* et *Dichogaster terraenigrae*) and a compacting species (*Hyperiodrilus africanus*) on ecosystem services such as (i) soil structure regulation, (ii) soil organic matter storage and (iii) maize production enhancement. Results showed that forests cultivation caused significant reduction in earthworm diversity and abundance. Changes in soil parameters as agricultural intensification consequence affected earthworm species composition (Co-inertia analysis, $p < 0.001$; $RV > 0.70$). Response groups were associated with specific characteristics of each land use types. Furthermore, five (5) species namely *Millsonia nilesi* (62%), *Dichogaster salien* (63%), *D. eburnean* (73%), *D. mamillata* (93%) and *Stuhlmannia palustris* (66%) were forests indicators, with *Millsonia nilesi* having a specialist status. The general index of soil quality (GISQ) assigns values of good quality ($0.7 \leq GISQ \leq 1$) to forests, 5 year-olds fallows and 8 year-olds teak plantation, while food crops, 5 year-olds cocoa and 14 year-olds teak plantation have poor quality ($0.1 \leq IGQS < .55$). Positive correlations between IGQS, density and biomass to ($R^2 \geq 0.63$, $N = 35$, $p < 0.05$) suggests that these organisms can be used as indicators of soil quality. On the other hand, pot experiments revealed no significant impact on soil organic carbon and total nitrogen storage in soils within a three-months period. However, water infiltrability was increased in all earthworm based-treatments in the range between +22 and +77% as compared to the control. In the same way, earthworms increased grain yield, aboveground and root biomass at +266.9; +171.2 and +190%, respectively. Compacting and decompacting earthworms co-occurrence improve soil structure regulation; the mean weight diameter has intermediate values of 1.32 and 1.64 mm.

Keywords: Earthworms, soil quality, indicator species, quality indicators, soil structure, maize production.

INTRODUCTION

La déforestation en Côte d'Ivoire a atteint des proportions alarmantes car des études estiment qu'en l'espace de trois décennies, près des 4/5 de la forêt primaire ivoirienne ont disparu à un taux annuel estimé à 7,6% (Balac, 1999 ; Dao, 1999). La majorité de cette déforestation est réalisée sans plan de développement, au profit d'une agriculture de survie et de rente. Avec une contribution au PIB estimée à 29,2% en 2000, l'agriculture constitue le principal facteur responsable de la dégradation du couvert forestier (Brou *et al.*, 2005).

Le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, anciennement connu sous la dénomination de «boucle du cacao» est essentiellement couverte de forêts dégradées parce qu'étant la deuxième zone de production agricole après la région de l'Est pendant les années 1960. Cette zone se caractérise aujourd'hui par une production agricole de plus en plus faible due entre autre au vieillissement des vergers et à la baisse de fertilité des sols (Chatelain *et al.*, 2004).

Par ailleurs, l'impact de la transformation de la forêt en milieux de culture sur la faune du sol a également suscité de nombreuses études dans ladite zone (Vers de terre : Tondoh *et al.*, 2007 ; Coléoptères : Kra *et al.*, 2010 ; Termites : Tra Bi *et al.*, 2010 ; Acariens : N'Dri & André, 2011), eu égard à l'importance des services écosystémiques (cycle des nutriments, formation des sols, production de nourriture, régulations du climat, de l'érosion et des parasites) rendus par ces organismes (Brussaard *et al.*, 2007 ; Blouin *et al.*, 2013).

Les vers de terre jouent un rôle central dans l'amélioration et le maintien de la productivité des agrosystèmes (Gilot-Villeneuve *et al.* 1996 ; Turbé *et al.*, 2010). Ils affectent substantiellement de nombreux processus importants dans le sol comme la stabilisation de la matière organique à travers son incorporation dans des macroaggrégats, la stimulation de la formation des macroaggrégats, l'augmentation de l'infiltrabilité de l'eau et la régulation de la structure du sol (Blanchart *et al.*, 1997, Bossuyt *et al.*, 2005 ; Pulleman *et al.*, 2005; Fonte *et al.*, 2007) ; des facteurs clés qui déterminent la capacité du sol à soutenir durablement une meilleure production agricole (Hong *et al.*, 2011). Ainsi, la manipulation de cette faune pourrait représenter une alternative prometteuse pour la promotion d'une agriculture durable (Lavelle *et al.*, 1997 ; Brussaard *et al.*, 2007).

En Côte d'Ivoire, plusieurs expérimentations ont été entreprises en milieux semi-naturels et contrôlés en vue de valoriser la capacité des vers de terre à améliorer la productivité des sols (Spain *et al.*, 1992; Pashanasi *et al.*, 1996; Derouard *et al.*, 1996 ; Gilot-Villeneuve *et al.* 1996 ; Blouin *et al.*, 2006). Toutefois, très peu de travaux ont été consacrés à l'étude de l'impact des différents groupes fonctionnels (compactant *versus* décompactant) des vers de terre sur l'amélioration de la qualité du sol. De plus, il n'existe aucun indice mesurable qui transforme l'information transmise par l'analyse des propriétés physiques, chimiques et des peuplements

de vers de terre en une évaluation précise de la qualité du sol. Pourtant la mise au point récemment d'un indicateur multifonctionnel par Velasquez *et al.* (2007a) est révélateur du rôle prépondérant que peuvent jouer les macro-invertébrés dans l'élaboration d'un indicateur synthétique de la qualité des sols.

Dans ce contexte de baisse irréversible de la fertilité des sols des agrosystèmes ivoiriens, nous avons envisagé une approche basée sur l'utilisation des vers de terre pour développer un indicateur global qui permet de détecter des anomalies dans le fonctionnement du sol et d'améliorer sa qualité. Suivant l'approche s'appuyant sur les services écosystémiques, la qualité d'un sol est définie comme sa capacité à soutenir une production suffisante d'aliments et de fibres pour l'homme, tout en fournissant de manière continue d'autres services écosystémiques essentiels pour l'entretien de la vie et la conservation de la biodiversité. La qualité du sol constitue ainsi un facteur clé qui gouverne la productivité, la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes agricoles (Kibblewhite *et al.*, 2008).

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du projet « *Conservation and Sustainable Management of Below-Ground Biodiversity* » (CSM-BGBD) dont l'objectif est de caractériser la diversité biologique des organismes endogés et de valoriser leurs services écosystémiques dans une perspective de gestion durable de la productivité des sols dans la région du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. La présente étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du projet CSM-BGBD. Elle a pour objectif général d'élaborer un système de suivi de la qualité des sols en tenant compte des peuplements des vers de terre désignés sous le vocable d'"ingénieurs de l'écosystème" et d'évaluer leur rôle dans l'amélioration de la qualité des sols dans les systèmes d'agriculture traditionnelle.

Pour atteindre cet objectif général, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis. Le premier objectif concerne l'identification des groupes de réponse au sein des peuplements de vers de terre face à la modification des paramètres édaphiques et concernera :

- l'étude de la variation des peuplements de vers de terre et des paramètres chimiques et physico-morphologiques des sols le long d'un gradient d'intensification agricole ;
- la détermination des relations existantes entre les espèces de vers de terre et ces paramètres édaphiques ;
- et l'analyse de la capacité des peuplements de vers de terre à être utilisés comme bioindicateurs de la qualité des écosystèmes.

Le deuxième objectif consiste à utiliser les peuplements de vers de terre à l'instar de la macrofaune utilisée par Velasquez *et al.* (2007a), pour élaborer l'indice général de la qualité des sols (IGQS).

Enfin, le dernier objectif spécifique consiste à évaluer les services écosystémiques des vers de terre et comprendra : (i) l'étude de la contribution des espèces de vers de terre de différents groupes fonctionnels sur la structure physique du sol et le stockage du carbone et d'azote ; (ii) la détermination de leur rôle dans la gestion intégrée de la fertilité des sols et (iii) l'identification des mécanismes qui sous-tendent leur impact positif sur la croissance et la production du maïs. Deux concepts écologiques dont l'hypothèse d'assurance biologique (Yachi & Loreau, 1999) et la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) (Vanlauwe & Giller, 2006) seront vérifiés. Le premier concept stipule qu'une richesse spécifique élevée procure à l'écosystème une certaine stabilité de son fonctionnement tandis que le second promeut une production durable des systèmes agricoles traditionnels en s'appuyant sur l'utilisation d'intrants organiques, engrais minéraux et de matériel biologique.

Pour atteindre ces objectifs plusieurs hypothèses ont été élaborées :

- (i) la perturbation des forêts par les activités anthropiques induit des modifications sur l'abondance, la diversité et la structure d'assemblage des vers de terre,
- (ii) la modification des paramètres édaphiques comme conséquence de l'intensification agricole influence la composition des peuplements de vers de terre au point de favoriser l'émergence d'espèces ou de groupes d'espèces dites indicatrices de milieux ou d'un ensemble de milieux,
- (iii) la présence d'espèces de différents traits fonctionnels est un préalable pour l'amélioration des propriétés physiques et la sequestration de la matière organique dans le sol,
- (iv) l'amélioration de la croissance du maïs et l'augmentation de sa production peuvent être stimulées par une interaction entre composantes biologiques du sol (vers de terre) et intrants inorganiques (engrais).

La présentation générale de ce mémoire comprend 4 grandes parties :

- la première partie est consacrée à la revue bibliographique ;
- la deuxième partie concerne la présentation du milieu d'étude ;
- la troisième partie présente le matériel utilisé et les méthodes d'étude ;
- et la quatrième partie est consacrée aux résultats et à leur discussion suivies de la conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. BIODIVERSITE : CONCEPT ET ENJEUX

I.1.1. Emergence du concept de biodiversité

L'étude de la diversité du vivant va connaître à partir du XVIII^e siècle des développements successifs marqués notamment par la classification de Linné, l'apparition de la théorie de l'Evolution puis de la génétique, et le développement de l'écologie dans les années 1950. Les étapes de cette histoire scientifique sont liées à l'émergence de deux concepts : celui de "biodiversité", dans les années 80, et plus tard celui de diversité fonctionnelle et de services des écosystèmes (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Le néologisme "Biodiversité", apparu dans les années 1980, a été popularisé par le Sommet de la Terre de Rio en 1992. Il englobe trois niveaux d'organisation du vivant : la diversité des écosystèmes, la diversité spécifique (diversité des espèces ou interspécifique) et la diversité génétique (ou intra-spécifique). Bien que considéré par certains comme synonyme de diversité biologique, le terme s'en distingue par deux ruptures épistémologiques. La première, qui reste dans le champ des sciences de la nature, attire l'attention sur les interdépendances entre les trois composantes majeures de la diversité du vivant, classiquement abordées séparément par des spécialistes portés à s'ignorer : les écologues, les systématiciens et les généticiens. La seconde rupture plus significative, fait sortir du seul champ des sciences de la nature le concept de biodiversité : celui-ci inscrit la diversité du vivant dans les enjeux, préoccupations et conflits d'intérêts qui ont émergé à Rio de Janeiro en 1992. C'est également en 1992 que sera signée la Convention pour la Diversité Biologique (CDB) (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

L'évolution des concepts de biodiversité depuis la conception patrimoniale d'une biodiversité support de l'Evolution, jusqu'à la conception utilitariste d'une biodiversité support des services rendus par les écosystèmes, a marqué la dernière décennie. Cette évolution s'est accompagnée d'une transformation dans les valeurs dominantes qui fondent la protection de la biodiversité : l'accent est dorénavant mis sur la valeur d'usage direct et indirect, à travers les services des écosystèmes, concurremment à la valeur d'existence (Barbier, 2007 ; Le Roux *et al.*, 2008 ; Wainger *et al.*, 2010).

A la complexité du concept de biodiversité dans sa définition scientifique s'ajoute le fait qu'il a été forgé et utilisé dans les débats internationaux à partir de quatre logiques caractérisées de la manière suivante par l'Institut de Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI) (Le Roux *et al.*, 2008) :

- une logique commerciale qui s'est exprimée par l'adoption du principe de propriété intellectuelle du vivant lors des négociations de l'Uruguay Round ;

- une logique culturaliste ou indigéniste, venue se greffer aux débats à la fin des années 80 ;
- une logique environmentaliste qui affiche la conservation comme objectif;
- et une logique agronomique qui cherche à limiter l'érosion de la diversité génétique dans un but d'amélioration des plantes.

La biodiversité est ainsi devenue le cadre de réflexion et de discussion dans lequel sont revisitées et reformulées les questions posées par les relations que l'homme entretient avec les autres espèces et les milieux naturels. La "gestion de la biodiversité" a remplacé la "protection de la nature".

I.1.2. Biodiversité : de la notion de "conservation" à la notion de "services"

Les fondements des politiques de protection de la biodiversité se sont initialement inscrits dans un contexte de prise de conscience des menaces qui pèsent sur la biodiversité, ainsi que l'intérêt pour l'humanité de la protéger et conserver les ressources naturelles (Swift *et al.*, 2004). Le constat de disparition d'espèces à un rythme supérieur à tous ceux connus au cours des époques géologiques a d'abord conduit les scientifiques à privilégier le nombre d'espèces présentes dans les écosystèmes, autrement dit la dimension quantitative de la biodiversité. Cela s'est traduit sur le plan politique en mesures de préservation.

D'après Lévêque (1997), la protection de la biodiversité est justifiée par deux (2) principaux motifs :

Motifs économiques

- Elle suscite une activité économique liée au tourisme et à l'observation d'espèces dans leur milieu ou à l'attrait de beaux paysages.
- Elle contribue à la fourniture de nombreux produits alimentaires, de matières premières pour l'industrie, de médicaments, de matériaux de construction et à usages domestiques.
- Elle offre d'importantes perspectives de valorisation dans le domaine des biotechnologies, notamment pour les micro-organismes, mais également dans le domaine des manipulations génétiques.
- Elle absorbe et décompose divers polluants organiques et minéraux, et participe par exemple à l'épuration des eaux.
- Elle joue un rôle dans la régulation des grands équilibres physico-chimiques de la biosphère, notamment au niveau de la production et du recyclage du carbone et de l'oxygène.
- Elle est à la base de toute la production agricole, tant du point de vue du nombre d'espèces utilisées que des nombreuses variétés patiemment sélectionnées; elle est indispensable pour l'amélioration des végétaux et des animaux domestiques.

- Elle contribue à la fertilité des sols et à sa protection, ainsi qu'à la régulation du cycle hydrologique.

Motifs éthiques et patrimoniaux

- Elle est indispensable pour maintenir les processus d'évolution du monde vivant.
- Les hommes ont le devoir moral de ne pas éliminer les autres formes de vie.
- Selon le principe d'équité entre les générations, nous devons transmettre à nos enfants l'héritage que nous avons reçu.
- Les écosystèmes naturels et leurs espèces sont de véritables laboratoires pour comprendre les processus de l'évolution.
- La biodiversité est chargée de normes de valeur : c'est ce qui est naturel, ce qui est vulnérable, ce qui est bon pour l'homme et la survie de l'humanité, etc.

Aujourd'hui un consensus des chercheurs s'est établi sur le constat que l'impact des espèces sur le fonctionnement des écosystèmes dépend plus des fonctions que ces espèces remplissent dans l'écosystème que de leur nombre en tant que tel. On trouve la traduction de cette convergence dans la notion de "services" rendus par la biodiversité (services d'approvisionnement tels que la nourriture, l'eau douce... ; services de régulation tels que la régulation du climat, de l'épuration et de la qualité des eaux ; services culturels tels que des bénéfices récréatifs, etc.), popularisés par le Millenium Ecosystem Assessment (2005).

I.1.3. Biodiversité du sol et fonctionnement de l'écosystème

Le sol contient plus d'espèces inconnues que toutes les autres parties de la biosphère terrestre, constituant ainsi un véritable enjeu pour la recherche sur la biodiversité. C'est en partie cette diversité qui rend le comportement du système sol difficile à prédire car plusieurs fonctions essentielles du sol, et certaines de ses propriétés physico-chimiques, dépendent de l'action des organismes qui le peuplent (Turbé *et al.*, 2010).

Le sol peut être vu comme un ensemble de sphères d'influence explicitant son hétérogénéité spatiale et temporelle (Beare *et al.*, 1995). La détritosphère correspond à la litière, l'agrégatosphère est la matrice solide du sol, la porosphère correspond à l'espace interstitiel rempli d'air et d'eau, la rhizosphère est sous l'influence des racines et la drilosphère est contrôlée par les vers de terre. Chacune de ces sphères correspond à une zone d'activité intense des organismes du sol. C'est dans le cadre de ces sphères d'influence, à différentes échelles de temps et d'espace que la biodiversité contribue le plus significativement au fonctionnement du sol et de l'écosystème, assurant la décomposition de la matière organique et influençant de manière directe et indirecte la croissance des végétaux.

I.1.4. Diversité de la faune du sol : cas des vers de terre

La faune du sol, répartit habituellement en fonction de la taille des organismes qui la composent en trois groupes distincts, micro, méso et macrofaune, recouvre de nombreux taxons, comprenant eux-mêmes des milliers d'espèces. C'est donc une source de biodiversité importante qu'il convient de préserver car ces organismes ont des rôles essentiels pour le maintien du fonctionnement du sol (Turbé *et al.*, 2010). Les vers de terre (Annélides, Oligochètes) qui appartiennent au groupe de la macrofaune ($2 \text{ mm} < \varnothing < 20 \text{ mm}$), représentent une composante majeure de la macrofaune du sol dans la plupart des écosystèmes terrestres en termes de biomasse et d'activité (Rombke *et al.*, 2005).

En 1994, plus de 3600 espèces de vers de terre avaient été recensées dans le monde, auxquelles s'ajoutaient plus de soixante nouvelles espèces chaque année. On estime à 7000 environ le nombre total d'espèces, la majorité vivant sous les tropiques (Lavelle *et al.*, 1998). Bouché (1972) a proposé de classer les vers de terre en trois catégories écologiques, basées sur des critères morphologiques (pigmentation, taille), comportementaux (alimentation, construction de galeries, mobilité) et écologiques (longévité, temps de génération, prédation, survie à la sécheresse) (Tableau I).

Les anéciques sont des vers pigmentés de grande taille qui vivent dans des galeries verticales permanentes et se nourrissent de matière organique en surface et contenue dans le sol. Les endogés sont des vers non pigmentés, de taille moyenne, vivant généralement dans les premiers centimètres de sol où ils construisent un réseau de galeries sub-horizontales. Ils se nourrissent de la matière organique contenue dans le sol. Il existe trois sous-catégories d'endogés : polyhumiques, mésohumiques et oligohumiques, en fonction de leur position au sein du profil donc du type et de la teneur en matière organique du sol qu'ils ingèrent. Plus les vers vivent profondément, moins le sol qu'ils consomment est riche en matière organique. Les endogés qui ingèrent le sol le plus pauvre en matière organique sont des oligohumiques, alors que les polyhumiques consomment du sol des horizons superficiels, riches en matières organiques en voie de décomposition. Enfin, les épigés sont des vers pigmentés de petite taille qui vivent dans la litière de surface et se nourrissent des matières organiques en décomposition dans cette litière. Ils ne creusent pas, même si certaines espèces intermédiaires peuvent créer de petites galeries très superficielles. Les espèces épigées, vivant à la surface du sol, sont les plus exposées aux aléas climatiques, à la prédation et aux opérations culturales (travail du sol, pesticides, brûlis).

Tableau I : Principales caractéristiques des trois catégories écologiques de vers de terre décrites par Bouché (1972; 1977).

	Espèces épigées	Espèces anéciques	Espèces endogées
Alimentation	Litière décomposée à la surface du sol ; peu ou pas d'ingestion de sol	Matière organique décomposée à la surface du sol, dont une part est incorporée dans les galeries ; un peu d'ingestion de sol	Sol minéral avec préférence pour matériau riche en matière organique
Pigmentation	Sombre souvent ventrale et dorsale	Moyennement sombre, souvent uniquement dorsale	Peu ou pas pigmenté
Taille adultes	Petite à moyenne (10-30 mm)	Grande (10-110 cm)	Moyenne (1-20 cm)
Mobilité	Mouvements rapides en réponse aux perturbations	Retraits rapides dans les galeries mais plus lents que les épigés	Généralement lents
Longévité	Relativement courte	Relativement longue	Intermédiaire
Temps de génération	Court	Long	Court
Survie à la sécheresse	Sous forme de cocons	Quiescence	Diapause
Prédation	Très importante, surtout par oiseaux, mammifères et arthropodes prédateurs	Importante, surtout quand les vers de terre sont en surface	Faible, un peu par les oiseaux qui creusent et arthropodes prédateurs

I.2. FONCTIONS ET SERVICES ECOSYSTEMIQUES DES VERS DE TERRE

Le terme de « fonction » est ici utilisé dans le sens « d'utilité pour l'homme », alors que les services écosystémiques désignent les bénéfices que la société tire du fonctionnement des écosystèmes (MEA, 2005). En général, les principaux services rendus par le fonctionnement des écosystèmes incluent (i) la production de fibres et aliments, (ii) la régulation des cycles bio-géochimiques, (iii) le biocontrôle des pestes et maladies, (iv) la régulation de la qualité et du flux de l'eau et (v) et le contrôle de l'émission des gaz à effet de serre (Kibblewhite *et al.*, 2008). Plus précisément, il est question d'évoquer dans ce chapitre des rôles que jouent les vers de terre et des bénéfices tirés de leur présence dans les écosystèmes cultivés.

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, Darwin (1881) évoquait l'importance des oligochètes dans la formation, la dynamique et la fertilité des sols. Il écrit: "Le labour est l'une des plus ancienne invention de l'homme mais bien longtemps avant cette pratique, le sol a toujours été régulièrement labouré par les vers de terre". Plus récemment, les vers de terre ont été promus au grade d'« ingénieurs de l'écosystème » (Lavelle *et al.*, 1997), au sens décrit par Jones *et al.* (1994): ils modifient directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour d'autres organismes de la biocénose. Ils ont un rôle important au sein des agrosystèmes car ils participent à la dynamique physique, chimique et biologique du sol, à travers trois principales fonctions : la création de galeries, l'alimentation et les rejets ainsi que la création de middens.

I.2.1. Création de galeries

La création de galeries peut être une réponse des vers de terre à différentes contraintes telles que la teneur en nourriture et en eau, la température ou le degré d'oxygénation (Jégou *et al.*, 2002). Les galeries des vers de terre augmentent la macroporosité du sol et, par conséquent, contribuent à son aération (Lavelle *et al.*, 1997 ; Capowiez *et al.*, 2009) et à l'infiltration de l'eau (Ernst *et al.*, 2009a). Elles facilitent aussi la pénétration des racines (Figure 1) ainsi que les mouvements des invertébrés (Jégou *et al.*, 2002). Une meilleure infiltration de l'eau peut minimiser le ruissellement, l'érosion et le transport d'éléments dissous dans l'eau de surface, ce qui réduit les risques de pollution des sols. Mais, à l'inverse, les galeries de vers de terre peuvent accélérer le transfert en profondeur des produits phytosanitaires vers les nappes phréatiques. Ce transfert rapide, qui s'opère par écoulement turbulent dans les galeries d'anéciques, ne laisse pas le temps aux microorganismes d'agir pour détoxifier ou dégrader un certain nombre de produits.

Par ailleurs, en creusant leurs galeries, les vers de terre mélangent les horizons du sol et enfouissent les résidus des cultures. Ce phénomène de bioturbation joue un rôle important dans la fragmentation et la minéralisation de la matière organique du sol.

Un autre aspect de l'action positive des vers sur la composante physique du sol est celui de leur effet sur la stabilité structurale : en produisant des turricules, dont la stabilité structurale est plus élevée que celle des agrégats environnants, ils accroissent la résistance à la battance et à l'érosion (Blanchard *et al.*, 1997 ; Blanchard *et al.*, 2004).

I.2.2. Alimentation et les rejets

On distingue deux régimes alimentaires chez les vers de terre. Premièrement, les détritivores, qui se nourrissent de litière végétale et de racines mortes situées à la surface ou dans les horizons de surface, riches en matières organiques. Il s'agit principalement des anéciques et des épigés. Deuxièmement, les vers de terre géophages qui ingèrent de grandes quantités de sol au niveau des horizons plus profonds. Ce sont essentiellement des endogés. Perel (1977) distinguait ainsi les vers de terre qui « fabriquent » l'humus de ceux qui le consomment.

La production journalière de rejets varie fortement entre espèces. En régions tropicales, la quantité journalière de sol qui transite dans le tube digestif d'un ver varie entre 0,08 et 0,50 g de sol sec/g ver pour les anéciques et entre 0,07 et 0,80 g de sol sec/g ver pour les épigés. Les vers endogés tropicaux excrètent quant à eux entre 1 et 7 g/g/jour pour les adultes et jusqu'à 35 g/g/jour pour les juvéniles de *Millsonia anomala* (Blanchard *et al.*, 2004 ; Lavelle & Spain, 2001).

Les activités alimentaires et de rejet des vers de terre affectent différemment la matière organique du sol en fonction de l'échelle de temps considérée puisqu'à court terme, l'activité des vers de terre favorise la minéralisation de la matière organique alors qu'à long terme, ils participent à la formation de l'humus et à la stabilité structurale.

A long terme, l'activité des vers de terre induit la production de matières organiques stables, qui se retrouvent physiquement protégée à l'intérieur des déjections (Gobat *et al.*, 2003). Les vers de terre participent ainsi à la séquestration du carbone.

I.2.3. Création de middens

Certaines espèces de vers anéciques forment des amas de débris organiques au niveau de l'orifice de leur galerie, à la surface du sol. Ces structures, appelées middens (Hamilton & Sillman, 1989) sont constitués de débris organiques plus ou moins enfouis à l'entrée des galeries et mélangés avec des turricules déposés à la surface (Figure 1).

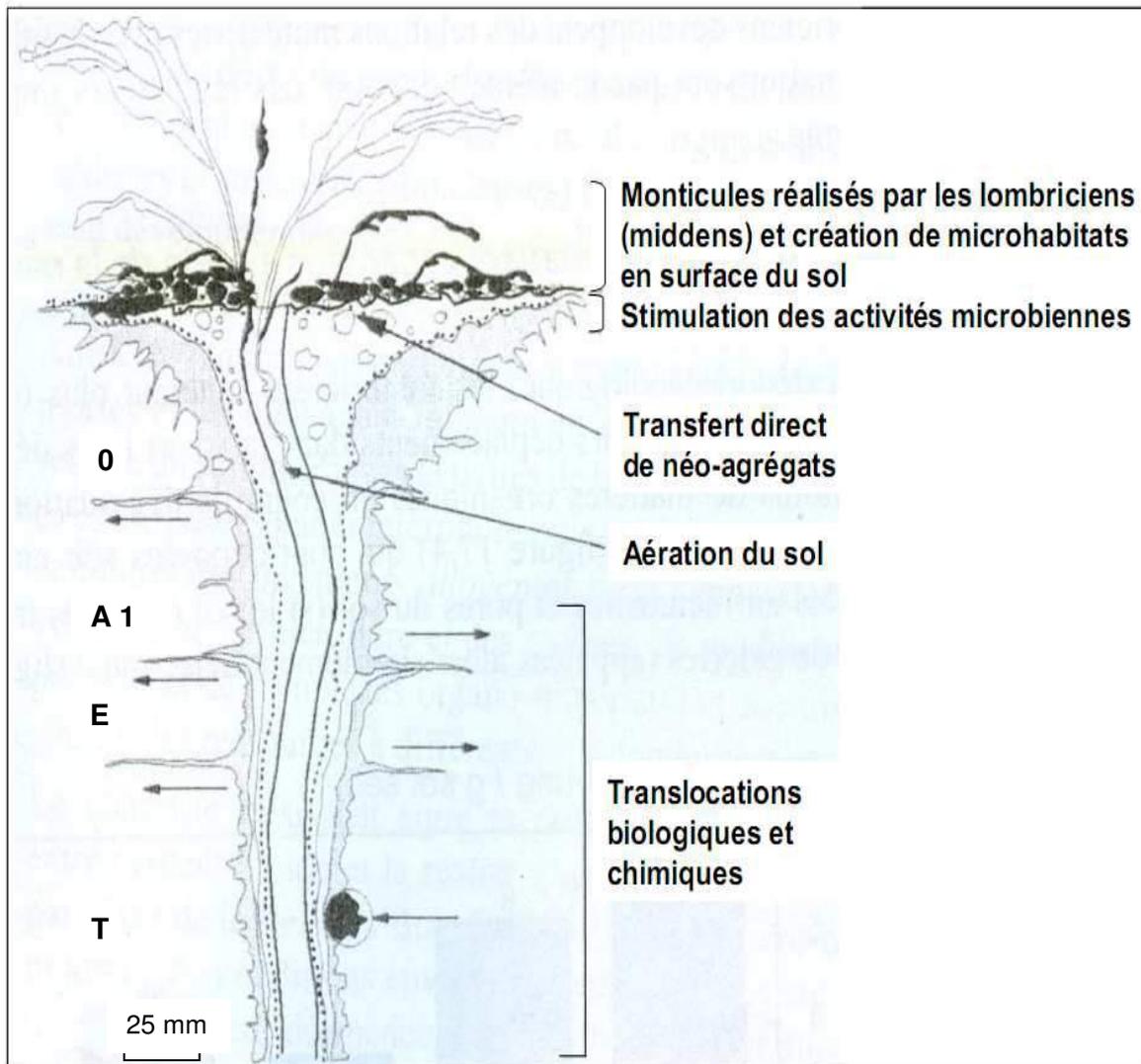


Figure 1 : Coupe longitudinale d'une galerie réalisée par une espèce de vers de terre anécique avec le monticule associant déjections et fragments organiques (Cluzeau *et al.*, 2005). Ce schéma montre les différentes actions exercées sur le sol par les vers de terre : stimulation de l'activité microbienne en surface, création d'agrégats stables protégeant les matières organiques et libération d'éléments minéraux le long des parois des galeries (dans la drilosphère).

Les conditions de température et d'humidité régnant au sein de ces petits monticules entraînent un développement d'activités microbiennes qui utilisent le substrat des composés facilement assimilables contenus dans les déjections des vers et les fragments organiques (Cluzeau *et al.*, 2005). Ces fragments organiques, partiellement dégradés, sont ensuite consommés par le ver occupant la galerie et progressivement enfouis au sein du profil.

I.3. VERS DE TERRE ET FONCTION D'INDICATEURS BIOLOGIQUES DE LA QUALITE DU SOL

I.3.1. Concept de qualité des sols

La notion de qualité du sol est profondément complexe. Si la fertilité des sols est définie et étudiée depuis longtemps, car répondant à la fonction première de production des sols recherchée en agronomie, il a fallu attendre dans les années 1990 pour que la première définition de la qualité des sols établie par Larson & Pierce (1991) apparaisse. Cette définition présente la qualité du sol comme «la capacité de ce sol à soutenir les fonctions de l'écosystème et à interagir positivement avec l'environnement extérieur à cet écosystème». A travers une telle définition, les auteurs évoquent explicitement les bénéfices que peuvent apporter les sols à leur environnement extérieur. Si leur vision n'était sans doute pas exclusivement anthropocentrée, elle englobait l'ensemble des fonctions et des services rendus par les sols aux sociétés humaines, bien au-delà de la seule fonction de production. De plus, les auteurs reconnaissent à travers cette définition que l'unicité de la qualité du sol n'existe pas, de par la diversité des types de sols et des écosystèmes.

Au cours des années 1990 et 2000, le concept de qualité des sols fut retravaillé et affiné par la communauté scientifique, notamment par l'Association Américaine de Science du Sol. Doran & Parkin (1994) ont proposé une version plus élaborée intégrant la diversité des usages du sol, le maintien de la qualité environnementale, de la productivité biologique, et de la santé des plantes, des animaux et de l'humanité. Doran & Safley (1997) ont différencié santé et qualité des sols, en ajoutant la nécessité pour un sol en bonne santé de fonctionner comme un système vivant. Ces auteurs présentent une vision holistique d'un sol vivant et dynamique dont le fonctionnement dépend de ses caractéristiques propres et des usages que l'homme en fait. Eijsackers (2004) a défini la qualité des sols comme leur capacité à maintenir un fonctionnement correct grâce à une diversité de processus et d'organismes qui réalisent ces processus. La qualité des sols est donc présentée comme l'état de santé d'un système écologique complexe, renforçant la vision de Doran & Safley (1997).

Ces définitions, loin de proposer un critère absolu pour évaluer une qualité des sols unique, présentent la qualité des sols comme dépendante de leur variabilité naturelle, de l'usage choisi par les sociétés humaines et du climat qui les environne. Toutefois, c'est en 2008 que l'approche de Kibblewhite *et al.* vient apporter une vision un peu plus réaliste de la qualité ou de la santé des sols car s'appuyant sur la notion de services écosystémiques. Ils définissent un sol de bonne qualité comme un sol capable de soutenir une production d'aliments et de fibres suffisante pour l'homme, tout en fournissant de manière continue d'autres services écosystémiques essentiels pour l'entretien de la vie et la conservation de la biodiversité.

La vision anthropocentrée des sols et de leur qualité permet de mieux répondre à l'exigence d'évaluation des politiques de protection des sols. Les réglementations fixant des objectifs d'amélioration d'une fonction ou d'un service fourni par les sols à la société, il est plus facile de satisfaire cette commande à travers des indicateurs spécifiques de qualité du sol. De tels indicateurs capables de quantifier et de surveiller dans le temps et l'espace un service fourni par les sols constituent l'enjeu majeur de la recherche sur la qualité des sols.

I.3.2. Indicateurs de la qualité des sols

L'évaluation de la qualité des sols requiert des indicateurs qui reflètent les conditions de vies existantes dans ce milieu et qui définissent son fonctionnement : son état physique (porosité, agrégation et leurs conséquences sur les propriétés hydrauliques), chimique (l'état des réserves organiques dans le sol et leur disponibilité, l'acidité) et biologique (activité microbienne, activité des organismes du sol) (Zornoza *et al.*, 2007 ; 2008). Les indicateurs de la qualité des sols peuvent être définis comme des propriétés physiques, chimiques, biologiques et des processus mesurables qui permettent d'appréhender le fonctionnement des sols (Aparicio & Costa, 2007). Ces indicateurs qui permettent d'évaluer la durabilité des types d'usage des sols et les pratiques de gestion (Aparicio & Costa, 2007), doivent notamment traduire une fonction spécifique du sol (Andrew *et al.*, 2004), un service écosytémique rendu (Velasquez *et al.*, 2007a) ou une menace (Morvan *et al.*, 2008). La figure 2 ci-après illustre le concept de qualité des sols à travers l'utilisation des indicateurs en relation avec les fonctions du sol.

Selon Nortcliff (2002), tout effort d'évaluation de la qualité des sols faisant abstraction d'indicateurs pertinents sera moins réaliste et de peu de mérite. Pour ce faire, la sélection des indicateurs doit être basée sur les modalités suivantes :

- le mode d'utilisation du terrain,
- la relation entre un indicateur et la fonction du sol étudié,

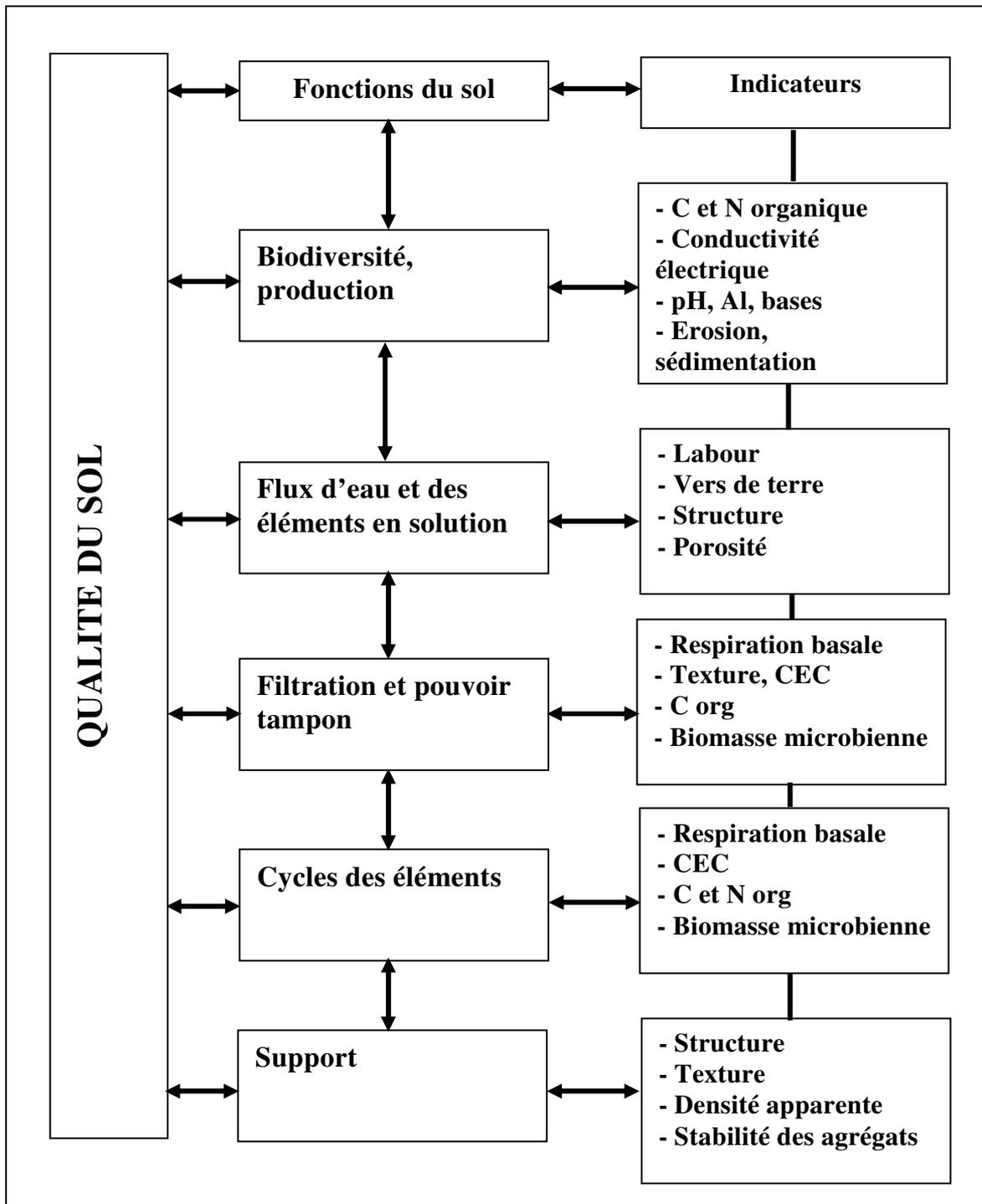


Figure 2 : Schéma du concept de qualité des sols utilisant des indicateurs en relation avec les fonctions du sol (Mausbach & Tugel, 1997).

- la facilité et la fiabilité des mesures,
- la variabilité du temps et de la surface d'échantillonnage,
- la sensibilité de la mesure aux changements de climat et d'usage du sol,
- la possibilité de réaliser un échantillonnage et une analyse de routine,
- l'habileté requise pour utiliser les méthodes et analyser les résultats.

Les paramètres régulièrement proposés comme indicateurs physiques de la qualité du sol sont par exemple la densité apparente, la porosité, l'infiltration, la capacité de rétention en eau, la stabilité des agrégats et la texture du sol (Hseu *et al.*, 1999 ; Logsdon & Karlen, 2004 ; Mariscal *et al.*, 2007).

Pour ce qui concerne les indicateurs chimiques de la qualité, le pH, la teneur en matière organique, la capacité d'échange en cations, la conductivité électrique, l'azote, le phosphore et le potassium extractibles sont régulièrement utilisés (Doran & Parkin, 1994 ; Velasquez *et al.*, 2005 ; Brunet *et al.*, 2007 ; Golchin & Asgari, 2008 ; Cécillon *et al.*, 2009).

Eijsackers (1982) définit les indicateurs biologiques de la qualité des sols comme des organismes qui répondent à un stress par leur présence ou leur absence, par les modifications de certaines caractéristiques ou activités particulières, ou par la bioaccumulation de certains contaminants. Les indicateurs biologiques les plus fréquemment proposés sont les activités enzymatiques, la biomasse microbienne, la respiration du sol, l'azote minéralisable, la température du sol et la macrofaune du sol (Lobry de Bruyn, 1997 ; Van Eekeren *et al.*, 2008 ; Zornoza *et al.*, 2008 ; Xueyong *et al.*, 2009 ; Marzaioli *et al.*, 2010).

I.3.3. Vers de terre comme indicateurs de la qualité des sols

Les vers de terre revêtent des caractéristiques intéressantes de bioindicateurs de la qualité des sols en ce sens qu'ils revêtent une diversité de réponses à travers la diversité d'habitats (litière, sol) et des régimes alimentaires. Ils sont en contact permanent avec le sol ; ils y habitent et s'en nourrissent. Ils ont une taille relativement grande (entre 10 mm et 100 cm de longueur, Pop & Postolache, 1987) et une vitesse de déplacement limitée. En conditions naturelles, un individu peut parcourir une distance variant entre 1 et 2 m en un mois (Mazaud & Bouché, 1980). Ils sont indicateurs de l'état de pollution des sols par les métaux lourds (Nahmani *et al.*, 2006), de l'état chimique (pesticides, biocides) (Edwards & Bohlen, 1996), de la compaction et la condition hydrique du sol (Jégou *et al.*, 2002).

I.4. INDICATEURS SYNTHETIQUES DE LA QUALITE DES SOLS : CAS DE L'INDICE GENERAL DE LA QUALITE DES SOLS (IGQS)

Depuis les 15 dernières années, le développement d'indices mathématiques, qualitatifs, quantitatifs et intégrant l'ensemble des informations analytiques recueillies est devenu le nouveau paradigme des scientifiques (Doran & Parkin, 1994 ; Andrews *et al.*, 2004 ; Zornoza *et al.*, 2008 ; Qi *et al.*, 2009). Un indicateur ne peut traduire pleinement à lui seul l'état de fonctionnement d'un sol en raison de la complexité et de la diversité des phénomènes qui s'y déroulent. Pour cette raison, un minimum de jeu de données est normalement requis afin d'interpréter correctement ces multiples processus (Doran & Parkin, 1994). Un bon indicateur doit être la combinaison des paramètres physiques, chimiques et biologiques (Barrios *et al.*, 2006), lesquels paramètres sont capables de révéler l'état de « santé » du sol (Dumanski & Pieri, 2000).

Selon Par *et al.* (1992), l'indice de qualité doit être défini par l'équation : $SQI = f(SP, P, E, H, ER, BD, FQ, MI)$. L'indice est alors fonction des propriétés du sol (SP), de son potentiel de productivité (P), des facteurs environnementaux (E), de la santé humaine et animale (H), de l'érodibilité du sol (ER), de sa biodiversité (BD), de la qualité des produits alimentaires qu'il fournit (FQ), et des méthodes de gestion qui lui sont appliquées (MI).

L'indice de la qualité des sols constitue un barème de référence pour l'évaluation de la qualité des sols dans la mesure où il permet de surveiller et de prévoir les modifications de la qualité des sols consécutives aux activités agricoles perturbantes (Erkossa *et al.*, 2007). Les formulations synthétiques des indicateurs (indices) offrent une information et une communication sur un sujet ou une situation évolutive, voire une classification, et donnent par agrégation de données ou d'indicateurs hétérogènes, une approche résumée et simplifiée de systèmes complexes (Figure 3) (CORPEN, 2003).

Face aux besoins grandissants d'évaluation et de contrôle de la qualité des sols, plusieurs méthodes d'élaboration des indices ont été proposées dans la littérature. Des tentatives partielles ont été faites pour combiner des groupes de variables en indicateurs. Breure *et al.* (2004), par exemple ont proposé un indicateur biologique de la qualité du sol basé sur la représentation graphique des fonctions suivantes du sol : décomposition de la matière organique, cycle des minéraux, disponibilité en élément minéraux, formation de la structure et stabilité du sol. Par des mesures directes de la biodiversité faunistiques (composition spécifique et l'abondance de 15 ordres de macroinvertébrés),

L'intégration synthétique des données dans un système d'information

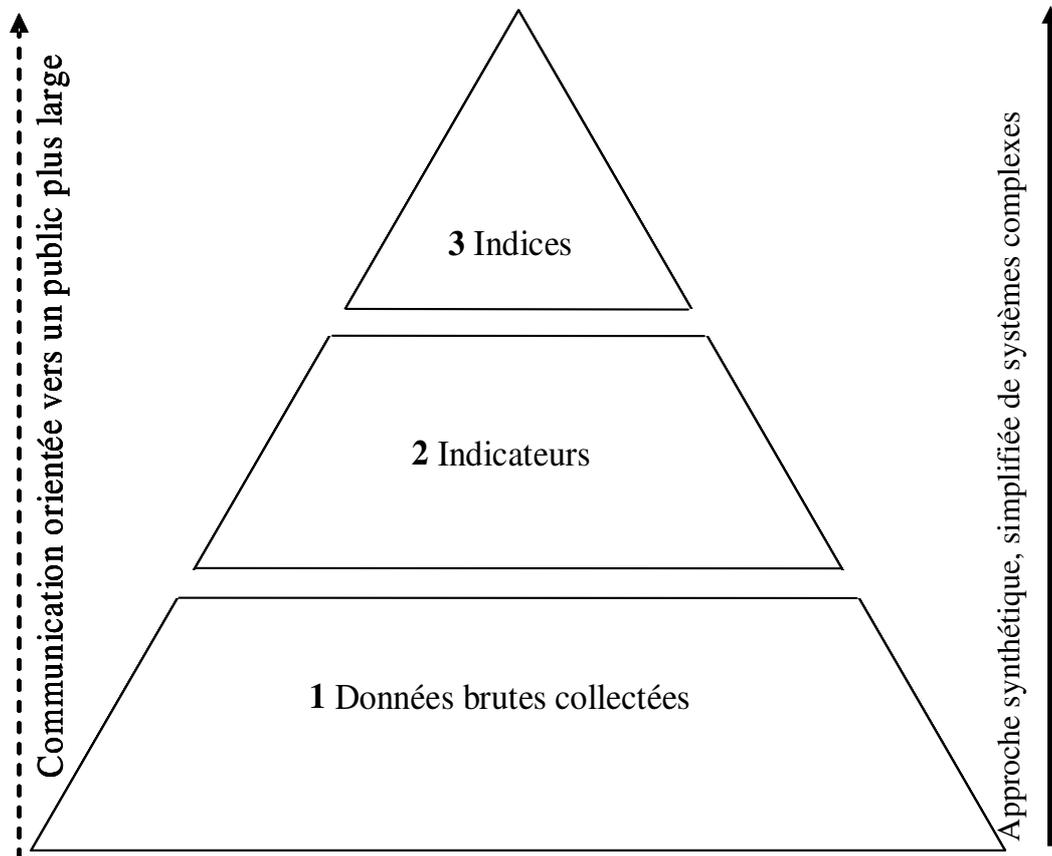


Figure 3: Représentation de la place d'un indice dans les étapes de structuration de l'information. De la base vers le sommet, le traitement de l'information est plus finalisé, l'information est davantage condensée, simplifiée et agrégée, la fonction de communication est privilégiée (d'après le Comité d'Orientation pour les Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement, CORPEN, 2003).

Ruiz-Camacho (2004) a mis au point dans quatre régions de France un indicateur biologique de la qualité des sols (IBQS). L'IBQS est basé sur la méthode Indval et utilise 38 taxons pour octroyer une note de qualité comprise entre 1-20 (1-4 mauvaise, 5-8 moyenne, 9-12 bonne, 13-17 très bonne et de 18-20 optimale). Mais les méthodes les plus fréquemment utilisées sont celles procédant d'abord par la réduction et la pondération des indicateurs, et leur combinaison en indice (Hussain *et al.*, 1999; Andrews & Carroll, 2001; Zornoza *et al.*, 2007).

Velasquez *et al.* (2007a) ont élaboré dans deux sites dont l'un en Colombie et l'autre au Nicaragua, un indicateur général de la qualité des sols (IGQS) basé sur l'approche holistique de la qualité. C'est également cet indicateur que nous utiliserons dans nos travaux pour évaluer la qualité des sols de nos sites qui n'ont jamais fait auparavant l'objet d'étude d'évaluation de la qualité. L'IGQS est la combinaison des sous indicateurs de la qualité physique, chimique, de la matière organique, de la morphologie et notamment des peuplements de la macrofaune, dont les sélections ont été guidées par des analyses multivariées. Il permet l'évaluation de la qualité du sol (quantification de la qualité sur une échelle commune de 0,1 à 1) et facilite l'identification des zones à problèmes par les valeurs individuelles de chaque sous-indicateur. Il permet de suivre le changement de la qualité à travers le temps et de guider la mise en œuvre des technologies de restauration des sols.

L'approche de Velasquez *et al.* (2007a) consiste à évaluer les services écosystémiques fournis par les sols en utilisant une série de 54 variables couramment utilisées pour décrire les multi-aspects de la qualité du sol (Lavelle *et al.*, 2006). La morphologie et les sous indicateurs de la qualité physiques sont liées à des services reflétant les propriétés hydrauliques des sols (stockage et l'infiltration de l'eau, la protection contre l'érosion et les inondations) (Topoliantz *et al.*, 2000 ; To & Kay, 2005). Les sous-indicateurs chimiques évaluent la fertilité du sol et sa capacité à soutenir la production végétale (Lavelle & Spain, 2006). La matière organique est une réserve de cations et renseigne sur la séquestration du carbone dans les sols (Reeves, 1997) et enfin les sous indicateurs de la macrofaune évaluent la biodiversité et la capacité des sols à préserver les organismes vivants (Mathieu *et al.*, 2005).

CHAPITRE II :
MILIEU D'ETUDE

II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

L'étude a été conduite à Goulikao dans le Département d'Oumé, dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, précisément à 6°31'13'' de latitude Nord et 5°28'59'' de longitude Ouest (Figure 4). Le Département d'Oumé occupe une position centrale dans la moitié Sud de la Côte d'Ivoire. Cette région présente un des plus forts taux de déforestation due à la cacao-culture, et fait partie, à ce titre, des zones du "front pionnier" ivoirien (Brou *et al.*, 2005). La zone d'étude s'étend sur un ensemble de 3 sites faisant référence à des campements d'allochtones. Il s'agit, en l'occurrence, des sites Petit Bouaké (06°31'23'' de latitude Nord et 05°32'51'' de longitude Ouest), Djè Koffikro (06°28'80'' de latitude Nord et 05°30'47'' de longitude Ouest) et N'Kroiêdjô (06°30'96'' de latitude Nord et 05°30'21'' de longitude Ouest), tous environnant le village de Goulikao. Ces campements font partie de la zone périphérique de la forêt classée de la Téné. Par ailleurs, ils sont caractérisés par une baisse de la production agricole, consécutive à une dégradation des sols.

II.2. CLIMAT

Le climat de la région d'Oumé est de type subéquatorial attéen à pluviométrie bimodale. Il se caractérise par deux saisons de pluies qui alternent avec deux saisons sèches. Les saisons de pluie s'étendent de Mars à Juin (la grande saison des pluies), puis de Septembre à Octobre (la petite saison des pluies). Les saisons sèches vont de Novembre à Février pour la grande saison, puis de Juillet à Août pour la petite saison sèche.

Les données climatiques de la zone d'étude, étendues sur une période de 20 ans (1990-2009), proviennent de la station météorologique SODEXAM de Gagnoa.

II.2.1. Pluviométrie

Les précipitations enregistrées au cours des 18 années (1990-2007) précédant notre étude sont distribuées autour d'une moyenne annuelle de 1364,2 mm (Figure 5a); le minimum enregistré est de 1006,4 mm en 1992 et le maximum de 1847,6 mm en 2003. Les pluviosités moyennes mensuelles oscillent entre 21,5 mm en Janvier et 190,8 mm en Avril. Les précipitations totales pendant les deux années d'étude s'élèvent à 1626,7 et 1356,1 mm respectivement en 2008 et 2009. Pendant l'année 2008, les mois de Janvier (0 mm) et Décembre (41,9 mm) sont les moins arrosés, tandis que les plus fortes précipitations ont été relevées courant les mois d'Avril (213,6 mm) et Mai (234,3 mm). En 2009, les précipitations étaient comprises entre 1,5 mm en Décembre et 364,7 mm en Avril (Figure 5b).

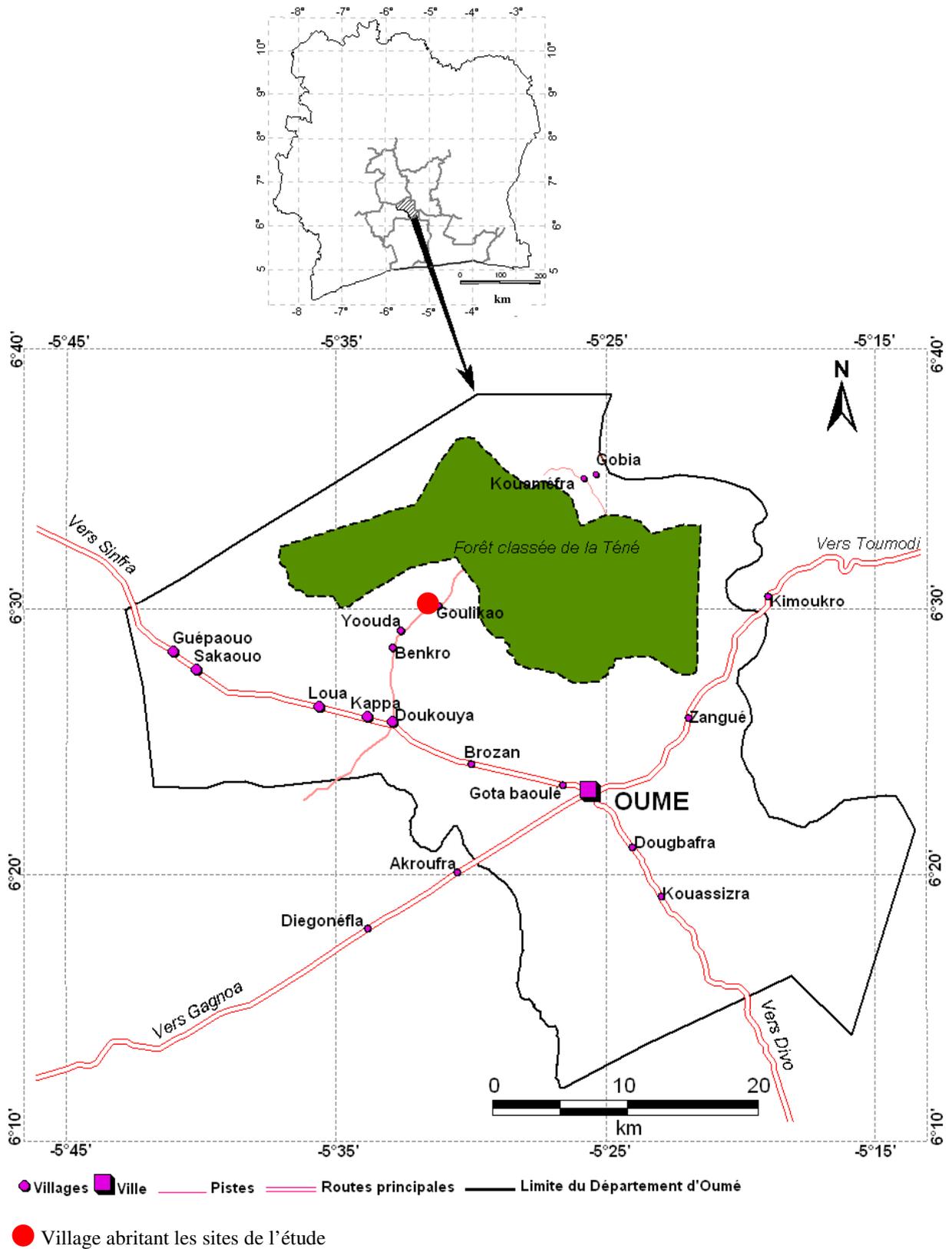


Figure 4 : Carte du Département d'Ouhé montrant l'emplacement géographique de la zone d'étude (Source : BNETD, 2003)

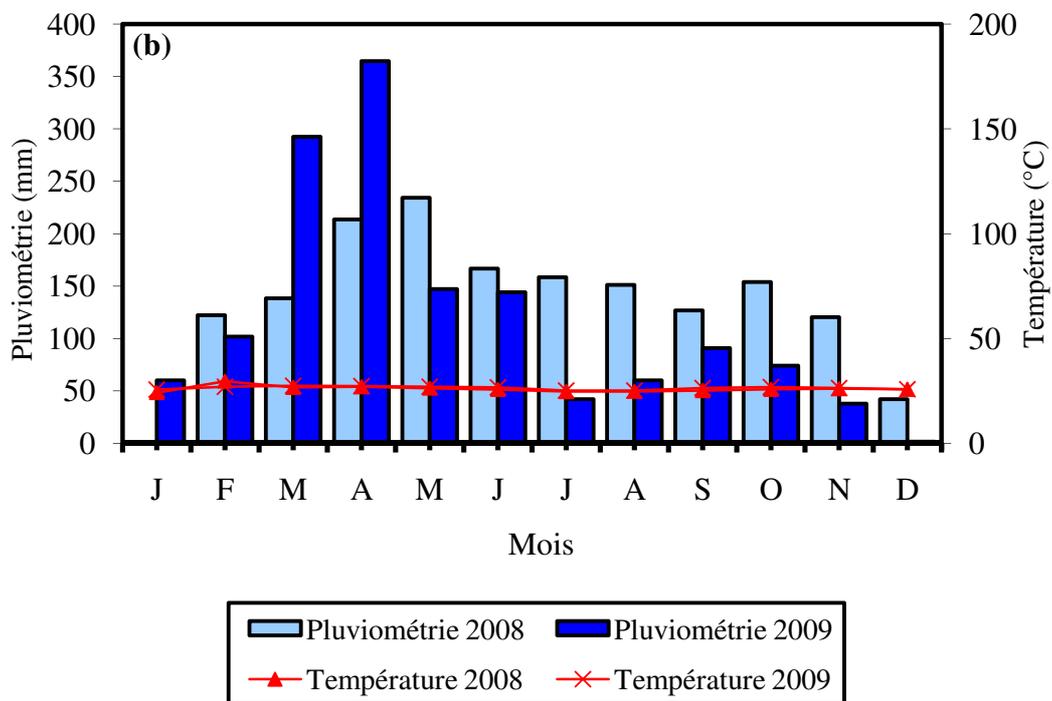
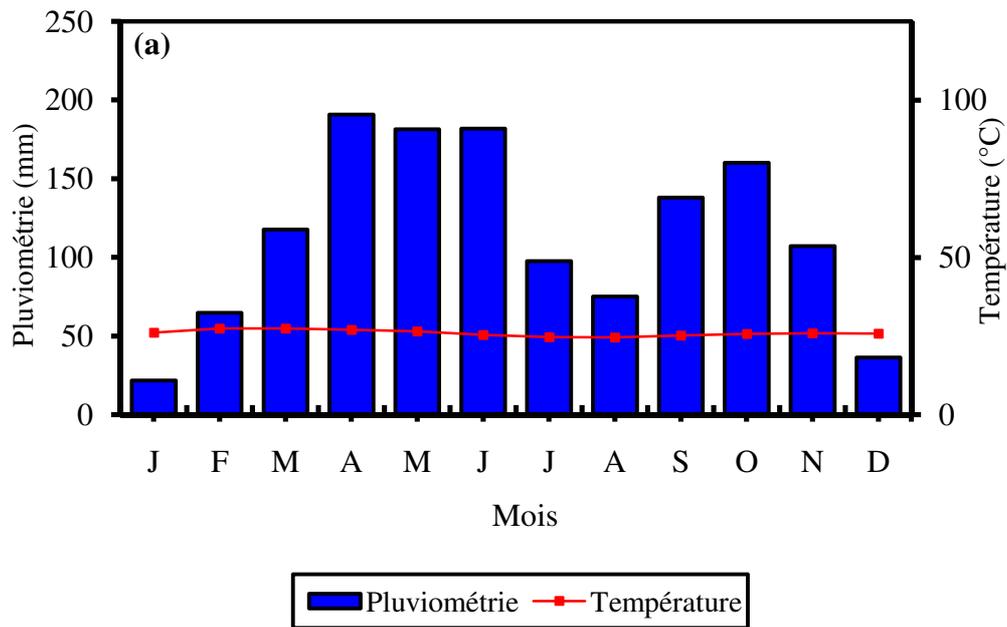


Figure 5 : Diagrammes ombrothermiques (a) sur 18 ans (1990–2007) et (b) au cours des années 2008 et 2009 (SODEXAM, Gagnoa).

II.2.2. Température et durée d'insolation

La température moyenne annuelle sur 18 ans (1990-2007) s'élève à 25,9°C. Les minima mensuels sont de 24,5 et 24,6°C, respectivement en Août et Juillet, et les maxima de 27,3°C (Mars) et 27,4°C (Février) (Figure 5a). Les variabilités inter-mensuelles sont faibles ; l'amplitude thermique moyenne est généralement inférieure à 3°C. Les températures moyennes des années 2008 et 2009 sont respectivement de 25,9 et 26,4°C. Les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 24,1 et 29,6°C en 2008. Alors qu'en 2009, elles sont comprises entre 25,1 et 27,4°C. En général, Mars, Avril et Mai sont les mois les plus chauds, tandis que Juillet et Août sont les mois les moins chauds (Figure 5b).

La durée annuelle d'insolation (1990-2009) est d'environ 1800 à 2000 heures. Les insolation les plus basses s'observe en Août (110 heures) tandis que la durée d'insolation est plus importante au cours des 4 premiers mois de l'année (210-250 heures).

II.2.3. Humidité atmosphérique

L'humidité atmosphérique régule la perte d'eau du sol par évapotranspiration et celle des plantes par transpiration (Schnell, 1970). L'hygrométrie relative moyenne est de 79 % sur 20 ans (1990-2009). Les mois de Janvier et Février sont caractérisés par une humidité relativement faible (71%), et les mois allant de Mai à Octobre ont les plus fortes valeurs d'hygrométrie (80-83 %).

II.3. SOLS

Les sols d'Oumé appartiennent à la famille des sols ferralitiques moyennement désaturés. Ils présentent trois unités morpho-pédologiques (Avenard *et al.*, 1971) :

- sols ferralitiques moyennement désaturés, avec recouvrement, issus de granite, au Nord (axe Oumé-Sinfra). Ces sols sont profonds et possèdent une texture argileuse avec des gravillons ferrugineux en haut de versant. En bas de versant, la texture est sableuse avec une accumulation de fer à partir de 40 cm.
- sols ferralitiques moyennement désaturés, sans recouvrement, issus du granite, au Sud (axe Oumé-Gagnoa). Ces sols se caractérisent par une texture argileuse en haut de versant et une texture sablo-argileuse en bas de versant.
- sols ferralitiques faiblement désaturés et des sols bruns eutrophes issus des roches basiques (amphibolites), au sud-est. Ces sols sont gravillonnaires et ferrugineux à texture argilo-limoneuse en haut de versant avec la présence de cuirasse à partir de 80 cm. En bas de versant, la texture est limono-sableuse avec des concrétions ferrugineuses.

De façon générale, les sols de la région d'Oumé présentent un horizon gravillonnaire épais et un concrétionnement important (Figure 6). Ils sont souvent indurés sur le sommet et à mi-versant avec des caractéristiques chimiques suivantes: un pH légèrement acide (6,5); un taux de saturation en bases supérieur à 50%; une somme de bases échangeables de 13,5 cmolckg⁻¹; une carence en phosphore assimilable (0,48%); une teneur en argile supérieure à 30%; un taux de matière organique voisin de 5 %. La faiblesse de la somme des bases échangeables (13,5 cmolc kg⁻¹) est due à la forte intensité du drainage et du lessivage (Assié *et al.*, 2008).

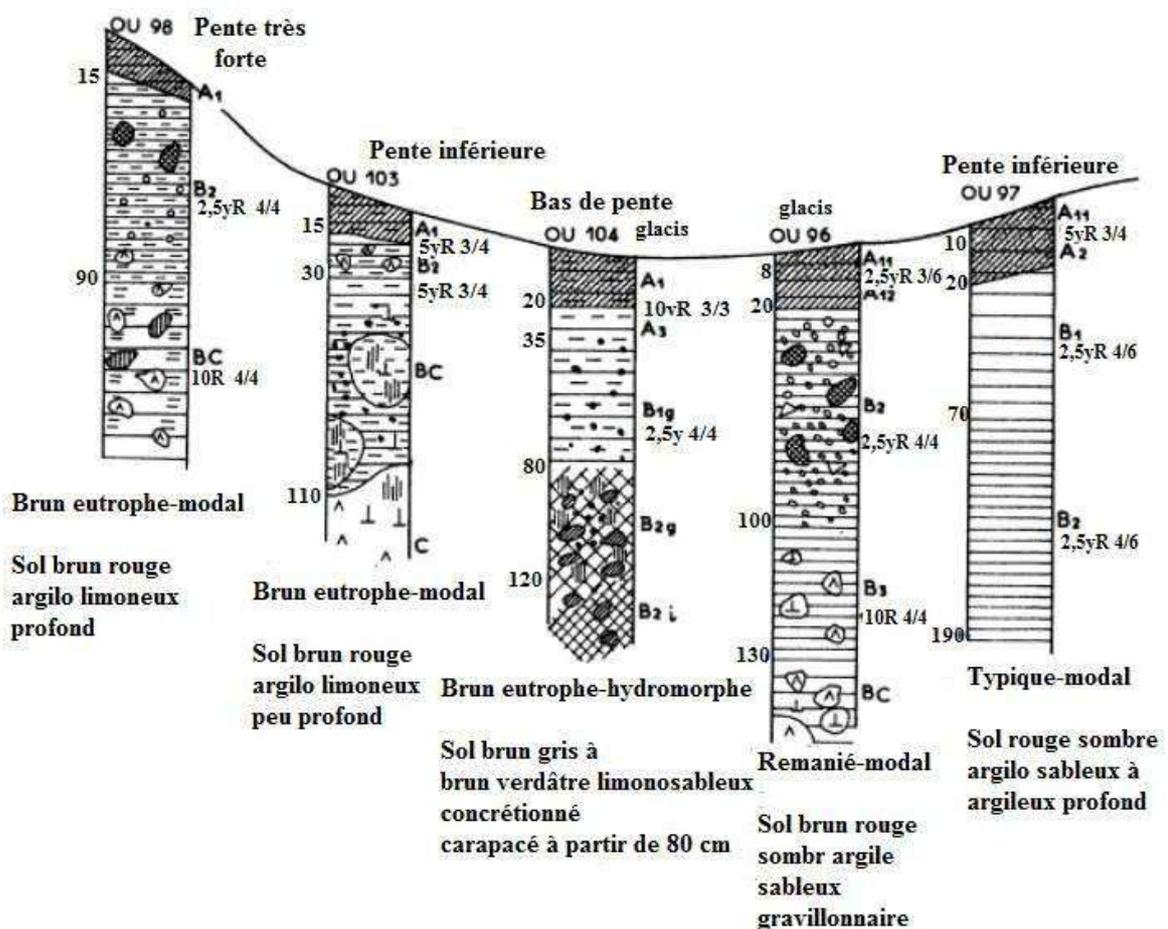


Figure 6 : Carte pédologique de la région d'Oumé (Avenard *et al.*, 1971)

II.4. VEGETATION

Le Département d'Oumé appartient au secteur mésophile du Domaine Guinéen. Il se trouve dans la zone de transition entre la forêt au Sud et la savane à *Borassus aethiopium* (Arecaceae) au Centre. La végétation originelle est une forêt dense humide semi-décidue dominée par les espèces *Celtis spp* (Ulmaceae) et *Triplochiton scleroxylon* (Sterculiaceae) Elle abrite de précieuses essences telles que : Fraké (*Terminalia superba*, Combretaceae), Sipo (*Entandrophragma utile*, Meliaceae), l'Ako (*Antiaris toxicaria*, Moraceae) et Lotofa (*Sterculia rhinopetala*, Sterculiaceae) (Monnier, 1983). Ces forêts existent encore sous forme d'îlots dans le domaine rural dont les principales composantes sont des exploitations agricoles (cultures vivrières, cacaoyers, caféiers) et des jachères. Le couvert végétal peut être réparti en trois types de faciès (Lecompte, 1990) :

- les écosystèmes naturels composés de forêts classées et d'îlots forestiers dans le domaine rural. Les forêts classées occupent une superficie totale de 120.000 ha et composées de quatre massifs forestiers : Téné, Sangoué, Zuoké et Doka. La pression due à l'exploitation forestière et l'agriculture itinérante a favorisé la dégradation de la plupart de ces massifs forestiers. Aujourd'hui, les deux forêts classées résiduelles (Téné et Sangoué) ne s'étendent plus qu'à 79.000 ha,
- les agrosystèmes qui regroupent les cultures pérennes de caféiers et de cacaoyers, les champs de vivriers associés de bananiers, d'ignames, de maniocs et de légumes (aubergine, piment et gombo). Les surfaces cultivées en cacaoyers et caféiers sont estimées à 50.000 ha hors forêts classées. Ces plantations occupent la plus grande partie des terres de la région. Certaines d'entre elles deviennent des jachères arbustives quand elles sont âgées et abandonnées,
- les jachères naturelles à *Chromolaena odorata* (Asteraceae) consécutives aux cultures vivrières. Dans ces jachères, l'épais tapis de *C. odorata* disparaît progressivement au profit d'espèces arborées telles qu'*Albizia adianthifolia* (Mimosaceae) et *A. zygia* (Mimosaceae).

II.5. POPULATIONS ET PRATIQUES CULTURALES

II.5.1. Populations

Selon les données du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 1998 (INS, 1998), la population du département d'Oumé est de 176000 habitants. Cette population est dominée par les ivoiriens qui occupent une proportion de 68%, contre 32% d'étrangers.

La population du village de Goulikao et de ses campements environnants est estimée à 2427 habitants, avec une forte densité (58 habitants/km² contre une moyenne nationale de 48 habitants/km²) (INS, 1998). La population autochtone est constituée de deux principales ethnies : les Gagou, appelés aussi Gban (groupe Mandé du sud), majoritaires sur la moitié ouest du département et les Gouro (groupe Mandé du sud). Les populations allochtones sont essentiellement composées de Baoulé, de Sénoufo et de Malinké ainsi que des étrangers venus de la sous-région ouest-africaine dont la majorité est burkinabé.

II.5.2. Dynamique démographique

Avec un taux de croissance annuelle de 5,4% entre les années 1965 et 1973, la population d'Oumé était caractérisée par une forte croissance. Celle-ci était liée à la disponibilité en terres forestières (Lecompte, 1990) et au fort taux de natalité. Le dernier recensement de la population effectué en 1998 fait état d'un taux d'accroissement de 2,1% avec une densité estimée à 77,9 habitants/km². Il s'agit donc d'une zone densément peuplée avec des conséquences évidentes de dégradation du couvert végétal.

II.5.3. Pratiques culturelles

La principale pratique culturelle adoptée par les populations dans la zone de Goulikao est la culture itinérante sur brûlis. Par définition, la culture itinérante est un système de culture dans lequel des périodes de culture continue relativement brèves sont suivies des périodes de jachères relativement longues. La pratique du brûlis demande peu de travail ; la cendre fertilise le sol ; et l'effet de lessivage accroît la teneur du sol en éléments fertilisants utiles. Toutefois, le feu cause la mort des organismes épigés et ceux de faible profondeur (Yao, 2008). L'agriculture itinérante qui était autrefois la forme la plus importante d'agriculture dans la zone est aujourd'hui en voie de disparition au profit de la culture pérenne de rente.

II.5.3.1. Cultures de rente

Le défrichage de la forêt au profit des cultures de rente de cacao avait atteint son point culminant dans les années 1980. Les plantations de cacaoyers sont associées au départ aux cultures vivrières (banane plantain, igname, manioc...). Après 3 à 4 ans, la culture associée cède la place à la monoculture de cacao. Les planteurs préfèrent associer la banane plantain, l'igname et autres vivriers aux plantations de cacaoyers pour fournir de la nourriture à la famille et générer des revenus par la commercialisation de celle-ci. En outre, les bananiers servent d'ombrage aux jeunes plants de cacaoyers (Yao, 2008).

L'itinéraire technique suivi généralement par les planteurs après la mise en place de la plantation consiste à pratiquer trois (3) désherbages dans l'année selon la main d'œuvre

disponible : Juin à Juillet (période de fructification), Janvier à Février (période de récolte) et Avril. Les périodes de désherbage sont suivies par les séances de traitement des cacaoyers par pulvérisation d'insecticides. On estime à 41% la proportion des planteurs qui n'achètent pas les produits phytosanitaires ou qui traitent une fois. Tandis que 47% des paysans ne traitent que deux fois, c'est-à-dire après la vente de leurs récoltes dans les mois de Février et Avril. La plupart des planteurs effectuent deux traitements en Février après avoir vendu la récolte et en Avril, mais ils n'effectuent pas toujours le troisième traitement qui est pourtant nécessaire pendant la fructification. Le manque de moyens et la mauvaise gestion financière sont les principales raisons car les paysans savent que l'utilisation des insecticides est cruciale pour obtenir une récolte satisfaisante. Environ 23% des planteurs traitent régulièrement leurs plantations ; au moins trois fois dans l'année (Yao, 2008).

II.5.3.2. Cultures vivrières

Seules les jachères à *C. odorata* sont utilisées pour les cultures de vivriers avec un système de jachère a court terme (2 à 5 ans). Les principales cultures vivrières pratiquées sont la banane plantain, l'igname, le maïs, le manioc, le riz... Les bas-fonds servent à la culture du riz et aux cultures maraîchères, plus précisément la tomate. Les cultures vivrières occupent une très faible proportion sur les jachères dans la zone de Goulikao. Environ 20% des unités de productions familiales (UPF) possèdent des cultures vivrières sur des jachères. Les UPF sont constituées essentiellement d'allochtones et d'allogènes. Ces cultures vivrières mises en place sur les jachères sont destinées à la vente et aussi à la nourriture pour la famille. La mise en place des cultures sur ces jeunes jachères est l'œuvre des femmes et des enfants car les jachères sont de petites tailles (en moyenne 0.5 ha) (Yao, 2008).

Chez les autochtones Gban, les changements les plus importants sont la forte augmentation de la production et de la consommation de manioc, la généralisation de variétés de riz à cycle court, la baisse de la production de la banane plantain (base du régime alimentaire avec le riz) par suite de la disparition de la forêt, et la moindre importance du taro. Chez les allochtones baoulé, on note une baisse de l'importance de l'igname et des cultures vivrières en général par suite de la disparition des réserves forestières. Chez les Burkinabé, on note l'importance du maïs et du « riz chinois » à cycle court.

II.6. TYPES D'USAGE DES SOLS

Les 5 types d'occupations (Figure 7) du sol les plus répandues ont été caractérisées dans 23 types d'usage des sols, à savoir la forêt (3 parcelles), la plantation de cacaoyers (9 parcelles), la jachère (6 parcelles), la culture vivrière (3 parcelles) et les reboisements (2

parcelles). Les superficies des parcelles d'échantillonnage sont comprises entre 0.5 et 41.8 hectares (Tableau II). Les plantations de cacaoyers sont de 3 types d'âge : 5 ; 10 et 20 ans. Les parcelles de jachère sont âgées de 2 et 5 ans. Elles sont passées soit par une phase de culture de riz, maïs ou de manioc lors de leurs créations. Les reboisements de *Tectona grandis* sont repartis entre 2 types d'âge ; une teckeraie de 8 ans et une plantation de teck de 14 ans. Les parcelles de vivriers (maïs, arachide et manioc) sont toutes âgées de 3 à 6 mois.



Forêt secondaire



Cacaoyère



Teckeraie



Jachère naturelle



Culture vivrière

Figure 7 : Principaux types d'occupation du sol (Photos GUEI, 2008)

Tableau II: Différents types d'usages des sols de la zone d'étude

Sites	Types d'usage des sols	Superficies (ha)
Petit Bouaké	Forêt secondaire	2
	Cacaoyère de 20 ans	2
	Cacaoyère de 10 ans	2
	Cacaoyère de 5 ans	1,5
	Jachère de 5ans	1
	Jachère de 2ans	0,6
	Culture de maïs	0,7
Djè Koffikro	Forêt secondaire	15
	Cacaoyère de 20 ans	2
	Cacaoyère de 10 ans	1
	Cacaoyère de 5 ans	1
	Jachère de 5ans	1
	Jachère de 2ans	0,7
	Champ de manioc	1
N'Kroiêdjô	Forêt secondaire	10,5
	Teck de 1994 (ou de 14 ans)	27,9
	Teck de 2000 (ou de 8 ans)	36,1
	Cacaoyère de 20 ans	1,5
	Cacaoyère de 10 ans	2,3
	Cacaoyère de 5 ans	0,5
	Jachère de 5 ans	1
	Jachère de 2ans	0,8
	Cultures de maïs et arachides	0,5

Les 23 types d'usage des sols sont répartis entre les trois sites d'étude à raison de 9 parcelles sur le site de N'Kroiêdjô, 7 parcelles sur le site de Petit Bouaké et 7 parcelles sur le site de Djè Koffikro (Figure 8). Le choix des parcelles dans chaque site a été guidé par l'intention d'obtenir un gradient d'intensification agricole ; c'est-à-dire partir d'un milieu de référence (forêt) aux milieux perturbés par les activités agricoles (cacaoyers, teckeraies, jachères et culture de vivriers).

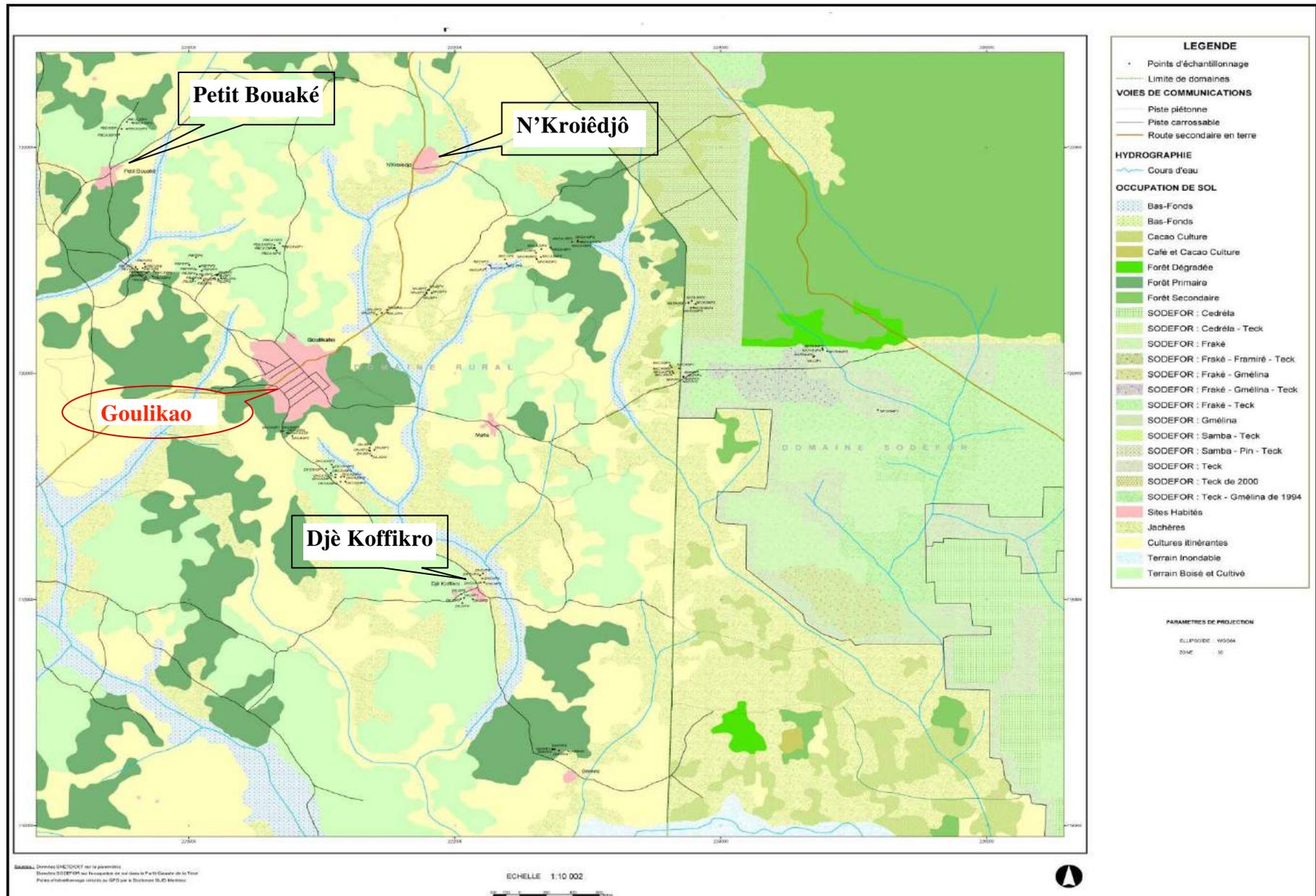


Figure 8 : Carte des différents types d'usage des sols des différents sites d'étude

II.7. PARCELLES EXPERIMENTALES

Les parcelles expérimentales dans lesquelles les essais ont été établis, sont à cheval entre le village Goulikao et le site Petit Bouaké. Ce sont 10 jachères naturelles dont les âges varient entre 1 et 2 ans et caractérisées par l'omniprésence de l'adventice *Chromolaena odorata*. Quatre parcelles ont été choisies dans les environs du campement Petit Bouaké et les 6 autres parcelles au voisinage de Goulikao. Le tableau III renseigne sur les âges, le précédent cultural et le village ou campement environnant des différentes jachères utilisées pour les différentes expérimentations.

Tableau III : Parcelles de jachère à *C. odorata* abritant les expérimentations

N° de parcelles	Agés de la jachère (années)	Précédent cultural	Village ou campements environnant
1	2	Riz	Petit Bouaké (PB)
2	2	Maïs	PB
3	2	Maïs	PB
4	1	Arachide	PB
5	1	Maïs	Goulikao (GK)
6	1	Maïs	GK
7	2	Maïs	GK
8	1	Maïs	GK
9	2	Maïs	GK
10	2	Maïs	GK

CHAPITRE III :
MATERIEL ET METHODES

III.1. MATERIEL

III.1.1. Matériel d'étude de la diversité biologique des vers de terre

Le matériel technique utilisé pour l'étude de la diversité biologique des vers de terre comprenait :

- un quadrat en bois de 50 cm de côté pour la délimitation de l'emplacement des monolithes de sol,
- un décamètre pour le tracé du transect,
- une houe et une machette pour délimiter le monolithe,
- des pinces, seaux et plateaux pour le tri des échantillons de sol prélevés,
- des piluliers et du formaldéhyde pour la conservation des échantillons de vers,
- une loupe binoculaire de marque Leica pour l'identification des vers de terre,
- une balance de précision de type Mettler Toledo pour la pesée des vers de terre.

III.1.2. Matériel d'étude des paramètres physicochimiques des sols et d'inventaires floristiques

III.1.2.1. Matériel végétal

Les organes végétaux prélevés pour l'inventaire floristique sont composés de rameaux florifères ou fructifères et, à défaut de rameaux stériles. Les échantillons récoltés ont servi à confectionner un herbier.

III.1.2.2. Matériel technique

Pour le prélèvement des échantillons de sol en vue des analyses physiques et chimiques, et l'inventaire floristique, le matériel utilisé comprenait :

- un cylindre métallique de 6 cm de diamètre et 10 de hauteur pour le prélèvement du sol,
- des plastiques pour la conservation des échantillons de sol,
- une balance de type Sartorius pour la pesée des échantillons de sol,
- une étuve pour le séchage des échantillons,
- un pénétromètre de type Yamanaka pour la détermination à la pénétrométrie horizontale,
- un cube métallique de 5 cm d'arête pour le prélèvement de sol,
- un décamètre pour la délimitation des placettes de 10 m de côté.

III.1.2.3. Matériel chimique

Les réactifs utilisés pour les analyses chimiques ont été fournis par Eunice Distribution, Abidjan (Côte d'Ivoire). Il s'agit du bichromate de potassium à 99%, sulfate de potassium à 99%, acide sulfurique à 95%, hydroxide de sodium à 99% (soude), acide borique à 2%,

bicarbonate de sodium à 95%, fluorure d'ammonium à 98%, acétate d'ammonium à 98% et l'alcool à 96%.

III.1.3. Matériel d'étude des services écosystémiques des vers

III.1.3.1. Matériel végétal

Le maïs (*Zea mays L.*) a été choisi comme culture test en raison de son cycle végétatif court (3 mois) et de sa préférence grandissante dans les unités de production familiale. La variété utilisée est le « maïs jaune type PIONEER » issue du croisement entre la "variété jaune Bouaké" et la "variété blanche IRAT 8".

III.1.3.2. Matériel animal

Trois espèces de vers de terre à savoir *D. terraenigrae*, *M. omodeoi* et *H. africanus* ont été sélectionnées. Le choix de *D. terraenigrae* est basé sur son importante biomasse dans tous les types d'usage des sols du site (Petit Bouaké), tandis que celui de *M. omodeoi* et *H. africanus* est guidé par le fait que plusieurs études antérieures ont été réalisées sur leur biologie et démographie (Lavelle, 1981; Tondoh & Lavelle, 1997; Tondoh, 1998; Tondoh & Lavelle, 2005), et leurs impacts sur la structure du sol (Blanchart *et al.*, 1997). En outre, ces espèces appartiennent à deux groupes fonctionnels distincts dont les influences sont à la fois antagonistes et complémentaires sur la structure physique du sol.

Dichogaster terraenigrae (Acanthodrilidae) est une espèce de grande taille (longueur : 160 - 175 mm ; diamètre : 4 - 5 mm) et non pigmentée avec une masse variant entre 3 à 4 g chez l'individu subadulte (Figure 9b). Elle appartient à la catégorie écologique des géophages endogés oligohumiques. Cependant, elle est capable de rejeter en surface des turricules globulaires coalescents, à surface lisse et dont le diamètre varie de 0,5 à 2 cm (Lavelle, 1978). Le type de turricules rejetés par cette espèce la classe dans le groupe fonctionnel d'espèces dites compactantes, à l'instar de *M. omodeoi* (Lavelle, 1978).

Hyperiodrilus africanus (Eudrilidae) est un ver épi-endogé polyhumique, légèrement pigmenté, de petite taille (longueur variant entre 8-15 cm) et de masse pouvant atteindre 1g à l'état adulte (Tondoh & Lavelle, 2005) (Figure 9c). Cette espèce produit à la surface du sol des turricules granulaires qui sont des accumulations de fragiles boulettes fécales millimétriques (diamètre < 2 mm) à texture très fine. Cet effet de désagrégation du sol que provoque cette espèce la place dans le groupe des espèces à effet décompactant (Blanchart *et al.*, 1997).



Récolte de vers de terre



Dichogaster terraenigrae



Hyperiodrilus africanus



Millsonia omodeoi

Figure 9 : Récolte des vers de terre au champ (a) et les trois espèces de vers inoculées (b, c,d)

Millsonia omodeoi (Acanthodrilidae) appartient à la catégorie écologique des vers de terre endogés mésohumique. La longueur moyenne de cette espèce au stade adulte varie entre 15 à 20 cm avec une masse variant entre 5 et 6 g (Lavelle, 1978) (Figure 9d). *M. omodeoi* produit des turricules à structure compacte de grande taille (diamètre > 2 mm) formées de plusieurs unités globulaires et coalescentes. Ces structures biogéniques contribuent à la compaction du sol; d'où la qualification de *M. omodeoi* "d'espèce compactante" (Blanchart *et al.*, 1997).

Les vers de terre ont été récoltés par extraction manuelle 2 à 3 semaines avant le début de l'expérimentation, dans les jachères à *Chromolaena* de la zone d'étude, puis conservés à température ambiante dans des récipients remplis de sol humide. Seuls les individus adultes ou subadultes ont été récoltés pour l'inoculation.

III.1.3.3. Matériel technique

Le matériel technique utilisé pour l'étude des services écosystémiques des vers de terre est composé de :

- seaux qui représentent les unités expérimentales,
- tamis pour le tamisage du sol (milieux d'inoculation des vers,
- filet de moustiquaire pour permettre la bonne circulation de l'eau et empêcher la fuite des vers de terre,
- coque de café servant de source de nourriture pour les vers,
- cylindre PVC de 10 cm de diamètre et 40 cm de hauteur pour la mesure de l'infiltration de l'eau,
- cylindre métallique de 6 cm de diamètre et 10 cm de hauteur pour le prélèvement du sol,
- pénétromètre de type Yamanaka pour la détermination à la pénétrométrie horizontale,
- colonne de 6 tamis pour l'étude des agrégats du sol,
- mètre maçon pour la mesure de la hauteur des plants de maïs,
- étuve pour le séchage des échantillons de sol et de maïs,
- balance de type Sartorius pour la pesée des échantillons de sol et de maïs,
- balance de précision de type Mettler Toledo pour la pesée des vers de terre.

III.1.3.4. Matériel chimique

Les produits chimiques pour les analyses ont été fournis par Eunice Distribution, Abidjan (Côte d'Ivoire). L'urée (46% N) et le superphosphate (45% P) sont utilisés comme fertilisants chimiques. Les réactifs utilisés au cours des analyses chimiques sont : le

bichromate de potassium à 99%, l'acide sulfurique à 95%, le sulfate de potassium à 99%, l'hydroxide de sodium à 99% (soude) et l'acide borique à 2%.

III.2. METHODES

III.2.1. Etude de la diversité biologique des vers de terre

III.2.1.1. Stratégie d'échantillonnage des vers de terre

Le choix des sites a été guidé par le souci de couvrir la plus grande surface possible du territoire de Goulikao en vue d'étudier le peuplement de vers de terre représentatifs des principales unités agroécologiques (forêts, cacaoyères, reboisements, jachères, cultures vivrières). Les vers de terre ont été échantillonnés dans chaque site suivant un gradient d'intensification agricole, c'est-à-dire partant d'un écosystème de référence (forêt) aux cultures vivrières en passant par les plantations de cacaoyers, les reboisements de teck et les jachères naturelles. Dans chaque type d'usage du sol, cinq (5) points d'échantillonnage éloignés les uns des autres d'au moins 30 m ont été choisis au hasard afin d'éviter l'auto-corrélation, processus fréquent au sein de certaines composantes des macro-invertébrés du sol (Rossi, 2003).

La diversité et l'abondance des vers ont été estimées le long d'un transect de 20 m, perpendiculaire à la plus grande pente (Figure 10a). Cette méthode d'estimation exhaustive de la diversité consiste à prélever à 10 m de l'origine du transect, trois larges monolithes (50 x 50 x 30 cm) espacés de 5 m (Tondoh *et al.*, 2011). Nous avons ainsi échantillonné le long de 5 transects dans chaque parcelle. L'échantillonnage a été fait à la fin de la grande saison des pluies, période de grande activité des vers de terre.

III.2.1.2. Echantillonnage

Un quadrat en bois de 50 cm de côté a servi à marquer l'emplacement de l'échantillon sur le sol. La litière délimitée par le cadre est prélevée et triée en vue d'y récolter les vers de terre litéricoles. Les vers de terre ont été extraits par la méthode de tri manuel direct adaptée aux sols tropicaux (Lavelle, 1978 ; Tondoh & Lavelle, 2005, Tondoh *et al.*, 2007). Elle consiste à creuser une tranchée de 50 cm de côté et 30 cm de profondeur autour du quadrat afin d'éviter les fuites éventuelles d'individus mobiles. Un large monolithe de terre de dimension 50 x 50 x 30 cm est ainsi isolé (Figure 10b). Le monolithe est ensuite divisé en 3 couches successives de 10 cm d'épaisseur qui sont mises dans trois seaux distincts numérotés suivant le niveau de la strate du sol (0 – 10 cm, 10 – 20 et 20 – 30 cm). Les vers de terre sont extraits des mottes de terre, conservés dans des piluliers contenant du formaldéhyde 4% et transportés au laboratoire pour l'identification des individus.

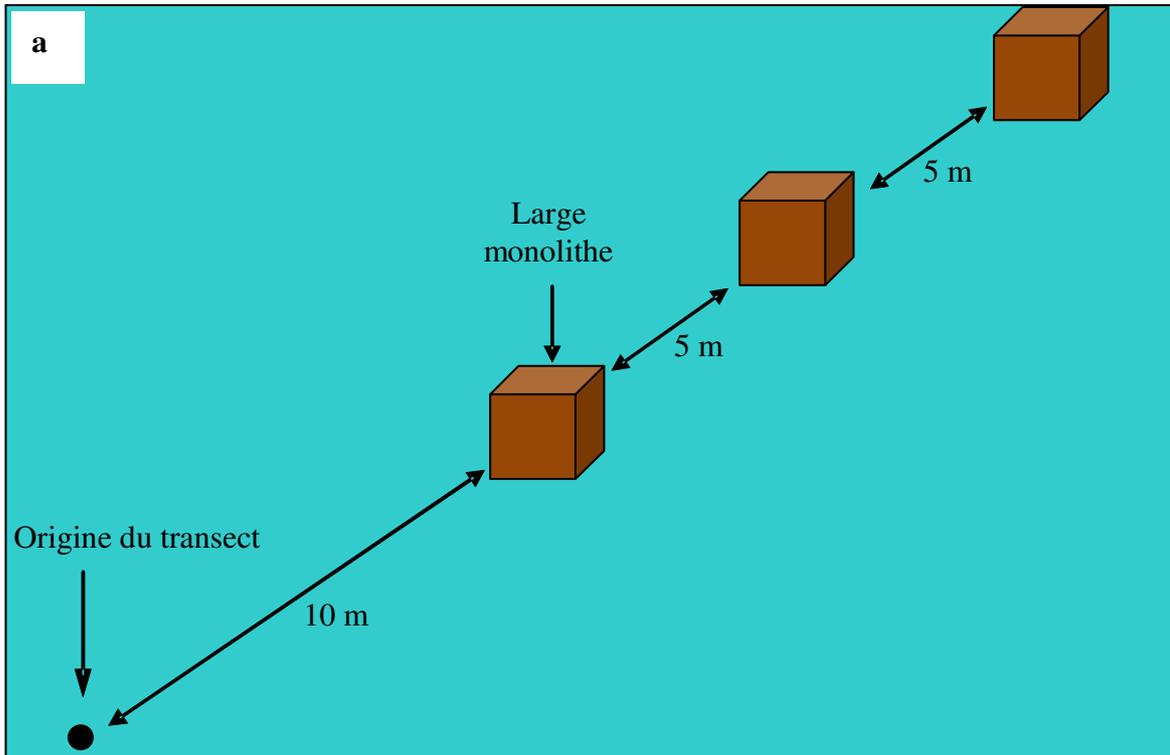


Figure 10 : Protocole d'échantillonnage des peuplements de vers de terre : (a) Schéma de la méthode d'échantillonnage; (b) monolithe de sol délimité.

III.2.1.3. Identification des espèces de vers de terre

Les individus de vers de terre récoltés ont été identifiés au niveau de l'espèce à l'aide de différentes clés de détermination (Omodeo & Vaillaud, 1967 ; Sims, 1986 ; Lavelle, 1978) et d'échantillons de référence du Muséum d'Histoire Naturelle de Budapest (Csuzdi & Tondoh, 2007). Les individus identifiés ont été ensuite comptés et pesés par espèce. Après identification, comptage et pesée des individus, la moyenne des 3 monolithes a été préalablement calculée sur chaque transect, puis nous avons procédé au regroupement par type d'usage des sols.

III.2.1.4. Abondance

L'abondance des peuplements de vers de terre a été estimée par deux paramètres : la densité et la biomasse. La densité est le nombre d'individus par mètre carré tandis que la biomasse représente la masse d'individus (g) par mètre carré.

III.2.1.5. Diversité des peuplements de vers de terre

III.2.1.5.1. Richesse spécifique

La richesse spécifique est le nombre total d'espèces rencontrées dans un écosystème donné. Elle est couramment perçue comme la variable fondamentale en écologie. De plus, en raison de sa simplicité et de la façon intuitive dont elle est utilisée pour décrire la diversité des communautés, elle constitue la variable élémentaire de nombreux modèles écologiques (Chao, 2005). La richesse spécifique a été estimée par deux paramètres :

- le nombre moyen d'espèces (S) par milieu,
- et le nombre cumulé d'espèces de vers de terre estimé à partir des courbes d'accumulation des espèces randomisées à l'issue de 500 stimulations à l'aide du logiciel Estimate S-version 6.01b (Colwell, 2000).

III.2.1.5.2. Indice de diversité de Shannon

Tenant compte à la fois de l'abondance, l'indice de diversité de Shannon (H') permet de mesurer la composition spécifique d'un peuplement à partir du nombre d'espèces et de leur abondance relative (Legendre & Legendre, 1984). Cet indice convient bien à l'étude comparative du peuplement parce qu'il est relativement dépendant de la taille de l'échantillon (Gray & Pearson, 1982). Son équation s'énonce comme suit :

$$H' = - \sum_i^n P_i \cdot \log_2 P_i \quad (P_i = \frac{n_i}{N} \text{ est la fréquence relative de l'unité de l'espèce } i \text{ dans le peuplement, } N \text{ étant l'effectif total}).$$

III.2.1.5.3. *Équitabilité*

Deux peuplements à physionomie différente pouvant avoir la même diversité, le calcul de l'indice H' s'accompagne de celui de l'équitabilité de Pielou (1966) ou Régularité (E). La régularité pour un peuplement renseigne sur la répartition des effectifs entre les différentes espèces. L'équitabilité s'obtient en rapportant la diversité observée à la diversité théorique maximale du peuplement :

$$E = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (H' \text{ est l'indice de Shannon et } S \text{ le nombre moyen d'espèces}).$$

L'équitabilité varie de 0 à 1. Elle tend vers 0 quand la quasi-totalité des effectifs est concentrée sur une espèce et vers 1 lorsque toutes les espèces ont la même abondance.

III.2.1.5.4. *Détermination d'espèces indicatrices*

L'identification des espèces caractéristiques des groupes de types d'usage des sols et la valeur indicatrice associée ont été calculées à l'aide de la méthode IndVal (Dufrêne & Legendre, 1997). Cette méthode définit l'espèce indicatrice comme celle qui est la plus caractéristique de chaque groupe de types d'usage des sols. Cela implique qu'elle soit trouvée principalement dans un seul groupe de la typologie (spécificité) et présente dans la plupart des milieux appartenant à ce groupe (fidélité). La méthode IndVal permet non seulement de caractériser les espèces une à une, indépendamment les unes des autres, mais aussi de tester l'existence d'espèces spécialistes (présentes dans une gamme restreinte de milieux) et d'espèces ubiquistes ou généralistes (présentes dans tous les milieux avec une forte abondance et une fréquence élevée).

La première étape de l'analyse qui consiste à définir des typologies des milieux peut se faire en s'appuyant sur les diverses méthodes de classification indépendamment de la méthode Indval (Dufrêne & Legendre, 1997). La seconde étape revient à identifier les espèces indicatrices correspondantes aux divers groupes de milieux.

Ainsi, pour chaque espèce i dans chaque groupe j , la valeur indicatrice est calculée suivant la formule :

$$\text{IndVal}_{ij} = A_{ij} \times B_{ij} \times 100$$

avec $A_{ij} = N \text{ individus}_{ij} / N \text{ individus}_i$ et $B_{ij} = N \text{ milieux}_{ij} / N \text{ milieux}_j$. Dans cette formule, IndVal_{ij} est la valeur indicatrice de l'espèce i dans le groupe j . A_{ij} correspond à l'abondance moyenne de l'espèce i dans les milieux du groupe j comparée à la moyenne de cette espèce dans tous les groupes de milieux qui font l'objet d'étude. Ce terme fait référence à la spécificité de chaque espèce. Il atteint sa valeur maximale (100%) quand une espèce i est

présente seulement dans le groupe j. B_{ij} est la fréquence relative d'occurrence de l'espèce i dans les milieux du groupe j et exprime la fidélité de cette espèce à l'intérieur de ce groupe. Sa valeur est maximale quand l'espèce i est présente dans tous les milieux du groupe j.

Pour un niveau de classification des types d'usage des sols en différents groupes, la valeur indicatrice de l'espèce est la plus grande valeur d'IndVal observée pour un des groupes. Cette valeur indicatrice est justifiée par le test-t de Student qui permet de vérifier si la préférence d'une espèce pour un type d'habitat est significativement plus élevée que ne laisse supposer une distribution aléatoire. La procédure répartie de façon aléatoire les données de présence de l'espèce plusieurs fois dans les différents groupes. Il compare ensuite pour chaque niveau du groupement, la moyenne de la valeur IndVal obtenue à la valeur IndVal enregistrée pour le groupement de départ. Si cette dernière valeur est significativement plus grande (test-t de Student) que la moyenne des valeurs obtenues au hasard, l'espèce peut être considérée comme réellement indicatrice du niveau du groupement. Ce test est surtout utile pour les espèces qui ont une faible fidélité (Dufrêne & Legendre, 1997).

Les espèces retenues comme indicatrices sont celles dont la préférence pour ces milieux est significativement (test-t de Student) plus élevée que ne le laisse supposer une distribution aléatoire et celles dont la valeur indicatrice est au moins égale à 25%. A 25%, l'espèce caractéristique apparaît au moins à 50% dans un groupe donné de milieux et son abondance relative dans ce groupe atteint 50% (Dufrêne & Legendre, 1997 ; Nahmani & Rossi, 2003).

III.2.2. Etude des paramètres physico-chimiques des sols et inventaires floristiques

III.2.2.1. Paramètres physiques du sol

Les paramètres physiques des différents types d'usage des sols ont été déterminés à l'origine du transect, à 10 m du point de prélèvement du premier monolithe. Les mesures ont porté sur deux strates du sol : les strates 0-10 et 10-20 cm.

III.2.2.1.1. Densité apparente

La densité apparente a été déterminée par la méthode du cylindre (Audry *et al.*, 1973) en trois pseudo-réplicats par point d'échantillonnage. En pratique, l'on enfonce le cylindre verticalement en surface et sur les marches d'escalier taillées sur la face d'une tranchée. L'enfoncement doit être rectiligne et sans tassement interne. L'échantillon frais est ensuite pesé au laboratoire pour pouvoir en calculer l'humidité, puis séché à l'étuve à 105°C pendant 48 heures. La densité apparente (d_a) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$da = \frac{P}{V}$ où, P est le poids de l'échantillon de sol séché à l'étuve à 105°C pendant 48 heures et V le volume du cylindre.

III.2.2.1.2. Humidité

Les échantillons de sol ont été prélevés au niveau de chaque strate du sol et conditionnés dans des boîtes. La teneur en eau du sol a été déterminée par séchage à l'étuve pendant 48 heures jusqu'à poids constant (méthode gravimétrique).

III.2.2.1.3. Résistance à la pénétration

L'étude de la compaction du sol a consisté en la détermination de la résistance à la pénétration horizontale à l'aide d'un pénétromètre de poche, type Yamanaka (Figure 11), dans les différents horizons identifiés à raison de 10 répétitions (Assié *et al.*, 2008). La détermination en kPa de la résistance à la pénétration des données brutes a été faite selon la formule: $(100 \times A / (0,7952 \times (40-A) \times (40-A))) \times 100$; où A représente la mesure relevée directement sur la tige graduée du pénétromètre (Moreau & Nagumo, 1994).

III.2.2.2. Morphologie du sol

La méthode de détermination de l'agrégation du sol a été inspirée de la technique de Topoliantz *et al.* (2000) adaptée à l'analyse des "petits volumes de sol" (Velasquez *et al.*, 2007b). Un cube de sol de 5 x 5 x 5 cm est prélevé à l'aide d'un cube métallique à chaque point d'échantillonnage (Figure 12). Le bloc de sol ainsi obtenu est cassé à la main avec délicatesse pour être réparti en macroagrégats et autres composants.

Les agrégats biogéniques produits par les "ingénieurs de l'écosystème" (vers de terre, termites, coléoptères, fourmis et diplopodes) sont repartis en 3 classes selon la taille : petite (<1 cm), moyenne (1 – 3 cm) et grande (>3 cm).

Les agrégats physiques produits par les processus physique (séchage et réhumidification du sol) sont aussi classés en 3 catégories comme sus-cités. Les composants dont les racines, les morceaux de bois, les invertébrés, la litière, les pousses, les graviers constituent les autres catégories. La séparation d'un cube de sol peut s'étendre sur une à 3 heures, la durée étant fonction du type de sol et de l'opérateur.

III.2.2.3. Analyses chimiques de sol

Le sol destiné à l'analyse chimique a été prélevé en 9 points distincts à l'origine du transect (Figure 13) à l'aide d'une tarière suivant les profondeurs 0-20 et 20-50 cm. Pour une strate donnée, les 9 échantillons ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite qui a

été séché à l'air libre pendant une semaine. Un aliquote de 100 g de cet échantillon a été prélevé pour les analyses chimiques au laboratoire.

III.2.2.3.1. Carbone et azote totaux

Le dosage du carbone organique est effectué par la méthode de Walkley & Black (1934) dont le principe repose sur l'oxydation du carbone en CO₂ par une solution de bichromate de potassium en milieu acide (acide sulfurique), et le dosage des ions Cr³⁺ formés dans le surnageant par colorimétrie à la longueur d'onde 570 nm. La quantité d'ion Cr³⁺ ainsi formée est proportionnelle à la quantité de carbone qui a été oxydée.

Pour déterminer la teneur en N total, le sol est digéré dans une solution concentrée de H₂SO₄ concentré en présence d'un catalyseur (K₂SO₄). Le mélange a été ensuite chauffé à 150°C jusqu'à obtention d'une solution claire. Après digestion, le mélange est refroidi et de l'eau distillée y est ajoutée pour mettre les résidus en suspension. L'azote ainsi minéralisé est distillé par une solution de NaOH dans une solution d'acide H₃BO₃ à 2%. L'ion borate est titré par l'acide sulfurique (Anderson & Ingram, 1993).

III.2.2.3.2. Phosphore, pH, bases échangeables et capacité d'échange en cations (CEC)

Le pH_{eau} est mesuré dans le surnageant du mélange sol-eau dans un rapport 1/2,5 à l'aide d'un pH-mètre à électrodes combinés. Le phosphore assimilable a été extrait selon la méthode Olsen-Dabin (dans une solution mixte de NaHCO₃ et NH₄F, à pH = 8,5). Le P est ensuite dosé par colorimétrie à 660 nm (Murphy & Riley, 1962). Les bases échangeable ont été extraites à l'acétate d'ammonium tamponné à pH = 7 et dosées ensuite au spectrophotomètre d'absorption atomique (Anderson & Ingram, 1993). La CEC a été ensuite déterminée par lavage à l'alcool suivi d'une distillation Kjeldahl (Anderson & Ingram, 1993).

III.2.2.4. Inventaire floristique et identification des espèces

La diversité floristique a été étudiée à travers un échantillonnage stratifié (Sey, 2010). La stratification permet, à effort de terrain constant, de gagner en précision d'estimation en faisant porter l'effort là où la variabilité est la plus forte (Picard, 2006). Ainsi il a été établi dans chaque type d'usage des sols et à chaque point origine du transect, une parcelle rectangulaire de 50 m de longueur et de 10 m de largeur soit 500 m² de superficie subdivisée en 5 placettes de 10 m de côté soit 100 m². Il a été ainsi établi dans chaque milieu, cinq (5) parcelles de 500 m² dans lesquelles des relevés qualitatifs ont été réalisés.



Figure 11 : Mesure de la résistance à la pénétration horizontale du sol



Figure 12 : Cube de sol de dimension 5 x 5 x 5 cm

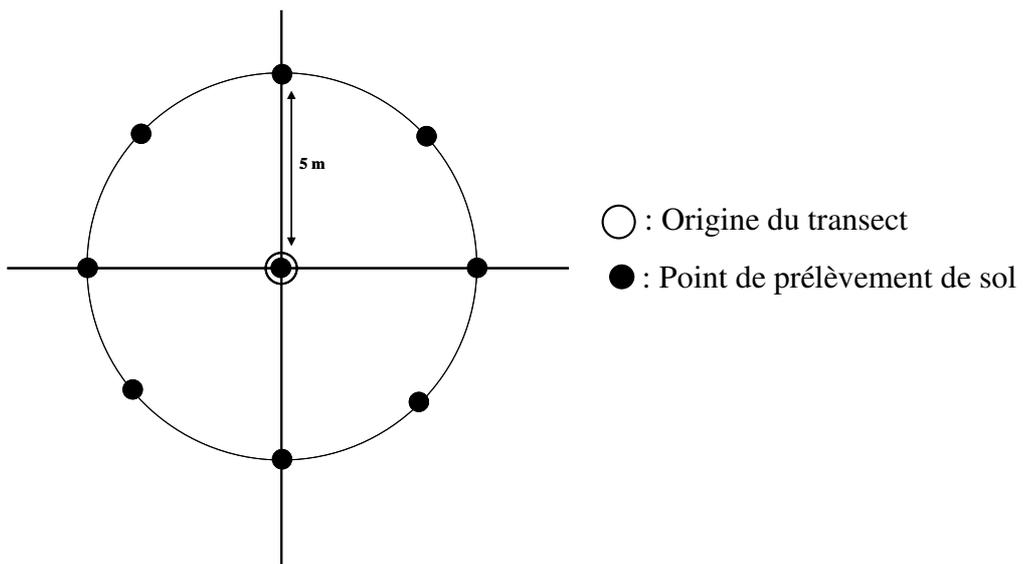


Figure 13 : Schéma du protocole de prélèvement d'échantillon de sol

L'identification des échantillons a été faite à partir des travaux d'Aubréville (1959), Hutchinson & Dalziel (1954, 1958, 1963 et 1972), Hawthorne & Jongkind (2006). La confirmation de ces déterminations a été faite avec les herbiers du Centre Suisse de Recherches Scientifiques et du Centre National de Floristique.

III.2.3. Elaboration de l'indice général de la qualité du sol (IGQS) tenant compte des vers de terre

L'indice général de la qualité du sol (IGQS) est un indicateur multifonctionnel de la qualité des sols mis au point et validé récemment par Vélasquez *et al.* (2007a). Cet indicateur permet d'évaluer les différents services écosystémiques rendus par les sols en utilisant des paramètres pertinents de la qualité des sols (Lavelle *et al.*, 2006) et de déterminer la durabilité des systèmes de production agricole. L'IGQS combine 5 sous-indicateurs qui tiennent compte des différents paramètres de la qualité des sols : sous-indicateur de la matière organique, des paramètres chimiques et physiques, de l'agrégation et de la morphologie des sols, et notamment de la biodiversité des macro-invertébrés. Dans le cadre de notre étude, en lieu et place du sous-indicateur de la biodiversité des macro-invertébrés, nous tiendrons compte des peuplements des vers de terre.

L'élaboration de l'IGQS peut se résumer en 4 principales étapes (Velasquez *et al.*, 2007a) :

- Etape 1 : la recherche des variables de différenciation des milieux.

Il s'agit dans cette étape de réaliser des Analyses en Composantes principales (ACP) sur les jeux de variables de chaque groupe de la qualité du sol (caractéristiques physiques et chimiques, matière organique, morphologie et peuplements de vers de terre) et de procéder ensuite à une analyse de co-inertie entre chaque paire de groupes.

- Etape 2 : la sélection des variables qui discriminent mieux les types d'usage des sols.

Les variables retenues sont celles dont la contribution relative est supérieure ou égale à la moitié de la contribution maximale sur les deux premiers axes définis par l'ACP.

- Etape 3 : la création de sous-indicateurs de la qualité.

Les sous-indicateurs de la qualité physique, chimique, de la matière organique, de la morphologie et des peuplements de vers de terre ont été calculés à partir des variables retenues. Le sous-indicateur de la qualité chimique est obtenu à partir des variables chimiques retenues à savoir le P assimilable, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et le CEC. Le même procédé a été utilisé pour le calcul des sous-indicateurs de la qualité physique, morphologique, de la matière

organique et de la diversité biologique des vers de terre. Le sous-indicateur de la diversité biologique des vers de terre a été obtenu avec la composante spécifique.

Sur chaque site d'étude, chacun des 5 sous-indicateurs (SI_q) de la qualité est la somme des n variables (v_1-v_n) rétenues multipliée par leurs contributions relatives (w_1-w_n) sur les deux premiers axes de l'ACP :

$$SI_q : v_1 * w_1 + v_2 * w_2 + \dots + v_n w_n$$

Pendant le calcul des sous-indicateurs, les valeurs des variables sont réduites dans un intervalle de 0,1 à 1 à l'aide de la formule homothétique suivante :

$Y = 0,1 + ((x-b)/(a-b)) * 0,9$ où Y = valeur de la variable après transformation ; x = variable à transformer ; a = valeur maximale de la variable ; b = valeur minimale de la variable.

Pour les variables telles que la densité apparente, les agrégats physiques, dont les valeurs augmentent quand le sol est de mauvaise qualité, nous avons utilisé une formule homothétique opposée :

$$Y = 1,1 - 0,1 + (((x-b)/(a-b)) * 0,9)$$

- Etape 4 : la formulation de l'IGQS et application aux différents types d'usage des sols

Les valeurs des 5 sous-indicateurs calculés dans chaque type d'usage des sols sont ensuite rangées dans une matrice [les sous-indicateurs en colonnes et les types d'usage des sols en lignes] pour la réalisation d'une ACP. La contribution de chaque sous-indicateur à la formation des deux premiers axes et les inerties expliquées par les facteurs 1 et 2 sont rétenues pour le calcul d'une constante. Cette constante est la somme des produits entre la contribution relative de chaque sous-indicateur sur les facteurs 1 et 2 et le pourcentage d'inertie expliquée par les facteurs respectifs. L'IGQS est enfin formulé comme la somme des produits entre les différents sous-indicateurs et leurs indicateurs associés.

La valeur de l'IGQS est comprise entre 0,10 et 1. Elle tend vers 1 lorsque le sol est de bonne qualité et vers 0,10 quand le sol est de mauvaise qualité. Dans la présente étude, trois qualificatifs de la qualité ont été attribués à l'IGQS suivant Marzaioli *et al.* (2010) :

- si $0,1 \leq IGQS < 0,55$: le sol est de mauvaise qualité
- si $0,55 \leq IGQS < 0,7$: le sol est de qualité moyenne
- si $0,7 \leq IGQS \leq 1$: le sol est de bonne qualité

III.2.4. Services écosystémiques des vers

III.2.4.1. Unité expérimentale

L'unité expérimentale est un seau de 10 litres contenant du sol prélevé dans les 10 premiers centimètres d'une jachère de 2 ans de *C. odorata* susceptible d'être utilisée par les paysans pour établir des champs de vivriers. C'est un sol légèrement acide et moins fertile (Tableau IV). L'analyse chimique a révélé des teneurs particulièrement limitées en carbone organique ($14,8 \pm 1,8 \text{ g.kg}^{-1}$), azote ($1,1 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$) et phosphore ($149,58 \pm 17,3 \text{ mg.kg}^{-1}$) totaux (Guéi *et al.*, 2009).

Le sol a été préalablement conditionné avant d'être réparti dans les seaux d'élevage. Le but de ce traitement est d'optimiser le bon développement et la survie des vers en mésocosme. Le sol a été d'abord séché à l'air libre pendant 48h, ensuite tamisé à 2 mm, puis humidifié à 20% avant d'être passé à nouveau à travers les mailles d'un tamis de 2 mm. Une quantité de 9 kg de sol ainsi conditionné a été répartie dans chaque seau dont le fond a été préalablement troué (9 à 10 trous d'un centimètre de diamètre) et recouvert d'un filet de moustiquaire à maille carrée de 2 mm. La perforation du fond des seaux et la pose de moustiquaire visent à permettre à la fois la circulation de l'eau et à empêcher l'évasion des vers de terre ou l'intrusion d'autres organismes. Les seaux sont ensuite enterrés dans des trous dont le fond est tapissé de pierres afin d'assurer un drainage efficace de l'eau. L'unité expérimentale (Figure 14) a été disposée de sorte que le niveau du sol dans le seau coïncide avec celui du sol environnant.

III.2.4.2. Intrant organique et fertilisants chimiques

L'intrant organique utilisé dans le cadre de notre étude est la coque de café. La composition organo-biochimique révèle une forte composition en carbone (30,4%), une bonne teneur en azote (2%) et un faible ratio C/N (Tableau V), les coques de café apparaissent à priori comme une bonne source de nourriture pour les vers. Le taux d'application de la coque de café dans notre expérimentation est de 1%.

Les coques de café ont plusieurs fois été utilisées dans des expériences d'élevages des vers et dans le cadre de la valorisation agricole des résidus de café en association avec les vers de terre (Tondoh & Lavelle, 1997 ; Tondoh, 1998).

Pour les traitements qui nécessitent les fertilisants chimiques, l'urée (46% N) et le superphosphate (45% P) ont été appliqués respectivement à la dose de 161 et 67 kg.ha^{-1} , soient 0,9 g d'urée et 0,55 g de superphosphate par unité expérimentale.



Figure 14 : Unité expérimentale présentant une jeune pousse de maïs

Tableau IV: Caractéristiques chimiques des dix premiers centimètres du sol expérimental (Guéi *et al.*, 2009)

	Teneurs
pH _{eau}	6,8(0,1)
Carbone organique (g kg ⁻¹)	14,8(1,8)
Azote total (g kg ⁻¹)	1,1(0,1)
Ratio C/N	13,46(2,44)
Phosphore total (mg kg ⁻¹)	149,58(17,3)
Phosphore assimilable (mg kg ⁻¹)	23,52(2,36)
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	6,19(1,24)
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	3,43(0,64)
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	1,7(0,35)
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,22(0,02)

Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards.

Tableau V : Composition chimique des résidus de café (Tondoh & Lavelle, 1997)

	Teneurs
Carbone (g kg ⁻¹)	30,4
Azote (g kg ⁻¹)	2
C/N	15,1
Carbone soluble (mg.g ⁻¹)	24
Phosphore (mg kg ⁻¹)	0,16
Calcium (cmol _c kg ⁻¹)	0,69
Potassium (cmol _c kg ⁻¹)	1,93
Magnésium (cmol _c kg ⁻¹)	0,2
Aluminium (cmol _c kg ⁻¹)	0,62
Lignine (g kg ⁻¹)	22,2
Polyphénol (g kg ⁻¹)	0,44

Les quantités appliquées correspondent approximativement aux quantités recommandées pour les sols tropicaux (Vanlauwe & Giller, 2006). L'application du superphosphate s'est faite une seule fois, juste après semis. Alors que l'urée a été appliquée en deux temps : le 1/3 de la quantité totale juste après semis et les 2/3 restant quarante jours après semis (Koné, 2009). Dans le cas de la combinaison des engrais chimiques, l'urée et le superphosphate ont été appliqués à la fois et avec les mêmes doses. Les engrais chimiques ont été appliqués par épandage autour des trous de semis et des pieds de maïs en évitant le contact avec le matériel végétal.

Les seaux devant recevoir le maïs sont entretenus par sarclage à la main ; trois séances de sarclage ont été effectuées le 15^e ; 30^e et 45^e jours après semis.

III.2.4.3. Dispositifs expérimentaux et taux d'inoculation des vers

Deux types de dispositifs ont été mis en place dans le mois d'août de l'année 2009 dans 10 jachères à *Chromolaena odorata* dont l'âge varie entre 1 et 2 ans. Les essais ont durés une période de 3 mois ; de Septembre à Novembre.

III.2.4.3.1. Expérimentation 1 : étude de l'impact des vers de terre sur les propriétés physiques et la séquestration du carbone du sol

Dans cette expérimentation, il s'agissait d'évaluer la contribution des vers de terre à la séquestration du carbone et par la même occasion d'estimer l'impact de ces organismes sur les caractéristiques physiques du sol en conditions semi-naturelles. Pour ce faire, aucun

intrant organique n'a été ajouté au sol. Le dispositif répété sur chacune des 10 parcelles de jachères, comprend huit traitements distribués de manière aléatoire. Une distance d'1 m sépare un traitement d'un autre (Figure 15). Le dispositif comprend les traitements suivants :

- *Millsonia omodeoi* (Mo) ;
- *Dichogaster terraenigrae* (Dt) ;
- *Hyperiodrilus africanus* (Ha) ;
- *Millsonia omodeoi* + *Dichogaster terraenigrae* + *Hyperiodrilus africanus* (MoDtHa) ;
- *Millsonia omodeoi* + *Hyperiodrilus africanus* (MoHa) ;
- *Millsonia omodeoi* + *Dichogaster terraenigrae* (MoDt) ;
- *Dichogaster terraenigrae* + *Hyperiodrilus africanus* (HaDt) ;
- Sol témoin sans vers (Témoin).

Les vers de terre ont été inoculés en 3 étapes dans les unités expérimentales par intervalle de temps de 30 jours. La première inoculation a eu lieu au début de l'expérimentation ; c'est-à-dire au cours de l'enterrement des seaux. Les deux dernières inoculations ont été effectuées respectivement 30 et 60 jours après la première inoculation. Le nombre d'individus est passé du double au triple respectivement aux deuxièmes et troisièmes inoculations, en vue de palier aux éventuelles mortalités et d'optimiser l'activité des vers dans le sol (Tableau VI). Au total, des biomasses de vers variant entre 9 et 21 g, entre 18 et 42 g, et entre 27 et 63 g ont été inoculées par traitement respectivement à la 1^{ère}, 2^e et 3^e inoculation. Après chaque séance d'inoculation, les surfaces des seaux sont immédiatement recouvertes d'un filet de moustiquaire afin d'empêcher la fuite des vers ou l'intrusion d'autres organismes.

III.2.4.3.2. Expérimentation 2 : étude de l'impact des vers de terre sur la production agricole dans les systèmes d'agriculture à faibles intrants

Dans cet essai, il est question d'évaluer l'impact de l'association de *M. omodeoi* et *H. africanus*, deux vers de terre de groupes fonctionnels contrastés, sur la production de maïs et d'expliquer les mécanismes qui sous-tendent l'effet bénéfique de ces organismes sur cette culture céréalière en conditions semi-naturelle.

Le semis du maïs a été réalisé directement dans des poquets de faible profondeur. Deux à trois grains de maïs ont été placés par poquet par unité expérimentale. Le démariage s'est déroulé une semaine après semis pour ne laisser qu'un seul pied par unité expérimentale. Le sarclage des unités expérimentales est effectué à la main tous les 15 jours.

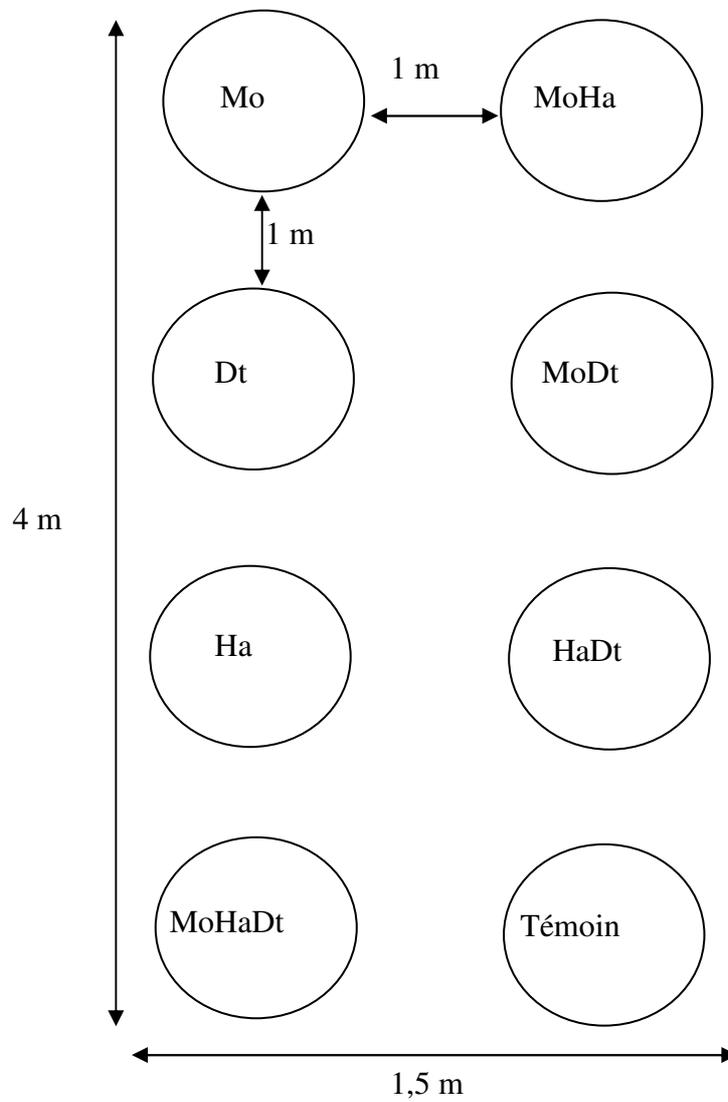


Figure 15 : Dispositif expérimental sur chacune des 10 parcelles de jachère

Tableau VI : Nombre d'individus des espèces de vers de terre inoculées par traitement. Mo: *M. omodeoi*; Ha: *H. africanus*; Dt: *D. terraenigrae*.

Traitements	Nombre d'individus de vers de terre inoculés											
	Première inoculation : jour 1				Deuxième inoculation : jour 30				Troisième inoculation : jour 60			
	Mo	Dt	Ha	Total	Mo	Dt	Ha	Total	Mo	Dt	Ha	Total
Témoin	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	3	0	0	3	6	0	0	6	9	0	0	9
Dt	0	3	0	3	0	6	0	6	0	9	0	9
Ha	0	0	9	9	0	0	18	18	0	0	27	27
MoHa	1	0	2	3	2	0	4	6	3	0	6	9
MoDt	1	1	0	2	2	2	0	4	3	3	0	6
HaDt	0	1	2	3	0	2	4	6	0	3	6	9
MoHaDt	2	2	3	7	4	4	6	14	6	6	9	21

Il s'agit d'une expérience composée de 8 traitements tenant sur une seule parcelle de jachère :

- Maïs sans intrants (Ms) ;
- Maïs + urée (Ms+U) ;
- Maïs + superphosphate (Ms+S) ;
- Maïs + urée + superphosphate (Ms+U+S) ;
- Maïs + vers (Ms+Vers) ;
- Maïs + vers + urée (Ms+Vers+U) ;
- Maïs + vers + superphosphate (Ms+Vers+S) ;
- Maïs + vers + urée + superphosphate (Ms+Vers+U+S).

Le dispositif en blocs randomisés avec 5 blocs (répétitions) a été adopté (Figure 16). Chaque bloc est composé de 8 traitements séparés d'une distance d'un mètre les uns des autres. Un écart de 2 m est observé entre deux blocs.

Les vers ont été inoculés en 4 étapes. La première inoculation a eu lieu 5 jours avant le semis de maïs à un taux de 3 individus de chaque espèce. Les deuxièmes et troisièmes inoculations qui ont eu lieu respectivement 30 et 50 jours après semis (jas), ont été réalisées avec un taux de 2 individus par espèce. La dernière inoculation (75 jas) a eu lieu à un taux de 4 individus par espèce. Un total de 22 individus correspondant à une biomasse de 71,5 g (60,5 et 11 g respectivement pour *M. omodeoi* et *H. africanus*) ont été inoculés par traitement à base de vers (Ms+Vers, Ms+Vers+U, Ms+Vers+S, Ms+Vers+U+S) Dans l'incapacité de recouvrir la surface des unités expérimentales de moustiquaire après les inoculations, nous avons attendu que les vers aient profondément et totalement pénétrés dans le sol avant de quitter la parcelle.

III.2.4.4. Détermination des paramètres physiques du sol

III.2.4.4.1. Infiltration de l'eau

La mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau n'a concerné que les parcelles de la première expérimentation. A cet effet, les dix parcelles ont été réparties en deux groupes de 5 parcelles.

Un groupe a servi à la mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau et le deuxième groupe aux autres mesures.

L'infiltration de l'eau dans le sol a été mesurée à l'aide d'un cylindre en PVC (40 cm de haut et $\varnothing = 20$ cm) enfoncé jusqu'à une profondeur de 10 cm dans le sol contenu dans les unités expérimentales, après avoir débarrassé la surface du seau de la toile de moustiquaire et de la

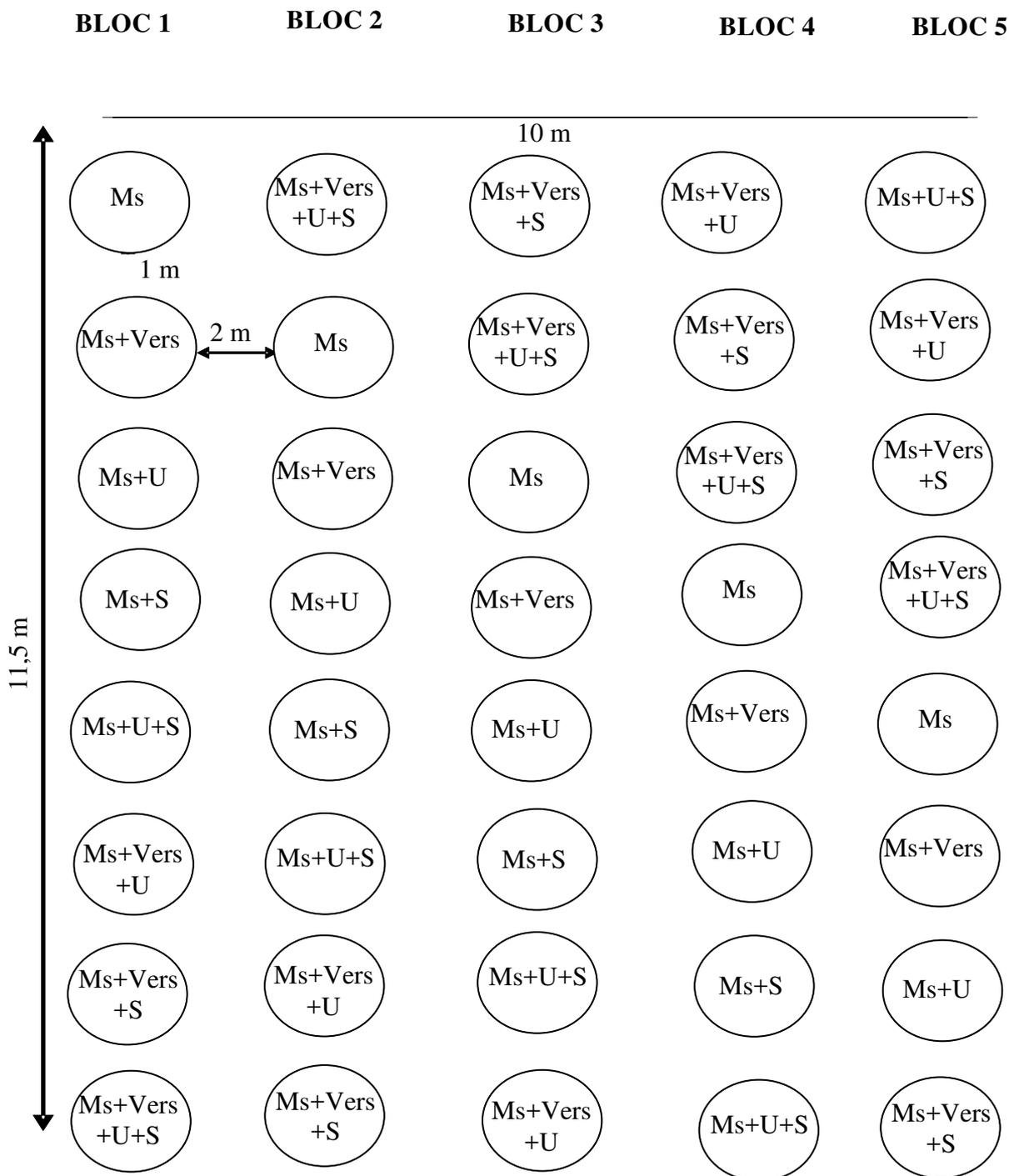


Figure 16 : Dispositif expérimental
 Ms : maïs ; Vers : *M. omodeoi*+*H. africanus* ; U : urée ; S : superphosphate.

végétation résidente (Figure 17). Le cylindre est rempli d'eau dont le niveau est lu sur une bande graduée disposée sur la paroi interne après 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 et 75 min. Des recharges en eau ont été effectuées lorsque le niveau de l'eau au dessus du sol atteignait 5 cm. Ces relevés ont permis de déterminer la perméabilité du sol dans chaque traitement à travers la détermination de la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité.

III.2.4.4.2. Densité apparente et résistance à la pénétration

Ces deux paramètres ont été déterminés sur les strates 0-10 et 10-20 cm des sols suivant les méthodes déjà décrites dans le paragraphe III.2.2.1 de ce chapitre. La densité apparente a été estimée par la méthode d'Audry *et al.* (1973) ; la résistance à la pénétration par la méthode d'Assié *et al.* (2008).

III.2.4.4.3. Distribution des classes d'agrégats et diamètre moyen pondéral (DMP)

La distribution des agrégats constitutifs du sol des traitements a été étudiée à l'aide de la méthode de tamisage à sec ou « dry-sieving method » (Blanchart *et al.*, 1997, Loranger-Merciris *et al.*, 2008). Des échantillons de sol de 200 g ont été soigneusement prélevés au cylindre (10 cm de haut et $\varnothing = 6$ cm) dans chaque strate afin de ne pas perturber la structure du sol (Figure 18). Les échantillons sont ensuite séchés à l'air libre pendant 4 à 5 jours. Les agrégats secs (Figure 19) sont ensuite désagrégés en les laissant tomber d'une hauteur constante de 1,5 m. Ils sont séchés à nouveau à l'air libre, puis sont passés sur une colonne de 6 tamis dont les diamètres des mailles sont décroissants : 2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 200 μm , 100 μm et 50 μm . La masse de sol restant sur chacun des tamis est mesurée et exprimée en fonction de la masse initiale. La fraction inférieure à 50 μm est déduite de la masse initiale. Nous obtenons ainsi 7 classes d'agrégats (<50 μm , 50 – 100 μm , 100 – 200 μm , 200 – 500 μm , 500 – 1000 μm , 1000 – 2000 μm et >2000 μm). Les sept classes d'agrégats sont réparties en 4 groupes d'agrégats (modifié de Loranger-Merciris *et al.*, 2008) : très fins (<50 μm), fins (50-500 μm), moyens (500-2000 μm) et larges (>2000 μm).

A partir de ces 7 classes d'agrégats, il est possible de mesurer la stabilité structurale sous la forme du Diamètre Moyen Pondéral (DMP) (Kemper & Rosenau, 1986):

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i$$
 est le diamètre moyen d'une classe d'agrégats et w_i est la masse de cette classe d'agrégats).

III.2.4.5. Paramètres chimiques du sol : stocks de carbone et d'azote total

Les agrégats biogéniques des différents traitements sont prélevés avec le cylindre dans les strates 0-10 et 10-20 cm. Les échantillons sont débarrassés des racines de la végétation

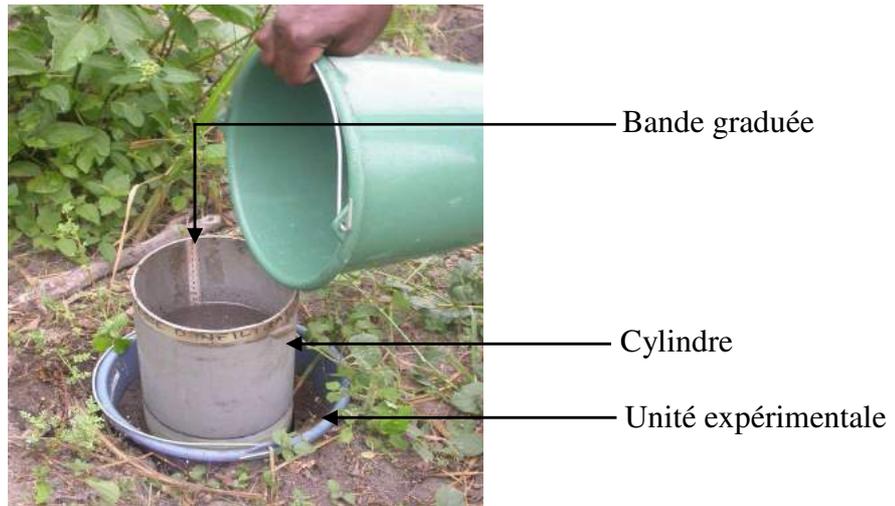


Figure 17 : Mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol



Figure 18 : Prélèvement d'un cylindre de sol pour la détermination des classes d'agrégats



Figure 19 : Agrégats biogéniques produits par les vers de terre

résidente au tant que possible et séchés à l'air libre pendant 4 à 5 jours. Les agrégats sont ensuite pilés à la main dans un mortier. Vingt grammes (20 g) de sol pilé sont prélevés du mortier pour être tamisés à travers des mailles $\varnothing = 2$ mm. Les concentrations en C organique (g C.g^{-1} de sol) et N total (g N.g^{-1} de sol) sont déterminées par les méthodes de Walkley & black (1934) et Kjeldahl, respectivement.

Le stock de C est calculé suivant la formule de De Rouw *et al.* (2010) :

$S_C = \text{COT} \times p \times d$ (S_C est le stock de carbone organique en g C.m^{-2} ; COT est la concentration en C organique en g C.g^{-1} , p est la densité apparente en g cm^{-3} ; d est l'épaisseur de la strate (10 cm) d'étude. Le stock de C est ensuite converti en t C.ha^{-1} en multipliant le S_C par le facteur 0,01. Le stock de N a été calculé suivant la même méthodologie.

III.2.4.6. Croissance et production de maïs

La hauteur des pieds de maïs a été déterminée à trois étapes végétatives : 30 ; 50 et 75 jours après semis. Le choix de ces stades végétatifs est justifié par le fait que le maïs subit une importante élongation de la tige principale entre 30 et 50 jours après semis, et la période d'après (50 - 75 jours après semis) correspond à la fin de la croissance en hauteur caractérisée par la formation de l'inflorescence terminale (Meier, 2001). La mesure de la croissance a été réalisée à l'aide d'un mètre maçon. Les plants de maïs sont ensuite prélevés entièrement (parties aériennes et racines), étiquetés et transportés au laboratoire où ils ont été séchés à l'étuve à 60°C , pendant 72h. Pour chaque plante, les racines et la partie épigée ont été séparées et pesées en vue de déterminer respectivement, la biomasse racinaire et la biomasse épigée. Ensuite les épis ont été égrenés, puis les grains ont été pesés. La masse des différentes parties de la plante a été rapportée à la tonne à l'hectare.

III.2.4.7. Taux de survie des vers de terre

Les espèces de vers de terre qui ont survécus jusqu'au démontage des mésocosmes ont été récoltées, comptées et pesées pour estimer leurs taux de survie et biomasse. Les nombreux turricules et galeries observés dans les mésocosmes attestent de l'intensité des activités des vers dans le milieu d'incubation.

III.2.4.8. Détermination de l'efficacité d'utilisation des nutriments et de l'eau par le maïs

Les contributions des vers de terre sur l'utilisation efficace de l'azote, du phosphore et de l'eau par le maïs dans les traitements ont été calculées suivant les formules d'Ouedraogo *et al.* (2006).

III.2.4.8.1. Efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

$EUE (kg.mm^{-1}) = (Biomasse\ totale\ \acute{e}pig\acute{e}e\ dans\ le\ traitement - biomasse\ totale\ \acute{e}pig\acute{e}e\ dans\ le\ t\acute{e}moin\ sans\ vers\ de\ terre) (kg.ha^{-1}) / Pr\acute{e}cipitation\ totale\ (mm).$

III.2.4.8.2. Efficience d'utilisation de l'azote (EUA)

$EUA (kg.kg^{-1}) = (Rendement\ en\ grain\ du\ ma\acute{ı}s\ dans\ le\ traitement - rendement\ en\ grain\ de\ ma\acute{ı}s\ dans\ le\ t\acute{e}moin\ sans\ vers\ de\ terre) (kg.ha^{-1}) / Quantit\acute{e}\ totale\ \acute{e}quivalente\ d'azote\ appliqu\acute{e}e\ (kg.ha^{-1}).$

III.2.4.8.3. Efficience d'utilisation du phosphore (EUP)

$EUP (kg.kg^{-1}) = (Rendement\ en\ grain\ du\ ma\acute{ı}s\ dans\ le\ traitement - rendement\ en\ grain\ de\ ma\acute{ı}s\ dans\ le\ t\acute{e}moin\ sans\ vers\ de\ terre) (kg.ha^{-1}) / Quantit\acute{e}\ totale\ \acute{e}quivalente\ de\ phosphore\ appliqu\acute{e}e\ (kg.ha^{-1}).$

III.3. ANALYSES STATISTIQUES

La comparaison des moyennes s'est r\acute{e}alis\acute{e}e avec les tests param\acute{e}triques t de Student ou l'analyse de la variance \`a un facteur au seuil de 5% lorsque l'homog\`en\`e\`it\`e des variances est \acute{e}tablie (test de Levene) ; c'est le cas des param\`etres r\`elatifs \`a la diversit\`e, les donn\`ees morphologiques, physiques, chimiques et la mati\`ere organique, l'indicateur IGQS, les agr\`egats biog\`eniques, le DMP, les param\`etres de croissance et agronomiques (EUA, EUP et EUE). Pour certains cas o\`u les diff\`erences \acute{e}taient significatives, les moyennes sont s\`epar\`ees selon la m\`ethode LSD (Least Significant Difference). Dans le cas o\`u les variances ne sont pas homog\`enes et que l'\`egalit\`e des variances ne peut-\`etre obtenue apr\`es transformation logarithmique, les moyennes ont \acute{e}t\`e compar\`ees avec le test non param\`etrique de Kruskal-Wallis. Des tests de r\`egressions multiples et simples de Spearman ont \acute{e}t\`e r\`ealis\`es pour tester les corr\`elations entre des variables. Ces diff\`erents tests ont \acute{e}t\`e r\`ealis\`es \`a l'aide du logiciel Statistica 7.0. (Statsoft, Tulsa, USA).

Le programme IndVal (Dufr\`ene & Legendre, 1997) a permis de d\`eterminer les esp\`eces et genres de vers indicateurs et de leur attribuer une valeur indicatrice. Les esp\`eces retenues comme indicatrices sont celles dont la pr\`eference pour les milieux est significativement (test-t de Student) plus \acute{e}lev\`ee que ne le laisse supposer une distribution al\`eatoire et celles dont la valeur indicatrice est au moins \acute{e}gale \`a 25%. \`A 25%, l'esp\`ece caract\`eristique appara\`ıt au moins \`a 50% dans un groupe donn\`e de milieux et son abondance relative dans ce groupe atteint 50% (Dufr\`ene & Legendre, 1997 ; Nahmani & Rossi, 2003).

Les Analyses en Composantes Principales (ACP) et de co-inertie ont été réalisées afin de déterminer le facteur explicatif de la variabilité entre les types d'usage des sols et d'établir les relations générales entre la structure de l'assemblage d'espèces de vers de terre et l'ensemble des paramètres environnementaux, respectivement. La signification des ACP et de la co-structure a été testée respectivement à l'aide du test de Monté Carlo et d'un test par permutation à l'issue de 1000 randomisations. Toutes ces analyses ont été réalisées avec le logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. ETUDE DE L'IMPACT DE L'AGRICULTURE TRADITIONNELLE SUR LES PEUPEMENTS DE VERS TERRE DANS LA ZONE DE GOULIKAO

IV.1.1. Composition des peuplements de vers de terre

Les peuplements des vers de terre récoltés à "Petit Bouaké", "Djè Koffikro" et "N'Kroiédjô" sont constitués respectivement de 20 ; 19 et 18 espèces. Ces espèces de vers sont réparties en 7 genres (*Millsonia*, *Dichogaster*, *Agastrodrilus*, *Hyperiodrilus*, *Scolecillus*, *Stuhlmannia* et *Gordiodrilus*) et trois familles (Tableau VII). Une espèce appartenant au genre *Dichogaster* n'a pu être identifiée, et par conséquent, a été classée en morpho-espèce.

L'espèce *Agastrodrilus opisthogynus* n'est restreinte qu'au site de Petit Bouaké alors que *Dichogaster lamottei* ne se rencontre que sur les sites de "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro". Hormis les 2 espèces de vers de terre suscitées, les autres sont communes aux trois sites.

IV.1.2. Abondance

IV.1.2.1. Densité

- Site "Petit Bouaké"

La plus forte densité des vers de terre s'observe dans la jachère de 5 ans ($255,47 \pm 45,58$ ind.m⁻²). Ensuite viennent la jachère de 2 ans ($158,93 \pm 8,82$ ind.m⁻²), la forêt ($158,13 \pm 32,81$ ind.m⁻²), le champ de maïs ($103,20 \pm 33,76$ ind.m⁻²), les cacaoyères de 10 ans ($81,07 \pm 18,72$ ind.m⁻²) et 5 ans ($71,47 \pm 1,73$ ind.m⁻²). La plus faible densité a été récoltée dans la cacaoyère âgée de 20 ans ($65,87 \pm 11,78$ ind.m⁻²) (Figure 20a). Les différences observées entre les types d'usage des sols sont significatives (Kruskall-Wallis, $p = 0,004$).

Quatre espèces, en l'occurrence *S. zielae* (28,2%), *D. baeri* (20,9%), *D. eburnea* (16,4%) et *D. ehrhardti* (14,2%) se partagent l'essentielle de la densité totale en forêt (Figure 20b). L'espèce *S. zielae* compte pour la quasi-totalité de la densité des vers de terre dans les plantations de cacaoyers de 10 ans (68,4%) et de 20 ans (64,4%). Alors que dans la cacaoyère de 5 ans, l'essentiel de la densité est partagée entre les espèces *S. zielae* (21,3%), *M. omodeoi* (19,8%), *D. baeri* (15,3%), *D. ehrhardti* (11,6%) et *H. africanus* (10,5%). *S. zielae* (61,9%) domine la densité totale devant *D. baeri* (14,3%) dans la jachère de 5 ans, tandis que les espèces *S. zielae* (32,7%), *D. terraenigrae* (30%) et *D. baeri* (28,2%) occupent une importante proportion dans la jachère de 2 ans. Trois espèces à savoir *S. zielae* (38%), *H. africanus* (23,8%) et *M. omodeoi* (10,3%) dominent sous la culture de maïs. *H. africanus* presque inexistante dans les autres milieux a subi une importante augmentation dans le champ de maïs.

Tableau VII : Occurrence des espèces de vers de terre par sites d'étude (1 : présence, 0 : absence).

Familles	Espèces	Sites		
		"Petit Bouaké"	"Djè Koffikro"	"N'Kroiêdjô"
Acanthodrilidae	<i>Millsonia lamtoiana</i> (Omodeo & Vaillaud, 1967)	1	1	1
	<i>Millsonia omodeoi</i> (Sims, 1986)	1	1	1
	<i>Millsonia nilesi</i> (Sims, 1986)	1	1	1
	<i>Dichogaster baeri</i> (Sciacchitano, 1952)	1	1	1
	<i>Dichogaster terraenigrae</i> (Omodeo & Vaillaud, 1967)	1	1	1
	<i>Dichogaster saliens</i> (Beddard, 1893)	1	1	1
	<i>Dichogaster erhrhardti</i> (Michaelsen, 1898)	1	1	1
	<i>Dichogaster lamottei</i> (Omodeo, 1958)	1	1	0
	<i>Dichogaster papillosa</i> (Omodeo, 1958)	1	1	1
	<i>Dichogaster eburnea</i> (Csuzdi & Tondoh, 2007)	1	1	1
	<i>Dichogaster mamillata</i> (Csuzdi & Tondoh, 2007)	1	1	1
	<i>Dichogaster affinis</i> (Michaelsen, 1890)	1	1	1
	<i>Dichogaster sp.</i>	1	1	1
	<i>Agastrodrilus multivesiculatus</i> (Omodeo & Vaillaud, 1967)	1	1	1
	<i>Agastrodrilus opisthogynus</i> (Omodeo & Vaillaud, 1967)	1	0	0
Eudrilidae	<i>Hyperiodrilus africanus</i> (Beddard, 1891)	1	1	1
	<i>Scolecillus compositus</i> (Omodeo, 1958)	1	1	1
	<i>Stuhlmannia zielae</i> (Omodeo, 1963)	1	1	1
	<i>Stuhlmannia palustris</i> (Omodeo & Vaillaud, 1967)	1	1	1
Ocnerodrilidae	<i>Gordiodrilus paski</i> (Stephenson, 1928)	1	1	1
3	20	20	19	18

- Site "Djè Koffikro"

La densité des vers de terre ne varie pas de manière significative de la forêt aux milieux anthropisés sur le site "Djè Koffikro". Néanmoins, la plus forte densité a été récoltée sous la jachère de 5 ans ($123,47 \pm 35,70 \text{ ind.m}^{-2}$). Elle est suivie dans l'ordre décroissant par la cacaoyère de 10 ans ($107,47 \pm 21,86 \text{ ind.m}^{-2}$), la cacaoyère de 20 ans ($90,13 \pm 15,56 \text{ ind.m}^{-2}$), la jachère de 2 ans ($85,87 \pm 5,36 \text{ ind.m}^{-2}$), la forêt secondaire ($73,6 \pm 21,7 \text{ ind.m}^{-2}$) et le champ de vivrier ($71,73 \pm 15,59 \text{ ind.m}^{-2}$). La cacaoyère de 5 ans, avec une valeur de $54,93 \pm 14,58 \text{ ind.m}^{-2}$ affiche la plus faible densité des vers de terre (Figure 21a).

D. eburnea (28,6%) et *D. erhrhardti* (24,6%) représentent les vers de terre les plus importants dans la forêt (Figure 21b). Viennent ensuite *S. zielae* (10,9%) et *D. mamillata* (10,1%). Dans la cacaoyère de 20 ans, *S. zielae* (36,1%) et *M. omodeoi* (22,8%) constituent les espèces de vers de terre les plus représentatives. Elles sont suivies par *D. baeri* (13%) et *D. erhrhardti* (10,7%). L'épigée *D. papillosa* et l'endogée *S. zielae* dominent la densité des vers de terre dans les jeunes cacaoyères. Les proportions sont de 40% (*S. zielae*) et 23,8% (*D. papillosa*) dans la cacaoyère de 10 ans et de 34,5% (*S. zielae*) et 23,3% (*D. papillosa*) dans la cacaoyère de 5 ans. Le peuplement sous la jachère de 5 ans est dominé par les populations de *M. omodeoi* (28,3%), *D. erhrhardti* (24,4%) et *D. baeri* (18,8%). Sous la jachère de 2 ans, les espèces *M. omodeoi* (27,3%), *D. baeri* (25,2%) et *S. zielae* (20%) sont les plus abondantes. D'une manière générale, les populations de *M. omodeoi* et *D. baeri* sont abondantes dans les jachères. Dans la culture vivrière l'espèce épigée *D. eburnea* a disparu au profit de *M. omodeoi* (35,3%), *D. erhrhardti* (25,7%) et *H. africanus* (25,7%).

- Site "N'Kroiêdjô"

La densité globale des vers de terre varie de manière significative (Test de Kruskal-Wallis, $p = 0,0048$) entre les 9 types d'usage des sols du site de "N'Kroiêdjô". La plus forte densité des vers de terre s'observe dans la cacaoyère de 20 ans ($54,93 \pm 8,15 \text{ ind.m}^{-2}$). Elle est suivie dans l'ordre de densité décroissante, par la teckeraie de 8 ans ($45,6 \pm 11,91 \text{ ind.m}^{-2}$), la teckeraie de 14 ans ($38,67 \pm 6,57 \text{ ind.m}^{-2}$), les cacaoyères de 5 ans ($35,2 \pm 12,04 \text{ ind.m}^{-2}$) et 10 ans ($33,87 \pm 5,07 \text{ ind.m}^{-2}$), la forêt secondaire ($26,13 \pm 3,17 \text{ ind.m}^{-2}$), les jachères de 2 ans ($21,33 \pm 6,37 \text{ ind.m}^{-2}$) et 5 ans ($18,13 \pm 3,26 \text{ ind.m}^{-2}$). La plus faible densité de vers de terre est observée dans le champ de vivriers ($16,53 \pm 3,31 \text{ ind.m}^{-2}$) (Figure 22a).

Les espèces *D. baeri* (33,7%), *D. eburnea* (20,4%), *D. saliens* (10,2%) et *G. paski* (10,2%) dominent les peuplements en densité sous la forêt.

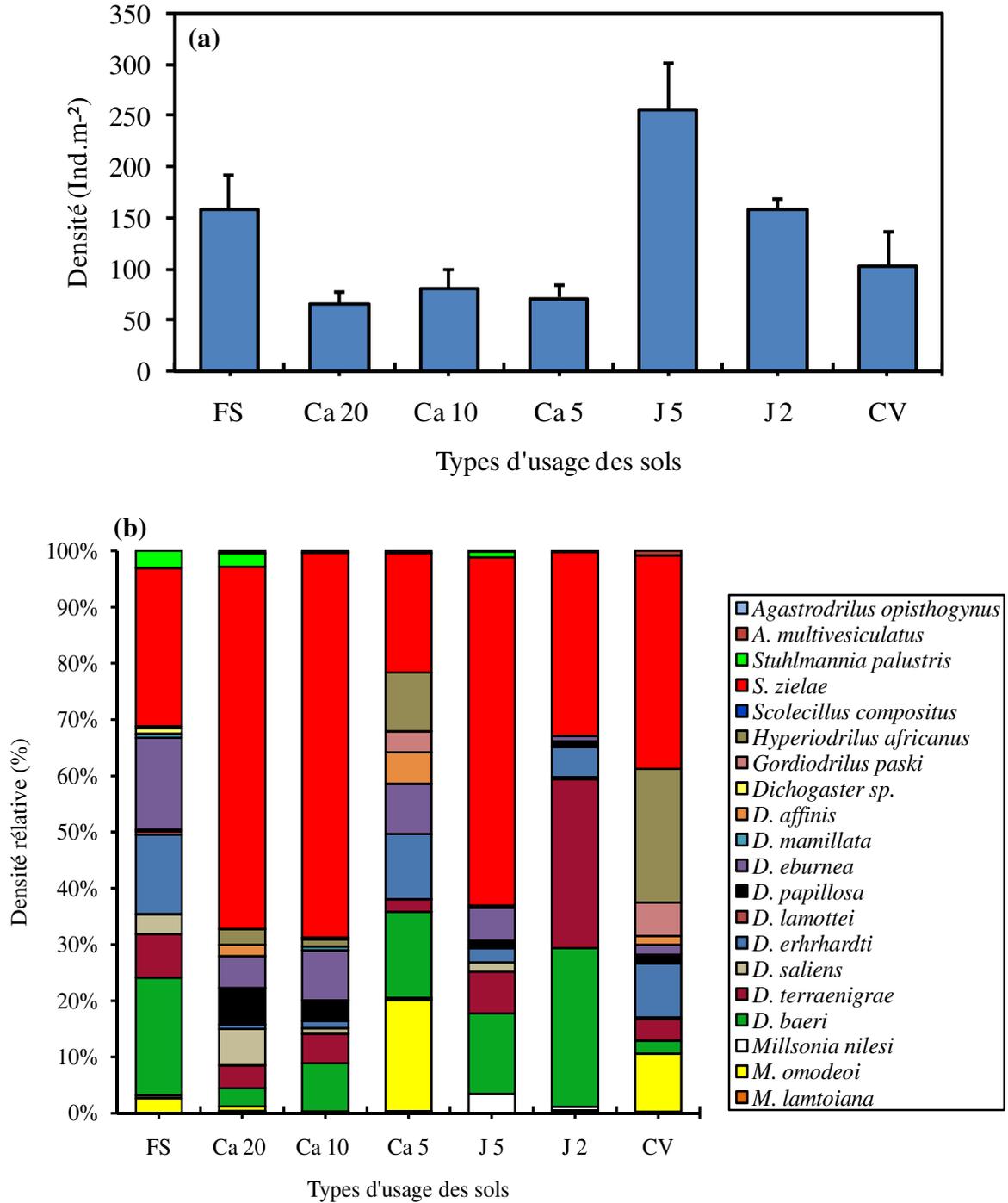


Figure 20 : Variation de la densité des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "Petit Bouaké": (a) Densité globale et (b) Densité relative. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

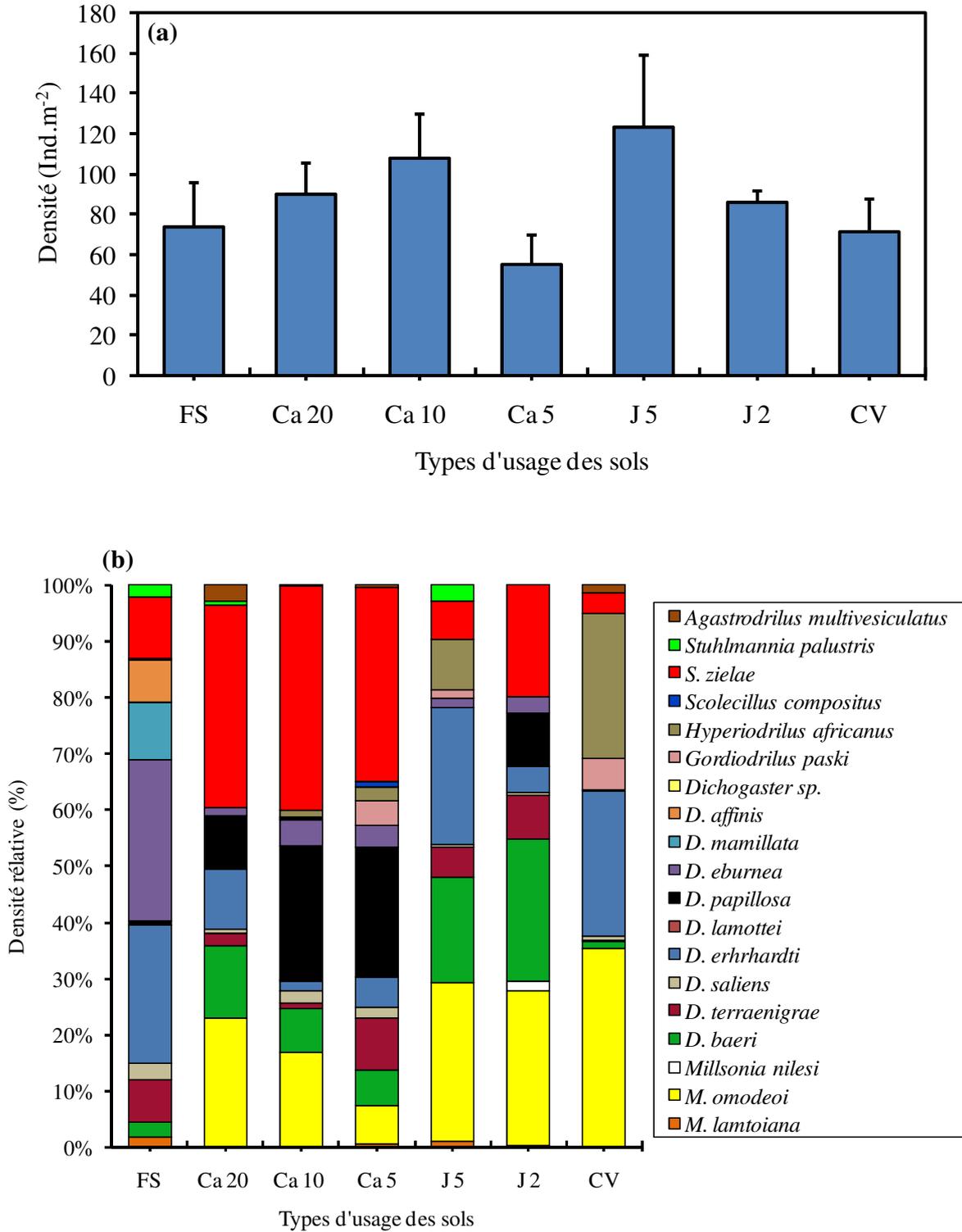


Figure 21 : Variation de la densité des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "Djè Koffikro": (a) Densité globale et (b) Densité relative. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

Seules les espèces pantropicales *M. omodeoi* (58,6%) et *D. baeri* (24,1%) dominent dans le reboisement de teck de 14 ans, alors que les espèces *S. zielae* (36,8%), *D. baeri* (24%) et *D. terraenigrae* (18,7%) représentent l'essentiel de la densité des vers de terre dans la teckeraie de 8 ans. Les espèces sont différemment distribuées d'une cacaoyère à une autre. Deux espèces dominent la densité dans la cacaoyère de 20 ans ; il s'agit de *S. zielae* (49,5%) et *D. baeri* (10,7%). Par contre dans la cacaoyère de 10 ans, l'essentiel de la densité est réparti entre *S. zielae* (31,5%), *D. papillosa* (23,6%) et *D. erhrhardti* (16,5%). Quatre espèces dont *G. paski* (33,3%), *S. zielae* (16,7%), *D. eburnea* (11,4%) et *H. africanus* (11,4%) se partagent l'essentiel de la densité des vers de terre dans la plus jeune cacaoyère. Le peuplement sous la jachère de 5 ans est dominé par *D. baeri* (35,3%), *Dichogaster sp.* (19,1%) et *D. terraenigrae* (16,2%). Sous la jachère de 2 ans, seule l'espèce *M. omodeoi* (56,3%) domine de loin, elle est suivie par *D. erhrhardti* (15%). Trois espèces de vers de terre *H. africanus* (43,6%), *D. baeri* (25,8%) et *M. omodeoi* (22,6%) dominent dans les cultures vivrières. L'espèce *H. africanus* caractérisée par une faible densité dans les autres types d'usage des sols a subi une importante augmentation dans les champs de vivriers (Figure 22b).

IV.1.2.2. Biomasse

- Site "Petit Bouaké"

La biomasse globale des vers de terre montre des différences très fortes entre les différents milieux considérés (Figure 23a). La biomasse la plus élevée s'observe dans la jachère de 2 ans ($59,89 \pm 4,10 \text{ g.m}^{-2}$) suivie par la jachère de 5 ans ($49,45 \pm 4,91 \text{ g.m}^{-2}$), la forêt ($30,18 \pm 7,93 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 5 ans ($27,17 \pm 3,22 \text{ g.m}^{-2}$), la culture vivrière ($21,72 \pm 4,07 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 10 ans ($10,37 \pm 2,63 \text{ g.m}^{-2}$) et la cacaoyère âgée ($9,65 \pm 2,65 \text{ g.m}^{-2}$). La variation de la biomasse observée sous l'ensemble des différents types d'usage des sols est significative (Kruskall-Wallis, $p < 0,001$).

Deux espèces du genre *Dichogaster*, à savoir *D. terraenigrae* (49,5%) et *D. baeri* (28,5%) dominent la biomasse globale en forêt. Quatre espèces dont *D. terraenigrae*, *M. lamtoiana*, *S. zielae* et *Dichogaster affinis* dominent la biomasse des vers dans les cacaoyères. De manière similaire à la forêt, *D. terraenigrae* et *D. baeri* dominent la biomasse dans les jachères de *Chromolaena odorata*. Les pourcentages sont respectivement de 56,3 et 21,5% dans la jachère de 5 ans, et de 64,9 et 26,1% dans la jachère de 2 ans. Les espèces *D. terraenigrae* (24,7%), *M. omodeoi* (24,1%), *H. africanus* (20,4%) et *M. lamtoiana* (14,9%) présentent une importante biomasse dans le champ de maïs (Figure 23b).

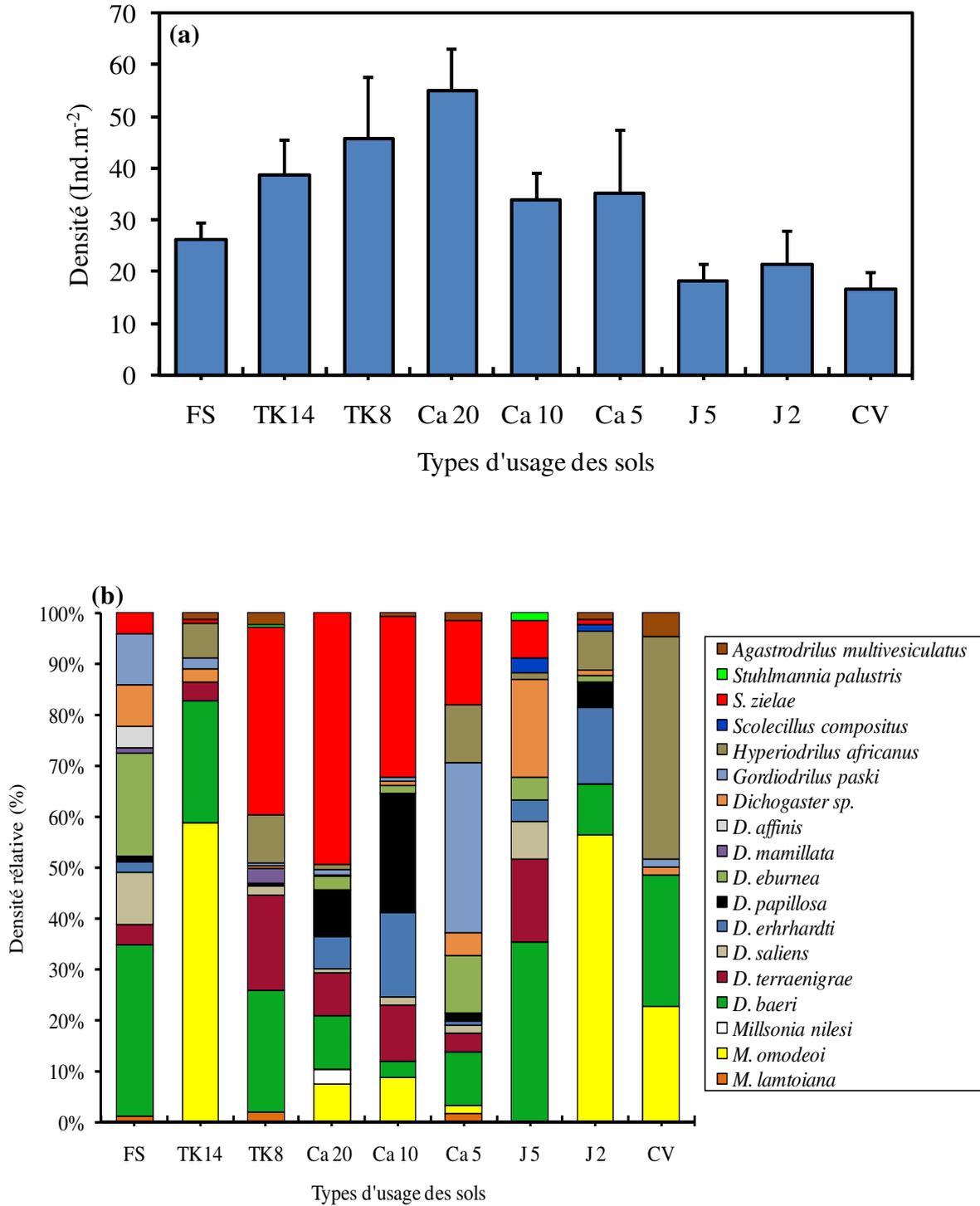


Figure 22 : Variation de la densité des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "N'Kroiédjô": (a) Densité globale et (b) Densité relative. FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

- Site "Djè Koffikro"

Contrairement à la densité, la biomasse globale des vers de terre varie de manière significative d'un type d'usage des sols à un autre (Kruskall-Wallis, $p = 0,023$). La biomasse est plus élevée dans la jachère de 5 ans ($44,69 \pm 8,73 \text{ g.m}^{-2}$) ; elle est suivie par la jachère de 2 ans ($39,36 \pm 5,84 \text{ g.m}^{-2}$), la culture vivrière ($27,72 \pm 3,89 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 20 ans ($27,32 \pm 6,36 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 10 ans ($19,4 \pm 4,27 \text{ g.m}^{-2}$) et la cacaoyère de 5 ans ($16,74 \pm 3,56 \text{ g.m}^{-2}$). La plus faible biomasse est observée dans la forêt secondaire ($14,39 \pm 5,34 \text{ g.m}^{-2}$) (Figure 24a).

Les espèces *D. terraenigrae* (38,8%) et *M. lamtoiana* (38,3%) dominent la biomasse globale des vers de terre dans la forêt. Elles sont suivies de loin par *D. erhrhardti* (8,7%). Le spectre de biomasse diffère d'une cacaoyère à une autre. Trois espèces dominent la biomasse dans la cacaoyère de 20 ans ; il s'agit notamment de *M. omodeoi* (40,8%), *D. baeri* (25,4%) et *D. terraenigrae* (18,3%). Par contre, dans la cacaoyère de 10 ans, hormis les espèces *M. omodeoi* (42,2%) et *D. baeri* (25,1%) qui affichent toujours les plus importantes biomasses, *D. terraenigrae* est substituée par le géophage polyhumique *S. zielae* (16,4%). Trois espèces *D. terraenigrae* (53,6%), *D. baeri* (13,9%) et *M. lamtoiana* (12,7%) occupent l'essentiel de la biomasse totale des vers dans la cacaoyère de 5 ans. *M. omodeoi*, *D. terraenigrae* et *D. baeri* représentent l'essentiel de la biomasse totale sous les jachères. Leurs proportions sont de 31,7 et 37,9% ; 26,7 et 28,4% ; 20,7 et 23,7%, respectivement dans la jachère de 5 ans et de 2 ans. La biomasse sous la culture vivrière est dominée par l'espèce *M. omodeoi* (66,5%) qui est suivie de loin par *H. africanus* (16,8%) (Figure 24b).

- Site "N'Kroiêdjô"

De manière similaire à la densité, la biomasse des vers de terre varie de manière significative à travers les 9 types d'usage des sols (Kruskall-Wallis, $p = 0,010$). La biomasse est plus élevée dans la teckeraie de 14 ans ($29,6 \pm 5,9 \text{ g.m}^{-2}$). Elle est suivie par la teckeraie de 8 ans ($19,7 \pm 3,5 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 20 ans ($12,6 \pm 2,4 \text{ g.m}^{-2}$), la jachère de 2 ans ($12,1 \pm 9,2 \text{ g.m}^{-2}$) et la cacaoyère de 5 ans ($11 \pm 4,4 \text{ g.m}^{-2}$). Les plus faibles valeurs de la biomasse s'observent dans la culture de maïs ($8,6 \pm 2,1 \text{ g.m}^{-2}$), la cacaoyère de 10 ans ($7,2 \pm 1,6 \text{ g.m}^{-2}$), la jachère de 5 ans ($6,4 \pm 1,3 \text{ g.m}^{-2}$) et la forêt ($5,6 \pm 2,2 \text{ g.m}^{-2}$) (Figure 25a).

Les espèces *D. baeri* (50,5%) et *M. lamtoiana* (33,2%) dominent la biomasse globale en forêt. *M. omodeoi* (73,7%) domine de loin dans la teckeraie de 14 ans, alors que dans la teckeraie de 8 ans, ce sont *D. terraenigrae* (57,4%) et *D. baeri* (21,1%).

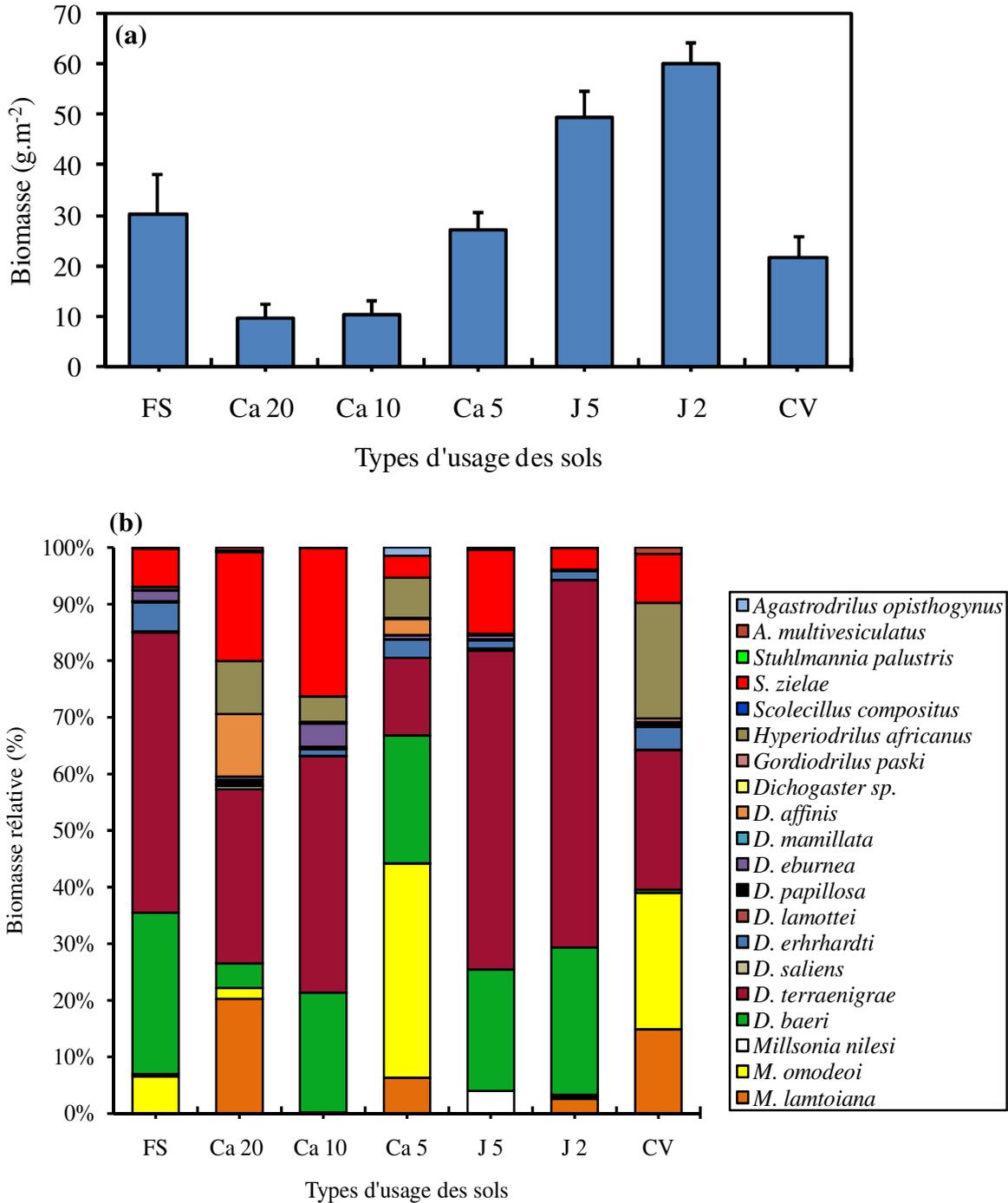


Figure 23 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "Petit Bouaké": (a) Biomasse globale et (b) Biomasse relative. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

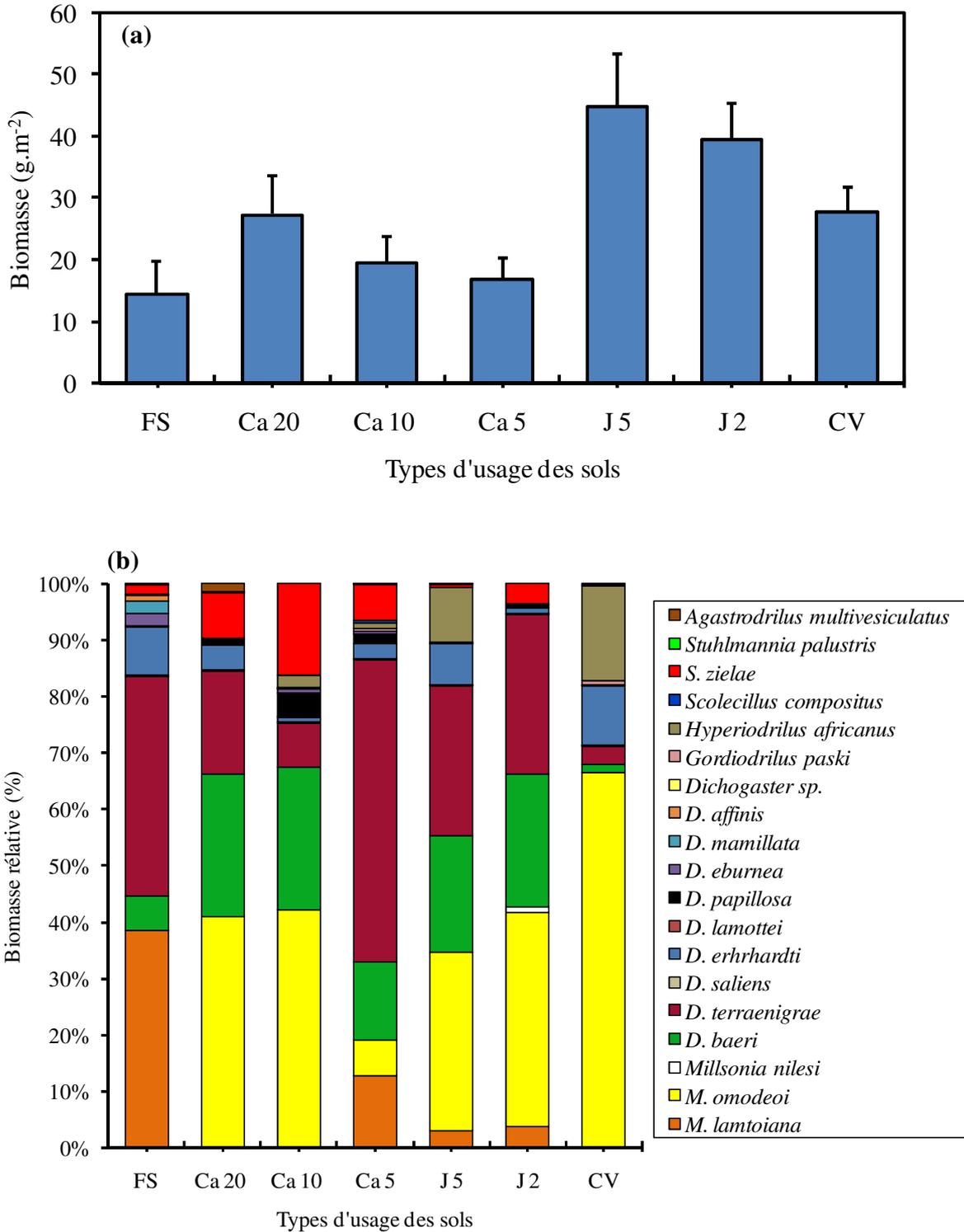


Figure 24 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "Djè Koffikro": (a) Biomasse globale et (b) Biomasse relative. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

Les populations de *D. terraenigrae*, *D. baeri* et *M. omodeoi* représentent l'essentiel de la biomasse dans les cacaoyères de 20 et 10 ans, tandis que *M. lamtoiana*, *D. baeri* et *D. terraenigrae* occupent une place prépondérante dans la cacaoyère de 5 ans.

Les espèces *D. baeri*, *D. terraenigrae* et *M. omodeoi* dominent la biomasse des vers de terre dans les jachères de *Chromolaena odorata*. Les pourcentages sont respectivement de 49,3 et 46,7 % dans la jachère de 5 ans, et de 83% dans la jachère de 2 ans. La biomasse des vers dans les champs de vivriers est tenue par *M. omodeoi* (50,7%), *H. africanus* (30,7%) et *D. baeri* (16%) (Figure 25b).

IV.1.3. Diversité des peuplements de vers de terre

IV.1.3.1. Richesse spécifique

IV.1.3.1.1. Nombre d'espèces cumulées

- Site "Petit Bouaké"

Le nombre cumulé d'espèces observées varie significativement sous l'ensemble des différents types d'utilisation du sol (Anova 1, $p = 0,006$). Cinq groupes se dégagent suivant le nombre potentiel d'espèces : la forêt (13 espèces), la culture vivrière (11 espèces), le groupe de la cacaoyère de 20 ans et de la jachère de 5 ans (10 espèces), le groupe des cacaoyères de 10 et 5 ans (9 espèces) et la jachère de 2 ans (8 espèces) (Figure 26a).

- Site "Djè Koffikro"

La variation du nombre d'espèces estimées est significative d'un milieu à un autre (Anova 1, $p = 0,02$). La forêt secondaire, la plus jeune cacaoyère et la jachère de 5 ans sont les milieux les plus riches avec 11 espèces. Elles sont suivies par ordre décroissant, des cacaoyères de 20 et 10 ans (9 espèces), de la jachère de 2 ans (8 espèces) et enfin de la culture vivrière (7 espèces) (Figure 26b).

- Site "N'Kroiêdjô"

La variation du nombre d'espèces cumulées est très significative d'un type d'usage du sol à un autre (Anova 1, $p < 0,001$) sur l'ensemble du site de "N'Kroiêdjô". Une estimation du nombre potentiel d'espèces présentes sous les différentes parcelles montre que la cacaoyère de 20 ans est le milieu le plus riche avec 10 espèces. Elle est suivie par ordre de richesse décroissante, de la forêt et la cacaoyère de 5 ans (9 espèces), de la cacaoyère de 10 ans et la jachère de 5 ans (8 espèces), de la teckeraie de 8 ans (7 espèces), de la teckeraie de 14 ans (6 espèces), de la jachère de 2 ans (5 espèces) et de la culture vivrière (3 espèces) (Figure 26c).

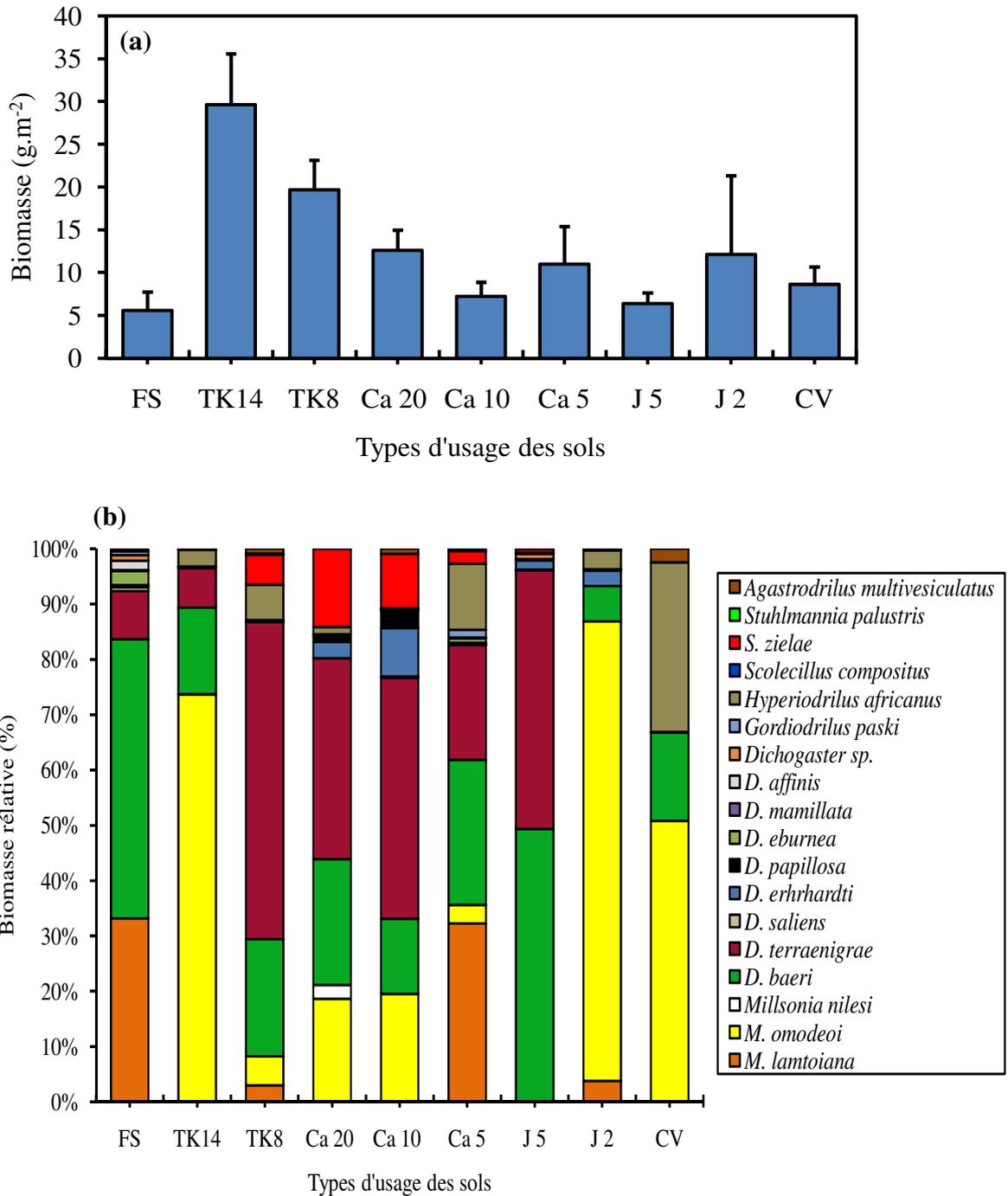


Figure 25 : Variation de la biomasse des peuplements de vers de terre selon le type d'usage des sols du site de "N'Kroiêdjô": (a) Biomasse globale et (b) Biomasse relative. FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

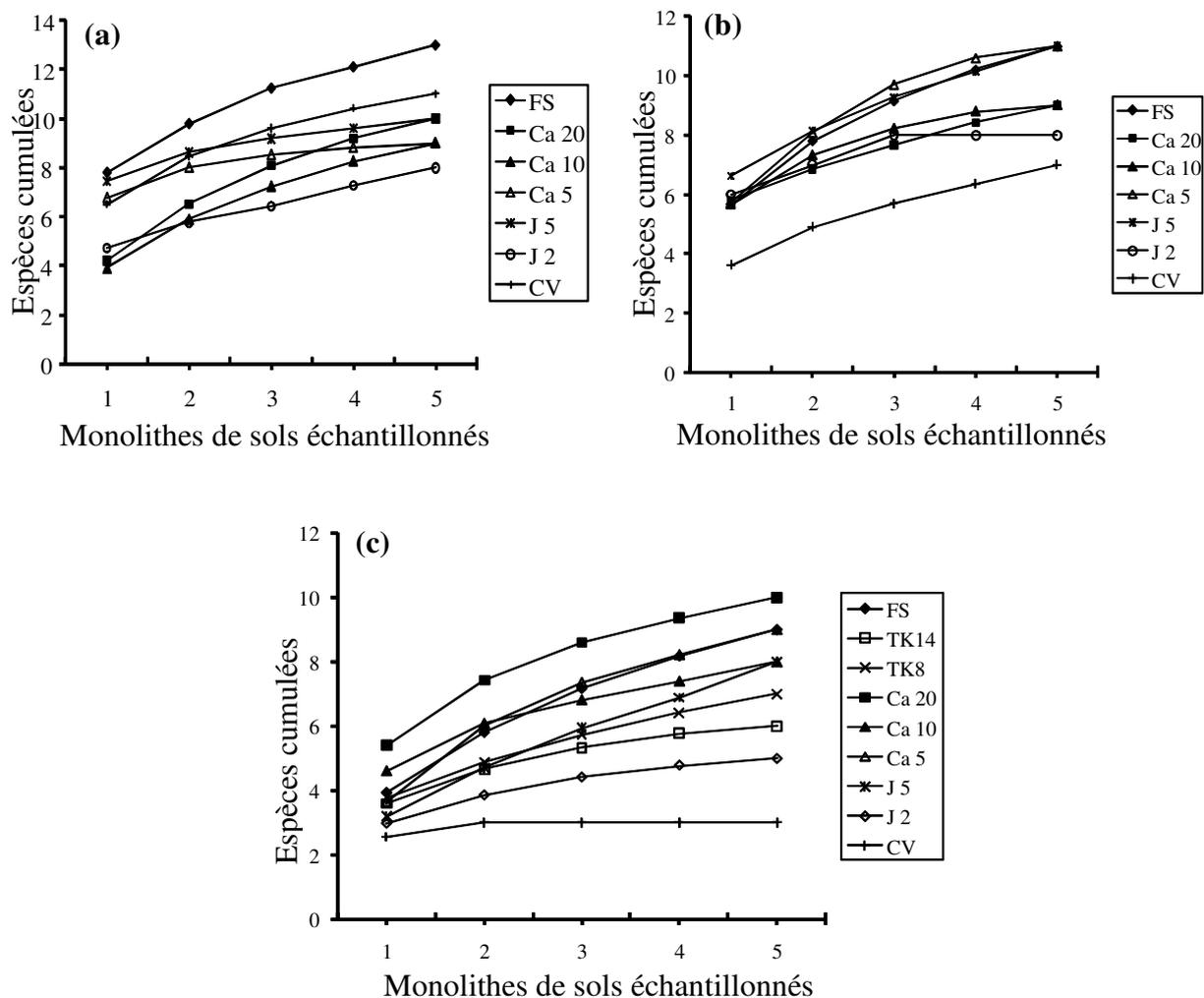


Figure 26 : Courbes d'accumulation des espèces de vers de terre des différents sites d'étude : (a) site "Petit Bouaké", (b) site "Djè Koffikro" et (c) site "N'Kroiêdjô". FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

IV.1.3.1.2. Nombre moyen d'espèces

- Site "Petit Bouaké"

Le nombre moyen d'espèces de vers de terre par mètre carré varie de manière significative (Anova 1, $p = 0,0086$) entre les 7 types d'usage des sols. La forêt secondaire ($9 \pm 0,45$ espèces.m⁻²) héberge la plus grande richesse spécifique. Elle est suivie dans l'ordre de richesse décroissante par la jachère de 5 ans ($8,8 \pm 0,37$ espèces.m⁻²), la cacaoyère de 5 ans ($7,8 \pm 0,37$ espèces.m⁻²), la culture vivrière ($7,8 \pm 0,73$ espèces.m⁻²), la cacaoyère de 20 ans ($7 \pm 0,71$ espèces.m⁻²) et la jachère de 2 ans ($6,4 \pm 0,81$ espèces.m⁻²). La plus faible valeur s'observe dans la cacaoyère de 10 ans (Tableau VIII).

- Site "Djè Koffikro"

Le nombre moyen d'espèces de vers de terre ne varie pas significativement entre les 7 types d'usage des sols. Cependant, les cacaoyères de 5 et 10 ans, la jachère de 2 ans et la forêt hébergent la plus grande richesse spécifique. La culture vivrière ($5,4 \pm 0,4$ espèces.m⁻²) est le milieu le moins riche en espèces de vers de terre (Tableau VIII).

- Site "N'Kroiêdjô"

Le nombre moyen d'espèces de vers de terre varie de significativement entre les types d'usage des sols. La cacaoyère de 20 ans ($7,20 \pm 0,58$ espèces.m⁻²) abrite la plus grande richesse spécifique. Elle est suivie dans l'ordre de richesse décroissante par la cacaoyère de 5 ans, la forêt secondaire, la cacaoyère de 10 ans, la teckeraie de 8 ans, les jachères naturelles de 2 et 5 ans et la teckeraie de 14 ans. La plus faible valeur de la richesse spécifique s'observe dans la culture vivrière ($3,8 \pm 0,49$ espèces.m⁻²) (Tableau VIII).

IV.1.3.2. Indice de Shannon (*H'*) et l'équitabilité (*E*)

- Site "Petit Bouaké"

L'indice de diversité de Shannon diffère significativement d'un type d'usage des sols à un autre à l'échelle du site de "Petit Bouaké" (Tableau VIII). Les types d'usage des sols les plus diversifiés sont la cacaoyère de 5 ans, la forêt secondaire et la culture vivrière avec respectivement $2,63 \pm 0,07$; $2,58 \pm 0,11$ et $2,15 \pm 0,31$. Cet indice baisse par la suite dans les jachères et la cacaoyère de 20 ans. La cacaoyère de 10 ans présente la plus faible valeur d'indice de diversité de Shannon.

De manière similaire à l'indice de Shannon, l'équitabilité varie de manière significative entre les différents types d'usage des sols (Tableau VIII). Les valeurs de l'équitabilité sont toutes supérieures à 0,50. Cependant, la tendance à la répartition équitable des effectifs entre les espèces est plus prononcée dans la plantation de cacaoyers de 5 ans ($0,89 \pm 0,01$) et la forêt secondaire ($0,81 \pm 0,02$).

- Site "Djè Koffikro"

La variation de l'indice de diversité de Shannon est significative d'un milieu à un autre (Anova 1, $p = 0,009$). La considération des milieux dans l'ordre de diversité décroissante montre que la jachère de 2 ans ($2,37 \pm 0,07$), la cacaoyère de 20 ans ($2,32 \pm 0,09$), la jachère de 5 ans ($2,24 \pm 0,24$), la cacaoyère de 5 ans ($2,22 \pm 0,09$) et la forêt ($2,22 \pm 0,1$) hébergent des peuplements de vers de terre les plus diversifiés. Avec un indice de diversité de $1,64 \pm 0,1$; la culture vivrière est le milieu le moins diversifié en espèces de vers de terre (Tableau VIII).

L'équitabilité varie significativement (Anova 1 ; $p = 0,042$) entre les sept types d'usage des sols (Tableau VIII). Les tendances à la répartition équitable des effectifs entre les espèces sont très grandes en jachères, en forêt et en cacaoyères.

- Site "N'Kroiédjô"

L'indice de diversité de Shannon ne varie pas significativement d'un type d'utilisation des sols à un autre. Cependant les cacaoyères et la forêt abritent les peuplements les plus diversifiés. La plus petite valeur de l'indice s'observe dans la teckeraie de 14 ans ($1,51 \pm 0,22$) (Tableau VIII).

De manière similaire à l'indice de Shannon, l'équitabilité ne varie pas de manière significative entre les 9 différents types d'usage des sols. Toutefois, il y a une grande tendance à la répartition équitable des effectifs entre les espèces dans tous les milieux (Tableau VIII).

IV.1.4. Richesse floristique des sites d'étude

L'inventaire de la flore globale des différents types d'usage des sols des trois sites de production cacaoyères a donné 332 espèces végétales réparties en 247 genres et 79 familles (Sey, 2010). Les Rubiaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Poaceae et Apocynaceae sont les familles les plus riches en espèces. Tandis que les genres les plus riches en espèces sont : *Diospyros*, *Salacia*, *Chrysophyllum*, *Combretum*, *Dalbergia*, *Dioscorea*, *Panicum*, *Oxyanthus* et *Leptoderris* (Annexe 1).

Le site de "Petit Bouaké" est le moins riche (Tableau IX). Le nombre d'espèces varie entre 26 dans la cacaoyère de 20 ans et 86 dans la forêt secondaire. Les jachères naturelles de 5 et 2 ans ont respectivement 79 et 74 espèces. Les cacaoyères de 10 et 5 ans ont respectivement 26 et 68 espèces tandis que la culture vivrière héberge 35 espèces végétales (Annexe 1).

Un total de 178 espèces végétales a été inventorié sur le site de "Djè Koffikro" (Tableau IX). La forêt secondaire abrite le plus d'espèces végétales tandis que la culture vivrière est le milieu le moins riche. Les jachères rurales suivent la forêt avec une richesse de 75 et 81 espèces, respectivement pour la jachère de 5 et 2 ans. La richesse spécifique des 3 cacaoyères varie entre 46 et 72 espèces (Annexe 1).

Le Site de "N'Kroiédjô" est le plus grand et floristiquement, le plus riche de la zone d'étude. Il abrite 226 espèces, soit une proportion de 68,1% de la flore totale de la zone de Goulikao (Tableau IX). La forêt secondaire héberge la plus importante richesse floristique du site, alors que la cacaoyère de 5 ans et la teckeraie de 14 ans sont les deux milieux abritant les plus faibles richesses (Annexe 1).

Tableau VIII : Nombre moyen d'espèces, indice de Shannon et équitabilité des peuplements de vers de terre.

TUS	Site "Petit Bouaké"			Site "Djè Koffikro"			Site "N'Kroiêdjô"		
	S	H'	E	S	H'	E	S	H'	E
F	9(0,45) d	2,58(0,11) c	0,81(0,02) cd	7,2(0,97) a	2,22(0,1) b	0,8(0,04) b	6(0,55) bcd	2,21(0,15) a	0,86(0,05) a
Ca20	7(0,71) abc	1,65(0,15) ab	0,59(0,02) a	7,4(0,6) a	2,32(0,09) b	0,81(0,02) b	4,4(0,68) ab	1,51(0,22) a	0,74(0,05) a
Ca10	5,8(0,73) a	1,49(0,29) a	0,58(0,07) a	6,8(0,8) a	2,02(0,15) ab	0,75(0,04) ab	5,4(0,40) abc	1,97(0,13) a	0,81(0,03) a
Ca5	7,8(0,37) bcd	2,63(0,07) c	0,89(0,01) d	7,6(0,93) a	2,22(0,09) b	0,78(0,04) b	7,20(0,58) d	2,05(0,14) a	0,73(0,04) a
J5	8,8(0,37) cd	1,89(0,14) ab	0,6(0,04) ab	6,8(0,97) a	2,24(0,24) b	0,82(0,03) b	5,80(0,37) bcd	2,13(0,11) a	0,84(0,02) a
J2	6,4(0,81) ab	1,93(0,09) ab	0,74(0,04) bcd	7,4(0,75) a	2,37(0,07) b	0,84(0,04) b	7(0,55) cd	2,26(0,11) a	0,82(0,05) a
CV	7,8(0,73) bcd	2,15(0,31) bc	0,73(0,1) abc	5,4(0,4) a	1,64(0,1) a	0,68(0,02) a	5(1,1) ab	1,93(0,32) a	0,9(0,03) a
TK14							5,2(0,58) ab	1,95(0,31) a	0,82(0,01) a
TK8							3,8(0,49) a	1,57(0,22) a	0,84(0,04) a
<i>p</i> (Anova 1)	0,009	0,001	0,001	ns	0,009	0,042	0,007	ns	ns

TUS : types d'usage des sols, F : Forêt, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5% ; ns : différence non significative ; S : nombre moyen d'espèces ; H' : indice de Shannon ; E : équitabilité.

Tableau IX: Richesse floristique des sites d'étude

Sites d'étude	Familles	Genres	Espèces
Petit Bouaké	56	139	162
Djè Koffikro	68	154	178
N'Kroiêdjô	75	183	226
Total	79	247	332

Le test de régression multiple montre qu'à l'exception du site de "N'Kroiêdjô", la richesse floristique influence les peuplements de vers de terre sur les sites de "Petit Bouaké" ($R^2 = 0,2863$; $p = 0,0064$; $F = 2,326$) et "Djè Koffikro" ($R^2 = 0,3206$; $p = 0,038$; $F = 2,7364$). La densité des vers de terre ($\beta = 0,7123$; $p = 0,033$), la richesse spécifique ($\beta = 2,179$; $p = 0,042$) et l'indice de diversité de Shannon ($\beta = 4,2448$; $p = 0,044$) sont significativement liés à la richesse floristique sur le site de "Petit Bouaké". Alors que sur le site de "Djè Koffikro", seule la densité des vers de terre ($\beta = 0,409$; $p = 0,036$) est significativement influencée par la richesse floristique. Les tests de corrélation simple de Spearman montrent l'existence d'une corrélation positive entre la richesse floristique et chacun des paramètres suscités (Tableau X), bien que les coefficients de corrélation ne sont pas trop élevés.

Tableau X: Coefficients de corrélation entre la richesse floristique et les paramètres biotiques (test de Spearman)

	Site "Petit Bouaké"	Site "Djè Koffikro"	Site "N'Kroiêdjô"
Densité	0,36 (0,033)*	0,34 (0,036)*	-0,25 (0,097)
Biomasse	0,12 (0,084)	-0,16 (0,235)	-0,20 (0,129)
Nombre d'espèces	0,30 (0,042)*	-0,18 (0,601)	0,02 (0,872)
Indice de Shannon	0,29 (0,044)*	0,22 (0,143)	0,14 (0,512)
Equitabilité	0,02 (0,840)	0,24 (0,09)	0,25 (0,353)
Richesse cumulée	0,10 (0,759)	0,06 (0,724)	-0,16 (0,541)

Les valeurs entre parenthèses représentent le niveau de significativité P . L'astérisque indique la présence de corrélation significative

IV.1.5. Facteurs à l'origine de la variation des peuplements

Une étude des facteurs de variation des paramètres des peuplements a été réalisée à l'aide d'analyses multivariées dans chaque site d'étude afin de compléter l'analyse préliminaire et d'établir une discrimination des types d'usage des sols.

- Site "Petit Bouaké"

Les deux premiers axes de l'ACP des paramètres du peuplement des vers de terre récoltés dans les types d'usage des sols expliquent 72% de la variabilité totale. L'axe 1 du cercle de corrélation explique 42,5% de l'inertie totale et le deuxième axe 29,5% (Figure 27a). Le cercle de corrélation révèle que toutes les variables sont négativement liées au premier axe. Toutefois, il ressort que sur la base de la contribution relative de chaque paramètre sur l'axe, ce sont le nombre moyen d'espèces, l'indice de Shannon et l'équitabilité qui sont fortement corrélés à l'axe 1. L'axe 2 du cercle de corrélation est principalement caractérisé sur son côté positif par les variables de l'abondance (densité et biomasse).

La carte factorielle explique la variation des paramètres biotiques par le type d'utilisation des sols (Figure 27b) ; les parcelles sont réparties en quatre (4) groupes reflétés dans la simplification de la diversité végétale. Le premier groupe situé à l'extrémité gauche de l'axe 1 est constitué par la forêt secondaire. Le groupe formé par le champ cultivé et la cacaoyère de 5 ans suit la forêt, vient ensuite le groupe des parcelles de jachère de 2 et 5 ans. Le dernier groupe situé à l'extrême droite de l'axe est formé par les cacaoyères de 10 et 20 ans. Deux groupes se distinguent suivant l'axe 2. Il y a d'une part, le groupe formé par le milieu naturel (forêt) et les écosystèmes en reconstitution (jachères), et d'autre part le groupe composé par les milieux anthropisés (cacaoyères et champ cultivé). Le test de permutation montre que l'ordination des types d'usage des sols révélée par le plan factoriel 1-2 est significative ($p < 0,001$).

La forêt est caractérisée par une plus grande diversité de vers de terre (nombre moyen d'espèces, espèce cumulée, Shannon), les jachères par une importante densité et biomasse, tandis que le groupe de la cacaoyère de 5 ans et du champ cultivé est caractérisé par une grande équitabilité. Le groupe des cacaoyères de 10 et 20 ans est présente relativement les plus faibles valeurs d'abondance et de diversité.

- Site "Djè Koffikro"

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 42,2 et 20% de la variance totale entre les différents types d'usage des sols ; soit une inertie totale de 62,2% (Figure 28a).

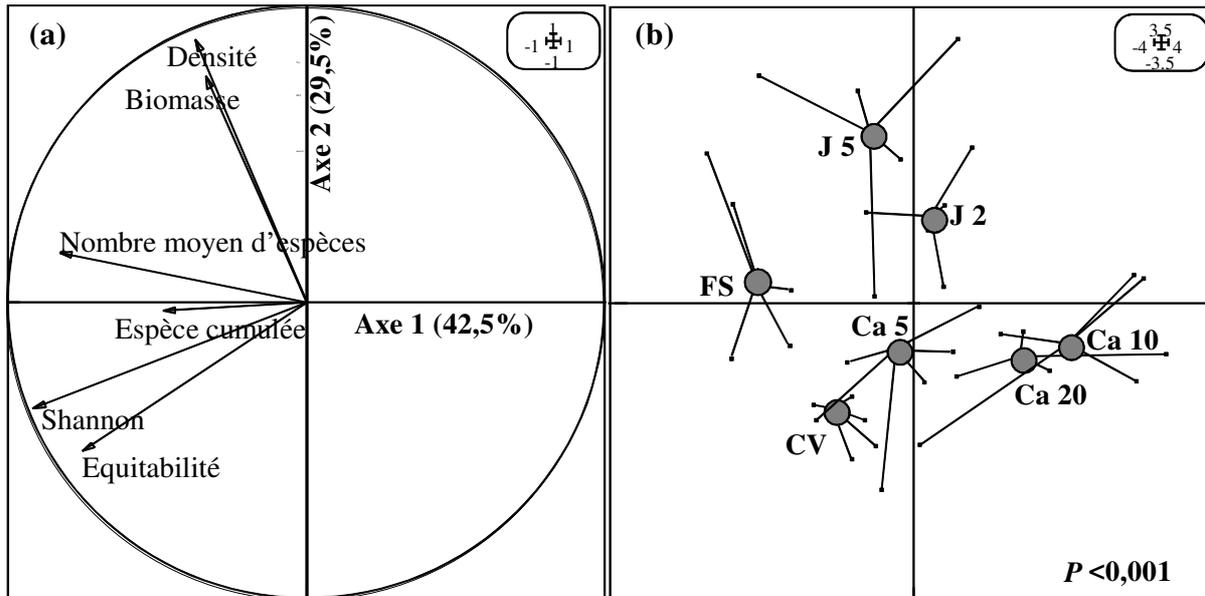


Figure 27 : Analyse en Composantes Principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "Petit Bouaké" : (a) cercle de corrélation des variables et (b) plan factoriel 1-2. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

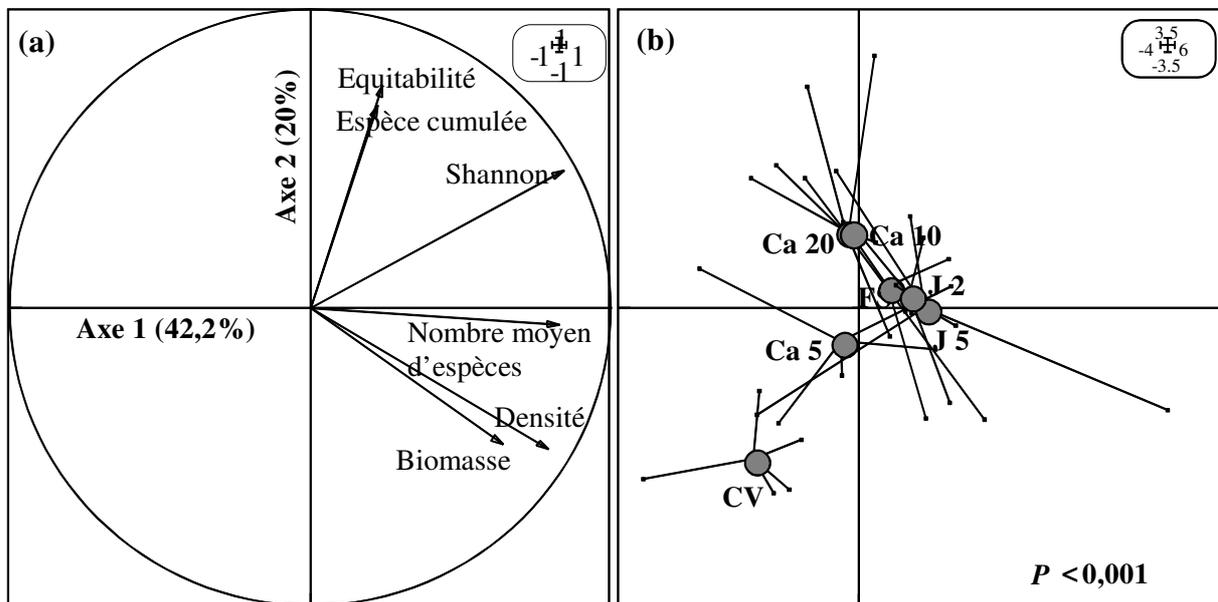


Figure 28 : Analyse en Composantes principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "Djè Koffikro" : (a) cercle de corrélation des variables et (b) plan factoriel 1-2. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

Le premier axe revêt deux fois plus d'information que le second, alors l'essentiel des interprétations s'articulera autour de l'axe 1. Le cercle de corrélation révèle que toutes les variables sont positivement liées au premier axe. Cependant, les contributions relatives des variables à la formation du premier facteur de l'analyse, montrent que les variables densité, biomasse, nombre moyen d'espèces et indice de shannon sont les plus corrélées à l'axe.

La carte factorielle des relevés montre une discrimination des types d'usages des sols en trois groupes (Figure 28b) : le groupe constitué par le champ cultivé et la cacaoyère de 5 ans, le groupe formé par les cacaoyères de 10 et 20 ans et le troisième groupe représenté par la forêt et les jachères. L'axe 1 met en évidence de la gauche à la droite, un gradient d'intensification dans l'exploitation du sol et dans la simplification de la couverture végétale. Le test de permutation réalisé sur l'analyse montre qu'il y a une différence statistiquement significative ($p < 0,001$) entre ces types d'usage des sols.

La superposition du cercle de corrélation à la carte factorielle montre que le groupe formé la forêt et les jachères héberge des populations abondantes et le plus grand nombre moyen d'espèces.

- Site "N'Kroiêdjô"

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement pour 38 et 35,9% la variation totale ; ils contribuent donc pour 73,9% à la variabilité totale (Figure 29a). L'axe 1 du cercle de corrélation oppose la biomasse du côté négatif à l'indice de Shannon et l'équitabilité du côté positif. L'axe 2 est uniquement représenté sur son côté négatif par la densité et le nombre moyen d'espèces.

Une projection des types d'usage des sols dans le plan factoriel 1-2 révèle une discrimination significative (test de permutation, $p < 0,001$) en trois groupes (Figure 29b) : le groupe de la forêt secondaire et des jachères, le groupe constitué par les champs de vivriers et les cacaoyères de 5 et 10 ans et le troisième groupe représenté par les teckeraies et la cacaoyère de 20 ans.

IV.1.6. Analyse à l'échelle du paysage de l'impact de l'agriculture sur les peuplements

Pour réaliser cette étude, nous avons retenu les types d'usage des sols qui sont représentés dans tous les trois sites. Les téckeraies de 8 et 14 ans ne sont présentes que dans le site "N'Kroiêdjô", par conséquent elles ont été occultées de la présente étude.

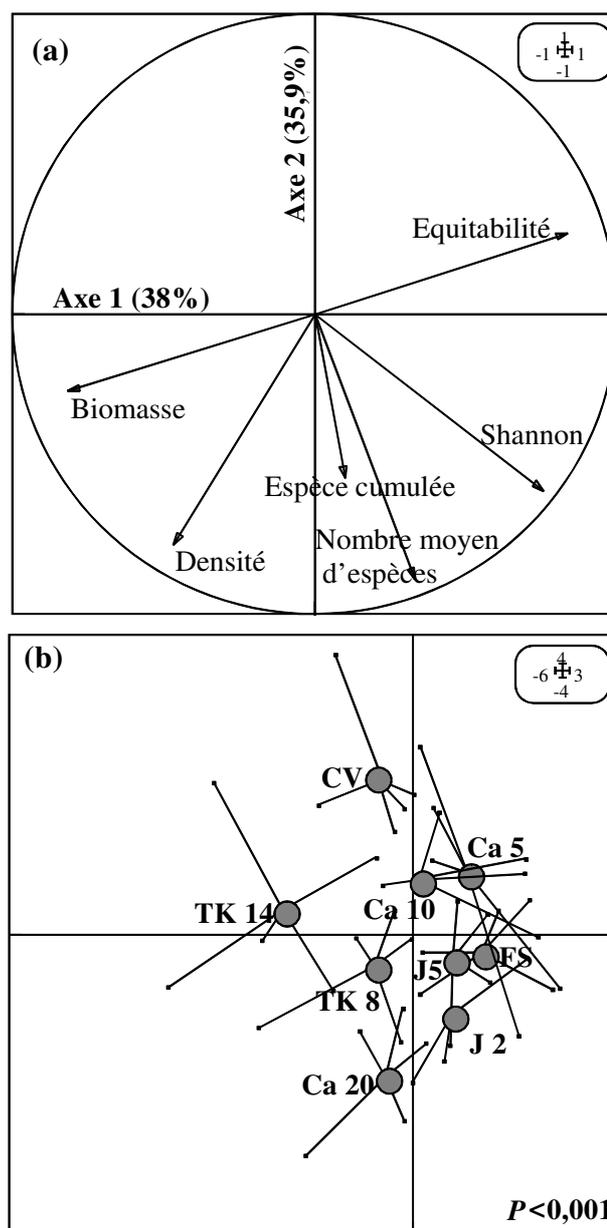


Figure 29 : Analyse en Composantes principales réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre de "N'Kroiêdjô" : (a) cercle de corrélation des variables et (b) plan factoriel 1-2. FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

IV.1.6.1. Abondance

La densité moyenne des vers de terre varie de manière significative d'un type d'usage des sols à un autre (Kruskall-Wallis, $p = 0,047$). La densité est plus élevée dans les jachères de 5 ans et de 2 ans, avec $119,82 \pm 30,22$ et $101,24 \pm 19,38$ ind.m⁻² respectivement. Dans les cacaoyères de 5 ans et dans les cultures vivrières, la densité est la plus faible de tous les milieux, avec $53,87 \pm 7,93$ et $63,82 \pm 14,98$ ind.m⁻². Les valeurs sont intermédiaires en forêts ($85,96 \pm 19,01$ ind.m⁻²) et dans les cacaoyères de 20 ans ($70,31 \pm 7,62$ ind.m⁻²) et 10 ans ($74,13 \pm 12,15$ ind.m⁻²) (Figure 30a).

Les forêts sont dominées par les espèces *S. zielae* (20,8%), *D. eburnea* (20,3%), *D. baeri* (17%) et *D. saliens* (16%) en terme de densité. Tandis que toutes les cacaoyères sont essentiellement dominées par *S. zielae* qui représente 48,4 ; 49 et 24,8% de la biomasse globale, respectivement dans les cacaoyères de 20 ; 10 et 5 ans. Le peuplement sous la jachère de 5 ans est dominé par *S. zielae* (42,3%), alors que quatre espèces dont *S. zielae* (26,1%), *D. baeri* (25,8%), *D. terraenigrae* (20,4%) et *M. omodeoi* (13,5%) se partagent l'essentiel de la densité sous la jachère de 2 ans. Quatre espèces de vers de terre à savoir *H. africanus* (26,2%), *S. zielae* (21,9%), *M. omodeoi* (20,7%) et *D. erhrhardti* (14,8%) dominent sous les cultures vivrières.

La biomasse globale des vers de terre montre des différences très fortes entre les différents types d'usage des sols considérés (Figure 30b). La biomasse la plus élevée s'observe dans les jachères de 2 ans ($38,9 \pm 6,73$ g.m⁻²) suivie par les jachères de 5 ans ($31,73 \pm 5,46$ g.m⁻²), les cultures vivrières ($19,36 \pm 2,82$ g.m⁻²), les cacaoyères âgées de 5 ans ($18,3 \pm 2,69$ g.m⁻²), les forêts ($16,72 \pm 4,06$ g.m⁻²) et les cacaoyères de 20 ans ($16,53 \pm 3,05$ g.m⁻²) et 10 ans ($12,34 \pm 2,13$ g.m⁻²). La variation de la biomasse observée sous l'ensemble des différents types d'usage des sols est significative (Kruskall-Wallis, $p = 0,031$).

Deux espèces à savoir *D. terraenigrae* (41,1%) et *D. baeri* (24,6%) dominent la biomasse globale en forêts. Trois espèces dont *M. omodeoi*, *D. terraenigrae* et *D. baeri* dominent la biomasse des vers dans les cacaoyères. De manière similaire à la forêt, *D. terraenigrae* et *D. baeri* dominent la biomasse dans les jachères de *Chromolaena odorata*. Les pourcentages sont respectivement de 44,1 et 24,3% dans la jachère de 5 ans, et de 43,6 et 22% dans la jachère de 2 ans. Les espèces *M. omodeoi* (48,3%), *H. africanus* (20,2%) et *D. terraenigrae* (10,9%) présentent une importante biomasse dans les champs de vivriers.

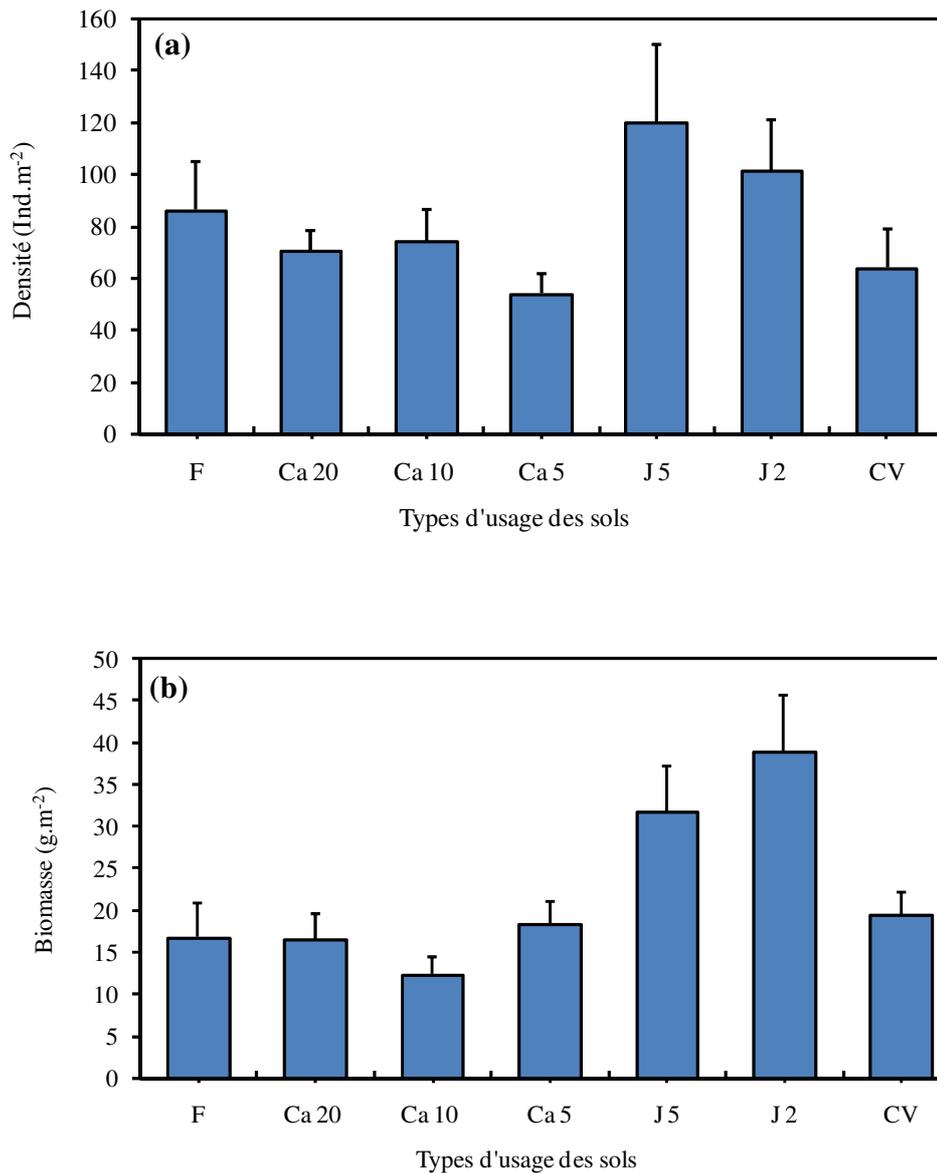


Figure 30 : Variation de l'abondance des peuplements de vers de terre à travers les différents types d'usages des sols : (a) Densité et (b) Biomasse globales. F : Forêts, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Cultures vivrières, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

IV.1.6.2. Diversité

La variation du nombre d'espèces cumulées est significative d'un milieu à un autre. Les forêts sont les écosystèmes les plus riches avec 17 espèces. Elles sont suivies par ordre décroissant, des cacaoyères de 20 et 5 ans (14 espèces), des jachères (13 espèces), et enfin les cultures vivrières (11 espèces) qui hébergent la plus petite richesse spécifique (Tableau XI).

Le nombre moyen d'espèces de vers de terre varie fortement entre les types d'usage des sols. Les cacaoyères de 5 ans ($7,47 \pm 0,36$ espèces.m⁻²) hébergent la plus grande richesse spécifique. Elle est suivie dans l'ordre de richesse décroissante par les forêts ($7,4 \pm 0,5$ espèces.m⁻²), les cacaoyères de 20 ans ($7,2 \pm 0,34$ espèces.m⁻²), les jachères de 5 ans ($7,07 \pm 0,6$ espèces.m⁻²), les cacaoyères de 10 ans ($6,13 \pm 0,38$ espèces.m⁻²), et les jachères de 2 ans ($6,13 \pm 0,47$ espèces.m⁻²). La plus faible valeur s'observe dans les champs de vivriers (Tableau XI).

Tableau XI : Paramètres de diversité des peuplements de vers de terre

Types d'usage des sol	E cuml	S	H'	E
F	17 c	7,4(0,05) bc	2,34(0,08) c	0,83(0,02) a
Ca20	14 b	7,2(0,34) bc	2,01(0,1) a	0,71(0,03) a
Ca10	10 a	6,13(0,38) ab	1,88(0,13) a	0,72(0,04) a
Ca5	14 b	7,47(0,36) c	2,17(0,07) ac	0,8(0,02) a
J5	13 b	7,07(0,6) abc	2,06(0,13) ac	0,78(0,04) a
J2	13 b	6,13(0,47) abc	2,04(0,13) ac	0,79(0,02) a
CV	11 a	5,67(0,53) a	1,79(0,14) a	0,75(0,04) a
<i>p</i> (Anova 1)	<0,001	0,0477	0,003	ns

F : Forêts, Ca : Cacaoyères, J : Jachères, CV : Cultures vivrières, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5% ; ns : différence non significative ; E cum : richesse cumulée, S : nombre moyen d'espèces ; H' : indice de Shannon ; E : équitabilité.

L'indice de diversité de Shannon diffère significativement d'un type d'usage des sols à un autre à l'échelle du paysage de Goulikao. Les écosystèmes les plus diversifiés sont les forêts ($2,34 \pm 0,08$), les cacaoyères de 5 ans ($2,17 \pm 0,07$) et les jachères de 5 ans ($2,06 \pm 0,13$) et 2 ans ($2,04 \pm 0,13$). L'indice de Shannon baisse par la suite dans les cacaoyères de 20 ans et 10 ans. Les cultures vivrières présentent la plus faible valeur d'indice de diversité de Shannon (Tableau XI).

Contrairement à l'indice de Shannon, l'équitabilité ne varie pas de manière significative entre les 7 différents types d'usage des sols. Toutefois, il y a une très forte tendance à la répartition équitable ($E > 0,70$) des effectifs entre les espèces dans tous les milieux (Tableau XI).

IV.2.6.3. Facteurs à l'origine de la variation des peuplements

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement pour 42 et 32% la variation totale ; ils contribuent donc pour 74% à l'inertie totale (Figure 31a). Le premier axe du cercle de corrélation révèle sur la base de la contribution relation que seuls les paramètres de l'abondance (densité et biomasse) sont fortement et positivement liés à l'axe. Une lecture suivant le deuxième axe montre que deux paramètres de la diversité à savoir shannon et équitabilité sont positivement liés à cet axe.

Une projection des types d'usage des sols dans le plan factoriel 1-2 révèle une discrimination significative (test de permutation, $p < 0,001$) en trois groupes (Figure 31b) : le groupe des forêts, le groupe constitué par les jachères de *C. odorata* et le troisième groupe représenté par les cacaoyères et les cultures vivrières.

Les forêts sont caractérisées par une plus grande diversité de vers de terre (Shannon, équitabilité), tandis que les jachères par une importante densité et biomasse.

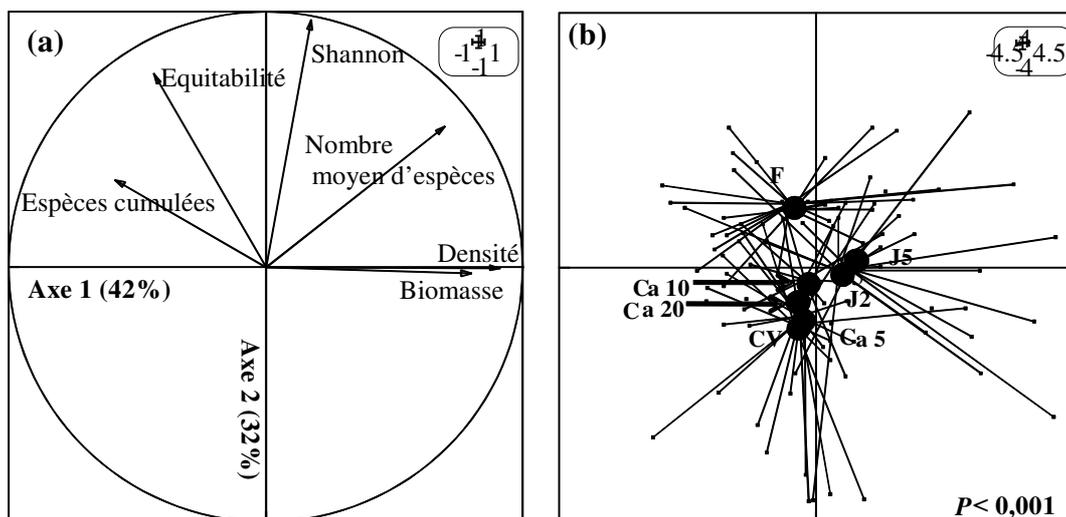


Figure 31 : ACP réalisée sur les paramètres des peuplements des vers de terre : (a) cercle de corrélation des variables et (b) plan factoriel 1-2. F : Forêts, Ca : Cacaoyères, J : Jachères, CV : Cultures vivrières, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

IV.1.7. Discussion

IV.1.7.1. Variations de l'abondance et de la diversité des vers de terre

La pratique de cultures vivrière se traduit par une simplification de la composition spécifique des vers de terre. Les parcelles de vivriers ont un peuplement bien différent des milieux non soumis aux perturbations d'origine anthropique ; elles sont faiblement abondantes (64 ind.m⁻² en moyenne) et présentent un peuplement peu diversifié (entre 3,8 et 7,8 espèces.m⁻²) où dominent principalement les espèces endogées comme *Stuhlmannia zielae*, *Millsonia omodeoi* et *Hyperiodrilus africanus*. Ces résultats corroborent plusieurs études antérieures réalisées en régions tropicales (Decaëns *et al.*, 2003 ; Dlamini & Haynes, 2004 ; Rossi & Blanchart, 2005 ; Mathieu *et al.*, 2005 ; Rossi *et al.*, 2010 ; Rosas-Medina *et al.*, 2010). En effet, le changement des conditions micro-climatiques (température, humidité du sol) lors du défrichement et de la mise à feu des forêts constitue l'un des facteurs responsable de cette diminution d'abondance et de diversité. Au cours du brulis, la température à la surface du sol excédant 400°C (Gimeno-Garcia *et al.*, 2004) a un effet néfaste sur la dynamique des espèces de vers épigées. Elle peut causer la mort des organismes épigés moins mobiles et des endogés de faible profondeur. Aussi, le feu affecte indirectement la faune du sol à travers la destruction des micro-habitats tels que les bois morts et les feuilles de la litière, servant de ressource trophique (Curry, 2004 ; Mathieu *et al.*, 2005). Hormis le feu, le labour du sol est l'une des pratiques agricoles les plus néfastes qui affectent directement la densité, mais également la composition et la diversité des communautés des vers (Eriksen-Hamel *et al.*, 2009 ; Simonsen *et al.*, 2010). Les différentes catégories des vers ne sont pas affectées de la même manière. Les épigés et les anéciques sont les plus touchés par cette pratique car vivant dans la couche supérieure du sol, ils subissent des dommages mécaniques (blessures, coupures), sont plus exposés aux prédateurs et aux phénomènes de dessiccation dû au retournement du sol (Chan, 2001).

L'impact de la cacaoculture sur les peuplements de vers de terre diffère d'un site de production à un autre. La cacaoculture induit un effet dépressif sur l'abondance et la diversité des vers dans le site Petit Bouaké. Pourtant les résultats obtenus sur les sites "Djè Koffikro" et "N'Kroiêdjô" révèlent respectivement un impact dépressif et positif sur la biomasse et l'abondance. Le pattern obtenu sur les sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro" semble être imputable aux pratiques agricoles telles que les traitements des pieds de cacaoyers aux insecticides et fongicides. Ces produits phytosanitaires sont connus pour avoir un effet néfaste sur les populations de vers de terre (Cook & Swait,

1975). En effet, une étude réalisée par Norgrove *et al.* (2009) dans la région du sud du Cameroun a fait observer que les populations de vers diminuaient au fur et à mesure que l'intensité d'application du fongicide Ridomil^R augmentait dans une cacaoyère de 35 ans. Le gain d'abondance observé sur le site "N'Kroiédjô" serait gouverné entre-autre par la qualité chimique des sols sous cacaoyers : une bonne teneur en matière organique servant de source de nourriture pour les vers.

Les résultats montrent que l'abondance et la diversité des vers de terre sont plus importantes dans les jachères de *C. odorata* que dans les champs cultivés. En effet, la jachère est une phase de restauration d'un écosystème dont l'état final doit procurer des conditions de fertilité renouvelées pour la culture suivante. Elle regorge des éléments nutritifs plus abondants, plus disponibles et plus accessibles aux organismes du sol (Manlay *et al.*, 2002). L'abondance et la diversité élevées en jachère seraient dues à l'effet conjugué de la composition des résidus de récoltes et la qualité physique du sol (Dharmakeerthi *et al.*, 2004). Les travaux de certains auteurs (Mboukou-Kimbatsa *et al.*, 2007 ; Koné, 2009) ont montré que la litière de feuilles et les racines de l'espèce *Chromolaena odorata* sont riches en azote, avec une teneur faible en lignine; ce qui permet leur décomposition rapide. La couverture du sol par la litière maintient la température basse à la surface du sol (création de microclimat clément) et constitue une source de diversification des micro-habitats pour la faune du sol (Doblas-Miranda *et al.*, 2009 ; Tondoh *et al.*, 2013).

Par ailleurs, excepté le site "N'Kroiédjô" où l'effet « âge de la jachère » est nettement mis en évidence, aucune tendance nette n'est clairement observée sur les deux autres sites. En effet, l'abondance et la diversité des vers du site N'Kroiédjô diminuent avec l'âge de la jachère comme déjà rapportée par Thomas *et al.* (2004). Ces auteurs ont étudié la macrofaune aux différentes étapes de la jachère et ont conclu que les peuplements de macro-invertébrés augmentent dans les premières années (2 à 3 ans) de jachère puis diminuent par la suite. La reconstitution d'un couvert végétal hétérogène pendant la mise en jachère pourrait expliquer l'augmentation de la diversité au cours des premières années. La diminution observée dans la jachère de 5 ans pourrait être liée à la baisse de la qualité des litières de *C. odorata* à ce stade de développement, car selon Slaats (1996), les teneurs en azote, phosphore et bases sont plus faibles dans les litières de *C. odorata* de 5 ans que dans celle de 2 ans.

Contrairement à la diversité, l'abondance globale des vers augmente dans les plantations de *Tectonia grandis*. L'augmentation de l'abondance dans les reboisements

serait due à une expansion des populations des endogés *Millsonia omodeoi*, *Dichogaster terraenigrae* et *Stuhlmannia zielae*. La faible diversité des vers de terre dans les reboisements pourrait s'expliquer par la monospécificité de la litière de feuilles sus-jacente qui restreindrait la disponibilité de la nourriture pour les vers et la mauvaise qualité de la litière de teck.

IV.1.7.2. Facteurs de variation des peuplements des vers de terre

Les régressions multiples réalisées entre la diversité floristique et les peuplements des vers de terre montrent qu'à l'exception du site "N'Kroiêdjô", il existe une corrélation positive entre ces deux compartiments. Certes, les coefficients de régression ne sont pas très élevés, mais les analyses de significativité révèlent que ces corrélations sont significatives. La densité et la diversité (nombre d'espèces et indice de Shannon) des vers de terre augmentent avec la richesse floristique sur le site "Petit Bouaké", tandis que seule la densité des vers est positivement corrélée à la diversité floristique sur le site "Djè Koffikro". En effet, il existe une corrélation positive entre la diversité biologique de la végétation épigée et celle des vers endogés qui constituent deux compartiments en perpétuelle interaction. Les vers de terre, les termites et les fourmis communément désignés sous le terme « d'ingénieurs de l'écosystème » sont susceptibles de stimuler la croissance et la diversification de la végétation sus-jacente par rétroaction positive, et vis versa (Jouquet *et al.*, 2006 ; Mathieu *et al.*, 2009). Cette assertion est soutenue par l'hypothèse de la diversité emboîtée (Van der Putten, 2003 ; Wardle *et al.*, 2004, Doblus-Miranda *et al.*, 2009) qui stipule que la couverture végétale régule directement la structure et la communauté de la biodiversité endogée à travers la production et la qualité de la litière, et le maintien de condition d'humidité viable. L'augmentation de la diversité végétale induit une diversification des niches écologiques des organismes sous jacents, et par conséquent une augmentation de la biodiversité endogée.

L'analyse multivariée des paramètres des peuplements des vers sur chaque site d'étude montre qu'il y a des différences significatives entre les groupes des types d'usage des sols étudiés qui seraient liées principalement à l'effet de l'utilisation du sol sur les paramètres des peuplements. La mise en culture des forêts entraîne une simplification de la diversité végétale et d'habitats, qui entraîne à son tour une modification de la composition des peuplements de vers de terre. Excepté le site "N'Kroiêdjô" où la ségrégation n'est pas nettement dégagée, il s'établit généralement une ségrégation écosystèmes naturels – écosystèmes en reconstitution – écosystèmes anthropisés dans

laquelle l'abondance et la diversité des peuplements de vers de terre sont progressivement modifiées.

IV.1.7.3. Analyse scalaire de l'impact de la déforestation sur les peuplements de vers de terre

La gestion de la biodiversité dans un contexte d'intensification agricole à l'échelle du paysage est devenue l'un des défis pour les écologues (McIntyre & Lavorel, 2007 ; Henle *et al.*, 2008 ; Prober & Smith, 2009) en ce sens que ce niveau d'étude permet une appréciation plus pertinente et réaliste de l'impact de l'agriculture sur la macrofaune du sol (Rossi *et al.*, 2010). Les résultats obtenus au niveau du paysage viennent conforter ceux observés à l'échelle de la parcelle ; l'anthropisation des forêts induit une diminution de la densité et de la diversité des vers de terre. En outre, la mise en culture des forêts entraîne la modification de la composition des peuplements de vers de terre se traduisant par la nette ségrégation écosystèmes naturels – écosystèmes en reconstitution – écosystèmes anthropisés. En effet, le fait que la diversité des vers de terre soit négativement influencée par la diversité en habitats (diversité en types d'utilisation du sol ici) est difficile à interpréter. D'un point de vue théorique, plus la diversité en habitats est élevée, plus le milieu peut abriter d'espèces, du fait de la plus grande variété d'habitats. Or nos résultats ne confortent pas cette théorie. L'explication pourrait être que la diversité en type d'occupation du sol traduirait dans une certaine mesure le degré d'anthropisation, et donc de perturbation, du milieu. En effet, dans ce paysage, seules les forêts peuvent être considérées comme les milieux originels. Les autres types de couverture végétales ont été créés par l'homme, et par conséquent, un milieu avec de nombreux types d'occupation du sol est nécessairement très anthropisé.

IV.1.8. Conclusion partielle

Notre hypothèse de départ est confirmée, les résultats montrent que la mise en culture de la forêt, transforme radicalement le peuplement des vers de terre, et ce quelle que soit l'échelle d'étude considérée. La diversité et l'abondance des vers de terre sont réduites de manière très importante dans les cultures vivrières. L'exploitation des terres en culture de cacaoyers ne fait que conforter cette tendance pour ce qui concerne la biomasse des vers sur les sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro". Dans une optique de restauration des espèces, la pratique de la jachère apparaît donc comme une alternative prometteuse pour les peuplements des vers. Les jachères offrent des conditions favorables pour la croissance des vers de terre et peuvent ainsi jouer un rôle important dans la

conservation de ces organismes. Les parcelles abandonnées sont très vite récolonisées par de nombreuses espèces faunistiques, et tendent à présenter des peuplements de vers relativement similaires à ceux de la forêt, tout au moins en termes de composition spécifique.

IV.2. RELATION ENTRE LES PEUPELEMENTS DE VERS DE TERRE ET LES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX DU SOL

IV.2.1. IMPACT DE LA MISE EN CULTURE DES FORÊTS SUR LA QUALITE MORPHO-PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS

IV.2.1.1. Analyses de la morphologie des sols

- Site Petit Bouaké

Les types d'usage des sols du site "Petit Bouaké" présentent une variabilité de constituants dans les cinq premiers centimètres du sol (Figure 32). Le sol de forêt est dominé par les racines, les agrégats physiques de petites tailles et la litière. Une densité de macro-invertébrés (fourmis, termites, vers de terre...) de l'ordre de $68 \pm 10,2 \text{ ind.m}^{-2}$ a été observée. Les agrégats biogéniques (surtout les turricules) y figurent en nombres très infimes par comparaison aux agrégats physiques. Par ailleurs, la forêt est le type d'usage des sols qui contient la plus grande quantité de graviers, de morceaux de bois et de racines (Anova 1, $p < 0,001$, $p < 0,001$ et $p = 0,032$, respectivement).

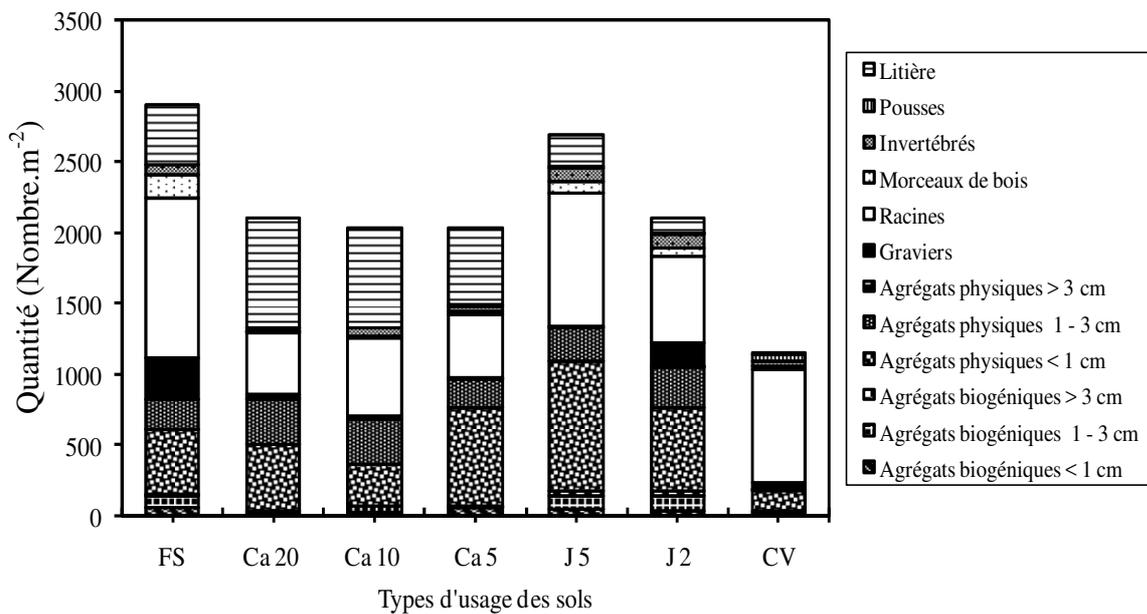


Figure 32 : Morphologie des sols du site "Petit Bouaké" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage. < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

Les cacaoyères sont caractérisées par une importante litière dont la quantité croît avec l'âge de la plantation (entre $772 \pm 104,04$ et $548 \pm 79,15$ morceaux de feuille au mètre carré). La cacaoyère de 20 ans a la plus grande couverture de litière (Anova 1, $p < 0,001$). L'on observe ensuite des agrégats physiques surtout représentés par les agrégats de petite taille et les racines des plantes. Les invertébrés et les structures biogéniques en petit nombre ont été récoltés dans les cacaoyères de 10 et 5 ans.

Les cinq premiers centimètres du sol sous les jachères de *C. odorata* sont dominés par les racines et les agrégats physiques de petites tailles. La jachère de 2 ans contient le plus grand nombre d'agrégats biogéniques de taille moyenne et d'invertébrés (Anova 1, $p = 0,004$ et $p < 0,001$), elle est également le second milieu à contenir une importante quantité de gravier après la forêt.

Le sol sous culture de maïs est dominé par les racines et pratiquement dépourvu de litière ; il a la plus petite quantité de litière (8 ± 8 morceaux de feuilles au mètre carré).

- Site "Djè Koffikro"

La morphologie dans les 5 cm supérieurs du sol de forêt est caractérisée par la prédominance de racines, d'agrégats physiques de petite taille et de litière (Figure 33). Avec une densité de macro-invertébrés de $80 \pm 31,6$ ind.m⁻², la forêt occupe le second rang après la jachère de 2 ans. La forêt est le type d'usage des sols le plus riche en racine (Anova 1, $p < 0,001$) sur le site "Djè Koffikro".

Les cacaoyères sont dominées par la litière, les racines et les agrégats physiques de taille moyenne et petite. La cacaoyère de 20 ans a la plus grande couverture de litière (Anova 1, $p < 0,001$) et le plus grand nombre d'agrégats physiques de petite taille (Anova 1, $p = 0,01$). La cacaoyère de 10 ans affiche d'importants nombres de gravier et d'agrégats biogéniques, particulièrement les agrégats biogéniques de taille moyenne et petite. La plus jeune cacaoyère est caractérisée par la plus grande quantité d'agrégats physiques de taille moyenne (Anova 1, $p < 0,001$). Contrairement à la cacaoyère la plus âgée qui est dépourvue d'organismes, la strate 0-5 cm des cacaoyères de 10 et 5 ans héberge une densité considérable de macro-invertébrés ($64 \pm 25,6$ et 56 ± 16 ind.m⁻², respectivement pour les plantations de 10 et 5 ans) (Figure 33).

La strate de la jachère de 5 ans est dominée par les agrégats physiques de tailles moyenne et petite, celle de la jachère 2 ans est dominée par les racines. La jachère de 2 ans héberge les plus grandes densités de macro-invertébrés (Anova 1, $p = 0,007$) et de morceaux de bois (Anova 1, $p < 0,001$) (Figure 33).

Le sol sous culture vivrière est dominé par les racines et possède la plus petite quantité de litière (Figure 33).

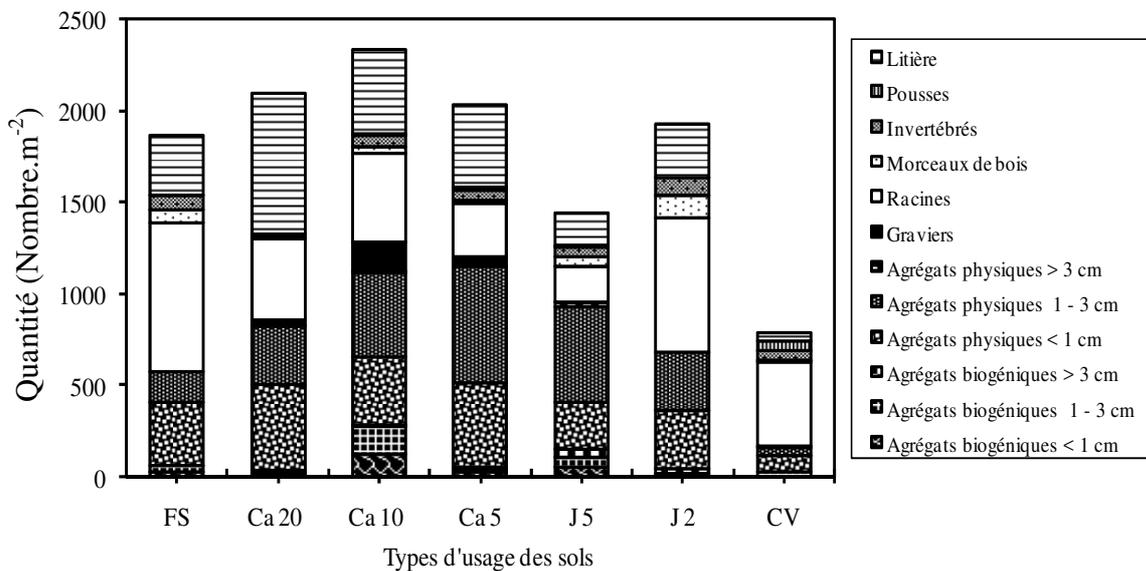


Figure 33: Morphologie des sols du site "Djè Koffikro" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

- Site "N'Kroiêdjô"

Le profil du sol de la forêt de la Téné est dominé par les racines des végétaux et les agrégats physiques de petites tailles dans les cinq premiers centimètres. Ce sol est caractérisé par des plus importantes quantités de racines et de graviers (Anova 1, $p < 0,001$ et $p < 0,001$, respectivement) par comparaison aux autres types d'usage des sols du site (Figure 34).

La litière et les agrégats physiques de petites tailles l'emportent sous les teckeraies. La teckeraie de 14 ans affiche les plus grandes densités de macro-invertébrés et de morceaux de bois morts (Anova 1, $p = 0,018$ et $p = 0,038$, respectivement) (Figure 34).

Les cacaoyères sont caractérisées par des importantes proportions de litière, racines et agrégats physiques de taille moyenne et petites. La plus jeune cacaoyère affiche les plus grandes quantités de litière et de petits agrégats physiques (Anova 1, $p < 0,001$ et $p < 0,001$, respectivement) (Figure 34).

Les jachères de *C. odorata* sont dominées par la litière, les racines et les agrégats physiques de taille moyenne (Figure 34).

Le sol sous la culture vivrière affiche une grande proportion de racine suivie par les agrégats physiques de petite taille. On observe cette fois-ci une présence de litière en surface (Figure 34).

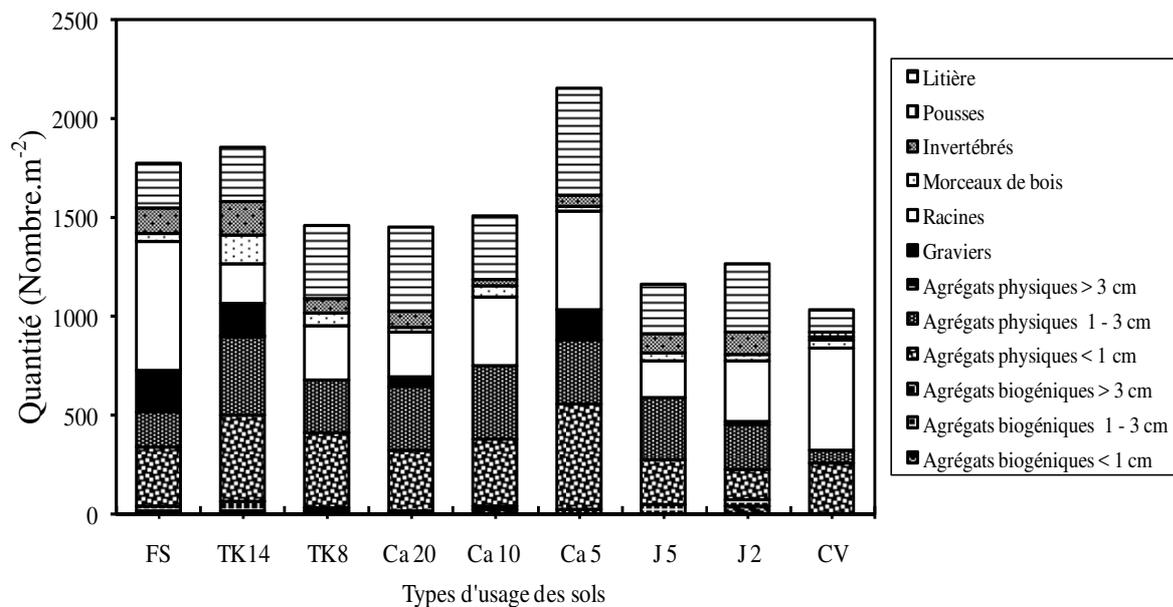


Figure 34 : Morphologie des sols du site "N'Kroiêdjô" : quantité des agrégats de diverses origines et autres composantes des cinq premiers centimètres du sol des différents types d'usage des sols. FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

IV.2.1.2. Caractéristiques physiques des sols

IV.2.1.2.1. Résistance à la pénétration

La figure 35a montre que la résistance à la pénétration varie significativement en fonction des types d'usage des sols dans le site Petit Bouaké (Anova 1, $p < 0,001$ pour chacune des strates). En générale, les valeurs sont faibles dans l'horizon de surface (0-10 cm) et augmentent dans l'horizon 10-20 cm du sol. Sur la strate 0-10 cm, la parcelle de maïs ($114,1 \pm 9,5$ kPa) et la cacaoyère de 5 ans ($150,2 \pm 11,7$ kPa) présentent les plus faibles valeurs de résistance à la pénétration, tandis que les sols des cacaoyères de 20 et 10 ans affichent les plus fortes valeurs ($352,2 \pm 26,4$ kPa et $333 \pm 28,8$ kPa,

respectivement). La forêt et les jachères rurales ont des valeurs intermédiaires. Sur la strate 10-20 cm du sol, ce sont les sols sous jachères (J2 : $690,6 \pm 98,7$ kPa ; J5 : $650,2 \pm 13,3$ kPa) et la forêt ($639,1 \pm 57,9$ kPa) qui présentent les plus grandes valeurs de résistance à la pénétration, contrairement à la culture vivrière ($215,2 \pm 30,6$ kPa) et la cacaoyère de 5 ans ($261,1 \pm 38,8$ kPa). Les cacaoyères de 20 et 10 ans ont des valeurs intermédiaires.

Sur le site Djè Koffikro, la résistance à la pénétration dans la strate supérieure du sol varie de $23,7 \pm 10,6$ kPa en culture à $288,7 \pm 129,1$ kPa en forêt. Dans la strate profonde, la valeur la plus élevée s'observe toujours en forêt ($602,8 \pm 269,6$ kPa) alors que les plus faibles valeurs s'observent dans la cacaoyère de 20 ans ($62,9 \pm 28,1$ kPa) et la jachère de 2 ans ($95,2 \pm 42,6$ kPa) (Figure 35b). Ces variations entre les différents types d'usage des sols sont significatives (Anova 1, $p < 0,001$ pour chacune des strates 0-10 et 10-20 cm). Le sol est beaucoup plus compact dans l'horizon 10-20 cm que l'horizon 0-10 cm.

La résistance du sol à la pénétration varie significativement en fonction des différents types d'usage des sols dans le site N'Kroiêdjô, quelque soit la strate du sol considérée (Anova 1, $p < 0,001$). Pour un type d'usage des sols considéré, la compaction du sol augmente avec la profondeur (Figure 35c). Sur l'horizon 0-10, la jachère de 5 ans ($1310,6 \pm 86$ kPa) et la teckeraie de 8 ans ($970,8 \pm 46,3$ kPa) ont les plus fortes valeurs de résistance à la pénétration, alors que le sol sous culture ($66,7 \pm 4$ kPa) et la jachère rurale de 2 ans ($81,2 \pm 4$ kPa) affichent les plus faibles valeurs. Les autres milieux ont des valeurs intermédiaires. Sur la strate 10-20 cm du sol, ce sont les sols sous teckeraie de 8 ans ($4101,1 \pm 69,4$ kPa), cacaoyère de 5 ans ($2476,6 \pm 289,4$ kPa), jachère de 5 ans ($1831,7 \pm 25,1$ kPa) et forêt ($1176,2 \pm 160,5$ kPa) qui présentent les plus grandes valeurs de résistance à la pénétration.

On remarque cependant que le sol de N'Kroiêdjô est plus compact (entre 496 et 1343 kPa en moyenne) que ceux des sites de Petit Bouaké et Djè Koffikro.

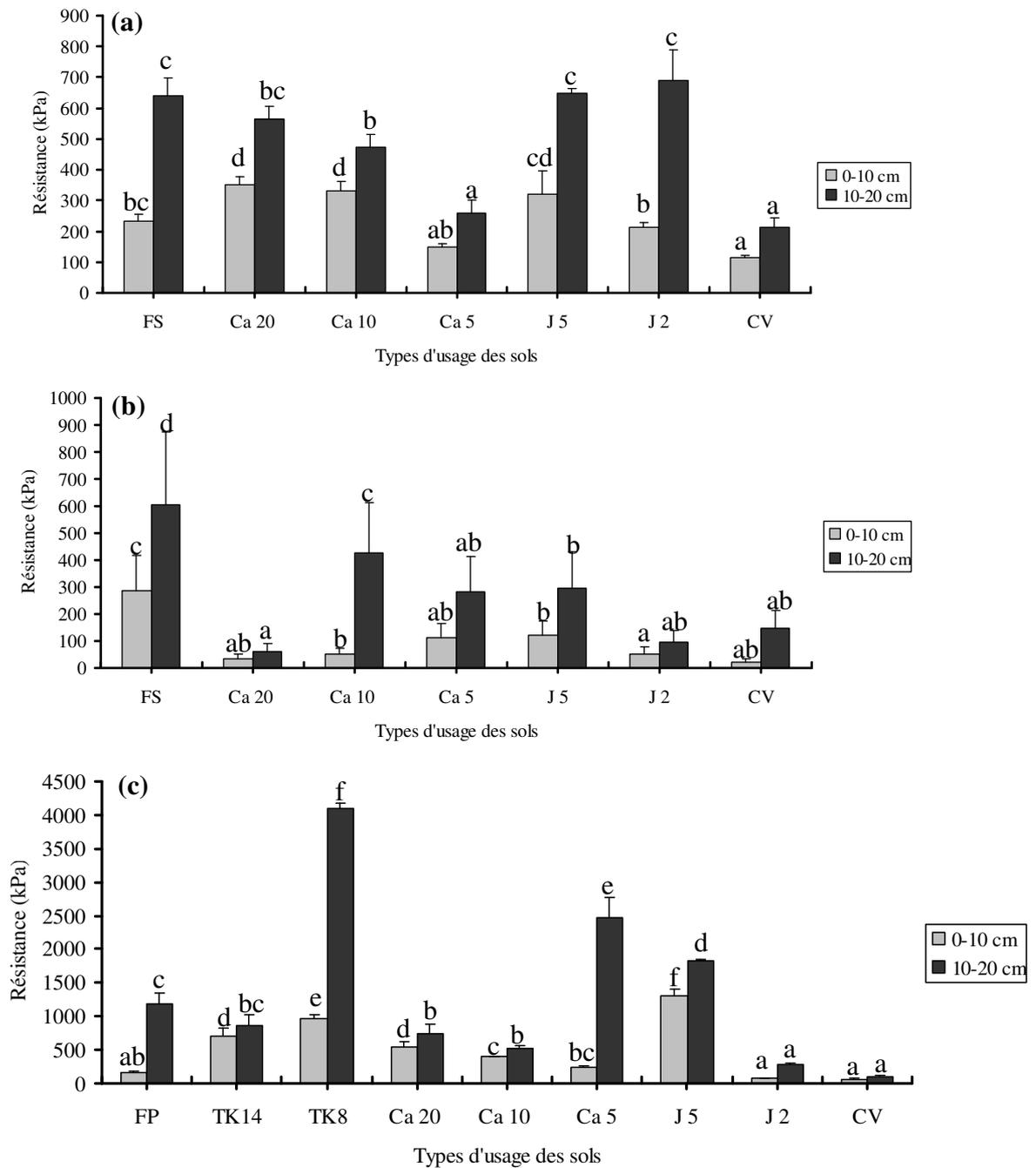


Figure 35 : Variation de la résistance du sol à la pénétration à travers les différents types d'usage des sols. (a) site "Petit Bouaké", (b) Site "Djè Koffikro", (c) site "N’Kroiêdjô". FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Pour la même strate, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

IV.2.1.2.2. Teneur en eau

Sur le site "Petit Bouaké", la teneur en eau de la strate 0-10 cm est la plus élevée dans les cacaoyères de 20 et 10 ans et la jachère de 5 ans, mais faible dans la culture vivrière. La même tendance s'observe dans l'horizon 10-20 cm (Tableau XII).

Tableau XII: Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "Petit Bouaké"

Types d'usage des sols	Humidité (%)	
	0-10 cm	10-20 cm
Forêt secondaire	17,7 (0,8) bc	13,6 (0,9) ab
Cacaoyère de 20 ans	21,2 (1,9) d	18,3 (0,3) cd
Cacaoyère de 10 ans	21,5 (1,3) d	20,3 (0,7) d
Cacaoyère de 5 ans	16 (1,2) ab	14,7 (0,8) b
Jachère de 5 ans	20,7 (0,4) cd	17,6 (1) c
Jachère de 2 ans	16,8 (0,6) ab	12,9 (1,3) ab
Culture Vivrière	13,6 (0,9) a	12,1 (0,8) a
<i>p</i> (Anova 1)	< 0,001	< 0,001

Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards.

La teneur en eau des sols sur le site "Djè Koffikro" ne varie pas d'une parcelle à une autre quelquesoit la strate considérée en dépit du sol sous culture vivrière qui semble être le plus humide (Tableau XIII).

Tableau XIII: Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "Djè Koffikro"

Types d'usage des sols	Humidité (%)	
	0-10 cm	10-20 cm
Forêt secondaire	13,2 (1,8) a	9,9 (0,3) a
Cacaoyère de 20 ans	13,8 (0,3) a	13,6 (0,4) a
Cacaoyère de 10 ans	17 (1) a	12,9 (2,1) a
Cacaoyère de 5 ans	15,9 (1,7) a	11,4 (1) a
Jachère de 5 ans	15,5 (1,7) a	14,3 (1,4) a
Jachère de 2 ans	16,9 (0,2) a	13 (0,3) a
Culture Vivrière	19,2 (2,8) a	14,7 (0,5) a
<i>p</i> (Anova 1)	ns	ns

A N’Kroiêdjô, la teneur en eau du sol varie significativement entre les 9 types d’usage des sols pour chaque strate considéré (Tableau XIV). Le sol est plus humide sous la plus jeune cacaoyère, tandis que celui de la culture vivrière est le moins humide.

Tableau XIV: Evolution de la teneur en eau des parcelles du site "N’Kroiêdjô"

Types d’usage des sols	Humidité (%)	
	0-10 cm	10-20 cm
Forêt secondaire	19,4 (1,3) f	7,2 (1,1) a
Teckeraie de 14 ans	10,6 (0,7) ab	8,4 (0,8) ab
Teckeraie de 8 ans	13,9 (0,7) cd	8,7 (1,4) ab
Cacaoyère de 20 ans	14,3 (1) d	14,7 (1,2) c
Cacaoyère de 10 ans	17,2 (0,9) ef	16 (0,6) c
Cacaoyère de 5 ans	23,7 (0,4) g	20,1 (1,8) d
Jachère de 5 ans	16,1 (1,2) de	16 (0,9) c
Jachère de 2 ans	11,3 (1,5) bc	11 (1,4) b
Culture Vivrière	8 (0,4) a	7 (0,3) a
<i>p</i> (Anova 1)	<0,001	<0,001

Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards.

Somme toute, la teneur en eau des sols de tous les types d’usage des sols est en générale faible ; la valeur moyenne ne dépasse jamais 30%.

IV.2.1.2.3. Densité apparente

La densité apparente varie en fonction des types d’usage des sols dans le site "Petit Bouaké" (Figure 36a). Toutefois, cette variation n’est significative (Anova 1, $p = 0,003$) que sur la strate superficielle (0-10 cm). Les valeurs de la densité apparente sont généralement faibles dans l’horizon de surface et augmentent dans l’horizon 10-20 cm du sol, de manière similaire à la résistance à la pénétration. Sur la strate 0-10 cm, la forêt ($1,31 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$) a la plus faible valeur de densité apparente, tandis que la cacaoyère de 5 ans affiche la plus grande valeur ($1,5 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$). Les cacaoyères de 20 et 10 ans ($1,36 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$), les jachères rurales de 5 ans ($1,4 \pm 0,01 \text{ g.cm}^{-3}$) et 2 ans ($1,37 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$), et la culture vivrière ($1,39 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$) ont des valeurs intermédiaires. Sur la strate 10-20 cm du sol, les valeurs varient entre $1,48 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$ en cacaoyère âgée de 10 ans et $1,57 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$ en jachère de 5 ans.

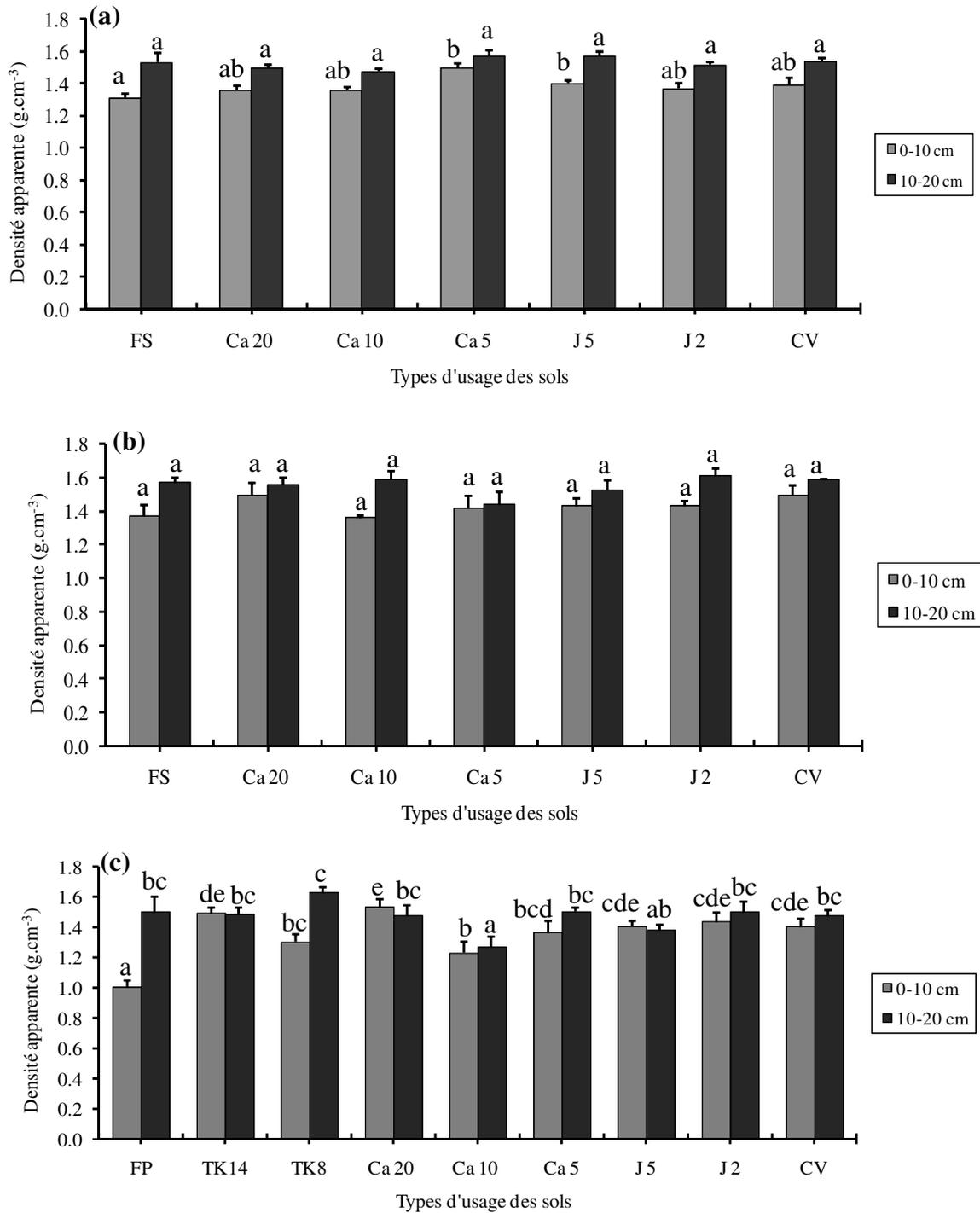


Figure 36 : Variation de la densité apparente à travers les différents types d'usage des sols. (a) site "Petit Bouaké", (b) Site "Djè Koffikro", (c) site "N'Kroiêdjô". FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Pour la même strate, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

Sur le site "Djè Koffikro", la variation de la densité apparente n'est pas significative quelque soit l'horizon considéré. Toutefois dans la strate supérieure du sol, la plus grande valeur s'observe dans la culture vivrière ($1,49 \pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$) et la cacaoyère de 20 ans ($1,49 \pm 0,08 \text{ g.cm}^{-3}$) (Figure 36b). Ces milieux sont suivis par ordre de densité décroissante par les jachères (J2 : $1,43 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$; J5 : $1,42 \pm 0,05 \text{ g.cm}^{-3}$), les cacaoyères (Ca5 : $1,41 \pm 0,08 \text{ g.cm}^{-3}$; Ca10 : $1,36 \pm 0,01 \text{ g.cm}^{-3}$) et la forêt ($1,36 \pm 0,07 \text{ g.cm}^{-3}$). Dans l'horizon 10-20 cm, les valeurs de densité apparente varient entre $1,43 \pm 0,08 \text{ g.cm}^{-3}$ en cacaoyère âgée de 5 ans et $1,61 \pm 0,05 \text{ g.cm}^{-3}$ en jachère de 2 ans.

La densité apparente varie significativement en fonction des différents types d'usage des sols dans le site "N'Kroiêdjô", quelque soit la strate considérée (Anova 1, $p < 0,001$ et $p = 0,03$, respectivement strate 0-10 cm et 10-20 cm). De manière générale, les valeurs augmentent avec la profondeur (Figure 36c). La cacaoyère de 20 ans ($1,53 \pm 0,06 \text{ g.cm}^{-3}$) et la teckeraie de 14 ans ($1,49 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$) ont les plus fortes valeurs sur l'horizon 0-10 cm, alors que les sols de forêt ($1 \pm 0,05 \text{ g.cm}^{-3}$) et de la cacaoyère de 10 ans ($1,23 \pm 0,07 \text{ g.cm}^{-3}$) affichent les plus faibles valeurs. Sur l'horizon 10-20 cm du sol, les plus grandes valeurs de densité apparente s'observent dans la teckeraie de 8 ans ($1,62 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$), la cacaoyère de 5 ans ($1,5 \pm 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$), la jachère de 2 ans ($1,5 \pm 0,07 \text{ g.cm}^{-3}$) et la forêt primaire ($1,5 \pm 0,10 \text{ g.cm}^{-3}$).

IV.2.1.3. Matière organique

IV.2.1.3.1. Carbone organique

Dans le site "Petit Bouaké" la teneur moyenne en carbone organique du sol varie entre $7,4 \pm 0,8 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le sol cultivé (culture vivrière) et $15,6 \pm 0,4 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le sol de la jachère à *C. odorata* de 2 ans, à "Djè Koffikro" entre $8,3 \pm 0,3 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la plantation de cacaoyers de 20 ans et $20,6 \pm 1,2 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la forêt. Dans le site "N'Kroiêdjô" la teneur minimale de carbone organique du sol est de $7 \pm 0,6 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la teckeraie de 8 ans tandis que la teneur maximale ($27,9 \pm 2,3 \text{ g.kg}^{-1}$) correspond au sol de la forêt secondaire (Tableau XV).

La teneur de carbone organique varie significativement (Anova 1, $p < 0,001$) d'un type d'usage à un autre sur chaque site d'étude. En générale, la quantité de carbone est plus faible dans les milieux anthropisés (cacaoyères, cultures vivrières). Elle augmente dans les jachères et montre les valeurs les plus fortes dans les forêts. En moyenne et par ordre croissant, le sol de "Petit Bouaké" ($11,56 \text{ g.kg}^{-1}$) est celui qui contient le moins de carbone suivi de "Djè Koffikro" ($12,37 \text{ g.kg}^{-1}$) et enfin de "N'Kroiêdjô" (14 g.kg^{-1}).

IV.2.1.3.2. Azote total

La teneur moyenne en azote total du sol varie entre $0,7 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ pour le sol de la cacaoyère de 5 ans et $1,7 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ pour la jachère de 2 ans dans le site "Petit Bouaké". Sur le site "Djè Koffikro" la teneur en azote total est de $0,7 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la cacaoyère de 20 ans et de $1,7 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la forêt, à "N'Kroiêdjô" entre $0,6 \pm 0,1 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la teckeraie de 8 ans et de $2,2 \pm 0,2 \text{ g.kg}^{-1}$ dans la forêt (Tableau XV).

La teneur en azote total varie de manière significative (Anova 1, $p < 0,001$) d'un agrosystème à un autre sur chaque site. Le site "Djè Koffikro" présente des teneurs moyennes en azote total relativement faibles ($1,11 \text{ g.kg}^{-1}$) par rapport aux sites "N'Kroiêdjô" ($1,17 \text{ g.kg}^{-1}$) et "Djè Koffikro" ($1,19 \text{ g.kg}^{-1}$).

IV.2.1.3.3. Rapport C/N

Le rapport C/N traduit le degré d'humification de la matière organique ; c'est un indicateur de la qualité de la matière organique présente dans le sol et de l'activité biologique potentielle (Lavelle & Spain, 2001). Tous les types d'usage des sols possèdent une relation $C/N < 14$ (Tableau XV). Toutefois, le plus petit ratio ($C/N < 12$) s'observe sur le site "Petit Bouaké".

IV.2.1.4. Caractéristiques chimiques

IV.2.1.4.1. Phosphore assimilable et pH_{eau}

Les sols étudiés présentent des valeurs de pH variant entre $5,5 \pm 0,1$ et $7,4 \pm 0,2$. Le sol est légèrement acide sur le site Petit Bouaké (pH moyen = 6,27) ; les valeurs de pH diffèrent d'une parcelle à une autre. Sur le site "Djè Koffikro", seul le sol de la cacaoyère de 5 ans présente un pH neutre. Les sols des 6 autres parcelles sont légèrement acides. Les sols sous la jachère de 5 ans, la culture vivrière et la teckeraie de 14 ans sont neutres, tandis que les sols des cacaoyères, jachère de 2 ans et la forêt sont légèrement acides. La teckeraie de 8 ans a un sol beaucoup plus acide (Tableau XVI).

Le phosphore est un élément majeur indispensable aux plantes car il entre dans la constitution de nombreux composés organiques et a un rôle fondamental dans la photosynthèse. La quantité de P assimilable mesurée dans les types d'usage des sols de notre étude varie entre $24,4 \pm 4,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ et $77,6 \pm 12,1 \text{ mg.kg}^{-1}$. Sur le site "Djè Koffikro", la teneur est plus élevée dans les cacaoyères, notamment dans la Cacaoyère de 10 ans ($77,6 \pm 12,1 \text{ mg.kg}^{-1}$). La plus faible teneur est observée dans la jachère de 5 ans ($30,6 \pm 5 \text{ mg.kg}^{-1}$). Les différents types d'usage des sols composant les sites "Petit Bouaké" et "N'Kroiêdjô" ont des teneurs semblables en P assimilable (Tableau XVI).

Tableau XV: Teneurs de sol (0-10 cm) en matière organique et rapport C/N des différents types d'usage des sols

TUS	Site "Petit Bouaké"			Site "Djè Koffikro"			Site "N'Kroiêdjô"		
	C organique (g.kg ⁻¹)	N total (g.kg ⁻¹)	C/N	C organique (g.kg ⁻¹)	N total (g.kg ⁻¹)	C/N	C organique (g.kg ⁻¹)	N total (g.kg ⁻¹)	C/N
F	12,4(0,6) bc	1,2(0,1) b	10,5(0,5) ab	20,6(1,2) c	1,7(0,1) c	12,1(1) a	27,9(2,3) f	2,2(0,2) e	12,2(0,6) bc
Ca20	12,5(1,1) bc	1,3(0,2) b	9,5(0,6) a	8,3(0,3) a	0,7(0,1) a	11,4(0,5) a	9,4(0,6) bc	0,7(0) bc	13(0,3) abc
Ca10	11,1(0,3) b	1,2(0) b	9,1(0,1) a	10,2(0,9) a	0,8(0) a	13(0,9) a	13,2(1,7) ab	1,4(0,2) ab	9,8(0,8) ab
Ca5	8(0,4) a	0,7(0,1) a	11,8(0,9) b	13,8(1) b	1,4(0,4) b	9,9(0,6) a	10,9(1) e	1(0,2) d	11,6(1,1) c
J5	13,9(0,5) cd	1,4(0) bc	9,7(0,1) a	14,7(1,7) b	1,4(0,2) bc	10,3(0,9) a	9(1) d	0,8(0,1) cd	11,3(0,9) bc
J2	15,6(0,4) d	1,7(0,1) c	9,3(0,3) a	9,2(0,2) a	0,9(0,1) a	10,2(0,6) a	21,9(0,9) abc	1,6(0,1) ab	13,3(0,1) bc
CV	7,4(0,8) a	0,8(0,1) a	10,2(0,9) a	9,8(1,2) a	0,9(0,1) a	10,4(0,9) a	16,4(1,2) a	1,3(0,1) a	12,9(0,4) bc
TK14							10,2(1,3) ab	0,9(0,1) ab	12(0,8) bc
TK8							7(0,6) cd	0,6(0,1) cd	12,1(0,4) a
<i>p</i> (Anova 1)	<0,001	<0,001	0,032	<0,001	<0,001	ns	<0,001	<0,001	0,028

TUS : types d'usage des sols, F: Forêt, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, TK : Teckeraie, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Pour le même site et le même élément, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5% ; ns : différence non significative.

Tableau XVI : pH et teneurs en P assimilable du sol (0-10 cm) des types d'usage des sols

TUS	Site "Petit Bouaké"		Site "Djè Koffikro"		Site "N'Kroiêdjô"	
	pH _{eau}	P (Olsen) (mg.kg ⁻¹)	pH _{eau}	P (Olsen) (mg.kg ⁻¹)	pH _{eau}	P (Olsen) (mg.kg ⁻¹)
F	6,1(0,1) a	45,8(4,2) a	6,2(0,1) a	36,4(3,6) ab	6,1(0,1) bdc	56(5,9) a
Ca20	6,4(0,4) a	42,4(3,6) a	6,3(0,2) a	62,6(6,9) cd	6(0,4) abc	51,8(13,6) a
Ca10	5,8(0,3) a	49(5,3) a	6,3(0,3) a	77,6(12,1) d	6(0,1) abc	56,4(17,9) a
Ca5	6,7(0,1) a	46,6(3,3) a	7,2(0,5) a	63,8(7,8) cd	6,6(0,3) cde	65,4(8,9) a
J5	6(0,1) a	54,4(5,3) a	6,8(0,3) a	30,6(5) a	7,1(0,2) ef	58(3,2) a
J2	6,5(0,1) a	43,4(5,2) a	6,4(0,1) a	45,2(11,1) ab	6,7(0,2) de	34,6(9,5) a
CV	6,4(0,1) a	50,8(9,4) a	6,3(0,3) a	55,8(7,3) cd	7,4(0,2) f	34,4(7,1) a
TK14					7,3(0,2) f	24,4(4,4) a
TK8					5,5(0,1) a	42,2(7,8) a
<i>p</i> (Anova 1)	ns	ns	ns	0,004	<0,001	ns

TUS : types d'usage des sols, F: Forêt, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, TK : Teckeraie, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Pour le même site et le même élément, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5% ; ns : différence non significative.

IV.2.1.4.2. Bases échangeables et capacité d'échange cationique (CEC).

- Site "Petit Bouaké"

La CEC renseigne sur la fertilité minérale potentielle du sol. La teneur en bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) varient significativement d'un type d'usage des sols à un autre sur le site "Petit Bouaké" (Tableau XVII). Les concentrations moyennes en Ca²⁺ varient de 1,15±0,05 à 2,01±0,43 cmol_c.kg⁻¹. Les plus faibles valeurs sont rencontrées dans la cacaoyère de 5 ans, la jeune jachère et la culture, elles sont intermédiaires dans la cacaoyère de 10 ans et la jachère de 5 ans, et atteignent les plus fortes concentrations dans la cacaoyère de 20 ans et la forêt. Les concentrations en Mg²⁺ sont faibles dans la forêt, la plantation de cacaoyers de 5 ans et la culture vivrière, et plus élevées dans les jachères et la cacaoyère de 20 ans. Les teneurs moyennes en K⁺ des sols échantillonnés varient entre 0,16±0,01 et 0,26±0 cmol_c.kg⁻¹. Les cacaoyères présentent les valeurs les plus faibles tandis que les fortes concentrations en K⁺ se trouvent aussi bien dans la forêt qu'en jachères. Les concentrations moyennes de Na⁺ dans les sols varient entre 0,05±0 cmol_c.kg⁻¹ dans la cacaoyère de 5 ans et 0,11±0,02 cmol_c.kg⁻¹ dans la jachère de 5 ans. La CEC renseigne sur la fertilité minérale potentielle du sol. Les teneurs de CEC de "Petit Bouaké" sont faibles dans la

cacaoyère de 5 ans et la culture vivrière, et élevées dans la forêt, la jachère de 5 ans et la cacaoyère de 10 ans.

Tableau XVII: Teneurs en bases échangeables et CEC des sols (0-10 cm) de "Petit Bouaké"

TUS	Bases échangeables et CEC (cmol _c .kg ⁻¹)				
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEC
FS	1,82(0,06) bc	0,17(0,03) d	0,26(0) d	0,06(0,01) ab	14,46(1,32) b
Ca20	2,01(0,43) c	0,51(0,05) cd	0,17(0,01) abc	0,07(0) ab	9,08(1,24) a
Ca10	1,42(0,29) abc	0,47(0,04) bc	0,16(0,01) ab	0,08(0,01) abc	10,13(0,94) a
Ca5	1,15(0,05) a	0,3(0,03) a	0,16(0,01) ab	0,05(0) a	8,29(0,32) a
J5	1,41(0,12) abc	0,5(0,02) cd	0,2(0,01) bc	0,11(0,02) c	12,74(0,39) b
J2	1,27(0,1) ab	0,44(0,03) bc	0,2(0,02) c	0,08(0,01) abc	9,74(0,71) a
CV	1,17(0,1) a	0,38(0,03) ab	0,18(0,01) abc	0,09(0,02) bc	8,34(0,21) a
<i>p</i> (Anova 1)	0,049	<0,001	<0,001	0,028	<0,001

TUS : types d'usage des sols, FS: Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Dans une même colonne, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

- Site "Djè Koffikro"

La teneur en éléments chimiques varie de manière significative entre les types d'usage des sols du site "Djè Koffikro" (Tableau XVIII). La plus petite valeur moyenne en Ca²⁺ est de 0,87±0,03 cmol_c.kg⁻¹ dans la culture vivrière et les plus fortes moyennes sont de 3,39±0,99 et 3,29±0,24 cmol_c.kg⁻¹, respectivement dans la cacaoyère de 5 ans et dans la forêt. Les concentrations en Mg²⁺ sont faibles dans la plantation de cacaoyers de 10 ans et la jachère de 2 ans, plus élevées dans la cacaoyère de 5 ans et la forêt, et intermédiaires dans la cacaoyère de 20 ans, la jachère de 5 ans et la culture vivrière. Les concentrations moyennes de K⁺ varient entre 0,43±0,01 et 0,67±0,06 cmol_c.kg⁻¹. La forêt secondaire possède la teneur en K⁺ la plus élevée. Cette teneur diminue dans la culture vivrière et les cacaoyères. Les concentrations moyennes de Na⁺ dans les sols de "Djè Koffikro" varient entre 0,03±0 cmol_c.kg⁻¹ dans la cacaoyère de 20 ans et 0,2±0,07 cmol_c.kg⁻¹ dans la jachère de 2 ans. Les teneurs de CEC relevées varient entre 7,06±0,44 et 12,63±0,16 cmol_c.kg⁻¹. La teneur en CEC, élevée en forêt, diminue dans les plantations de cacaoyers et la culture vivrière.

- Site "N'Kroiêdjô"

De manière similaire aux sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro", la concentration des bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) varient significativement d'un type d'usage des sols à un autre sur le site Site "N'Kroiêdjô" (Tableau XIX). Toutefois, la forêt constitue le seul type d'usage des sols qui possède les concentrations plus importantes en éléments chimiques. Les plus faibles concentrations en Ca^{2+} sont rencontrées dans les cacaoyères de 20 et 10 ans. Les concentrations en Mg^{2+} diminuent dans les reboisements de teck, les cacaoyères et les cultures vivrières, et subissent un recouvrement dans les jachères. La tendance observée avec Mg^{2+} est observée chez les autres éléments chimiques K^+ , Na^+ et CEC.

IV.2.1.5. Facteurs controlant la variation des caractéristiques des sols

- Caractéristiques physico-morphologiques

Les deux premiers axes de l'analyse multivariée (ACP) expliquent 28% de la variabilité totale du tableau de données. Le cercle de corrélation et l'étude des contributions absolues des variables à la formation des deux facteurs de l'analyse montrent que l'axe 1 (16,4%) oppose les sols riches en litière, en agrégats physiques de taille moyenne et caractérisés par une humidité élevée, du côté négatif aux sols caractérisés par de nombreuses pousses à la surface (Figure 37a). L'axe 2 (11,6%) traduit un gradient de compaction du sol.

La carte factorielle 1-2 des relevés (Figure 37b) montre une ségrégation significative ($p < 0,001$) le long de l'axe 1 entre le groupe des cacaoyères (à l'extrême gauche), celui formé par les jachères (au centre), le groupe des teckeraies et forêts (à droite) et le groupe des cultures vivrières (à l'extrême droite). Les cacaoyères sont riches en litière avec un sol beaucoup humide et en agrégats physiques de taille moyenne. Les cultures vivrières sont caractérisées par de nombreuses pousses. Les sols de jachères sont principalement riche en structures biogéniques tandis que ceux des téckéraies et forêts ont une forte activité biologique, une forte résistance à la pénétration dans la strate 0-10 cm et contiennent beaucoup de morceaux de bois. L'axe 1 traduit l'impact des types d'usage des sols sur les paramètres physico-morphologiques sus-cités.

Tableau XVIII: Teneurs en bases échangeables et CEC des sols (0-10 cm) de "Djè Koffikro"

TUS	CEC et bases échangeables (cmol _c .kg ⁻¹)				
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEC
FS	3,29(0,24) b	0,78(0,11) bc	0,67(0,06) c	0,05(0) ab	12,63(0,16) d
Ca20	1,12(0,14) a	0,45(0,04) ab	0,53(0,05) abc	0,03(0) a	10,05(0,7) bc
Ca10	1,61(0,25) a	0,38(0,03) a	0,43(0,01) a	0,09(0) ab	9,01(1,1) abc
Ca5	3,39(0,99) b	0,86(0,27) c	0,53(0,06) abc	0,11(0,01) abc	11,17(0,9) cd
J5	2,03(0,36) a	0,51(0,1) abc	0,62(0,08) bc	0,1(0,03) ab	9,84(0,71) bc
J2	1,02(0,13) a	0,37(0,01) a	0,45(0,01) a	0,2(0,07) c	8,48(0,3) ab
CV	0,87(0,03) a	0,45(0,12) ab	0,48(0,04) ab	0,13(0,01) bc	7,06(0,44) a
<i>p</i> (Anova 1)	<0,001	0,04	0,02	0,014	0,002

Tableau XIX: Teneurs en bases échangeables et CEC des sols (0-10 cm) de "N'Kroiêdjô"

TUS	CEC et bases échangeables (cmol _c .kg ⁻¹)				
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CEC
FS	4,56(0,87) c	0,93(0,13) d	0,51(0,05) b	0,13(0,01) b	16,64(1,43) e
TK14	4,25(0,87) bc	0,49(0,1) abc	0,05(0) a	0,06(0) a	5,92(0,52) a
TK8	2,87(0,4) ab	0,64(0,05) c	0,06(0,01) a	0,06(0) a	9,13(0,56) bc
Ca20	1,42(0,48) a	0,4(0,06) abc	0,44(0,02) b	0,13(0,01) b	9,69(0,26) c
Ca10	1,56(0,29) a	0,34(0,03) a	0,41(0,01) b	0,12(0,01) b	9,99(0,44) c
Ca5	2,42(0,55) a	0,65(0,04) c	0,48(0,04) b	0,12(0,02) b	13,43 (1,3) g
J5	1,93(0,27) a	0,62(0,05) bc	0,51(0,04) b	0,12(0,03) b	9,66(1,23) c
J2	2,73(0,56) ab	0,54(0,1) abc	0,15(0,1) a	0,07(0,01) a	7,05(0,16) ab
CV	1,78(0,25) a	0,34(0,02) a	0,05(0) a	0,07(0) a	6,44(0,93) a
<i>p</i> (Anova 1)	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

TUS : types d'usage des sols, FS: Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, TK : Teckeraie, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Dans une même colonne, les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5%.

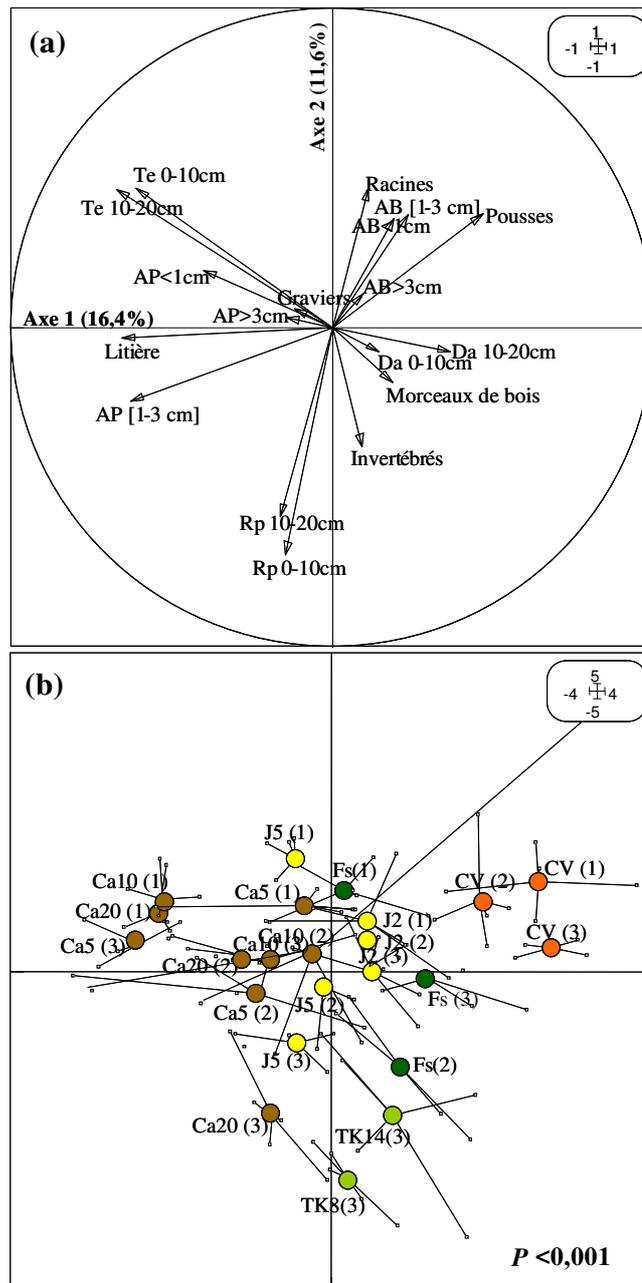


Figure 37: Analyses en Composantes Principales des caractéristiques physico-morphologiques de sols : Cercle de corrélation (a) et carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2. (FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière. Les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les chiffres 1 ; 2 et 3 entre parenthèses correspondent respectivement aux sites "Petit Bouaké", "Djè Koffikro" et "N'Kroiédjo". Da : densité apparente ; Te : teneur en eau ; Rp : résistance à la pénétration ; AB : agrégats biogéniques ; AP : agrégats physiques ; < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

- Caractéristiques chimiques et matière organique

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 40 et 15,3% de la variance totale entre les paramètres chimiques et la matière organique des sols ; soit une inertie totale de 55,3%.

L'axe 1 détenant 2 fois plus d'informations que l'axe 2, notre analyse s'articulera essentiellement autour de l'axe 1. Sur la base du cercle de corrélation (Figure 38a) et des contributions absolues des variables à la formation des deux facteurs principaux de l'analyse, il ressort que l'axe 1 distingue les types d'usage des sols riches en C organique, en N total, en Mg^{2+} et CEC de ceux pauvres en ces paramètres. L'axe 2 oppose les sols riches en Na^+ et P (Olsen) du côté des coordonnées positives aux sols riches en Ca^{2+} et ayant le ratio C/N élevé du côté négatif.

Une projection des types d'usage des sols dans le plan factoriel 1-2 révèle une ordination significative ($p < 0,001$) le long de l'axe 1 qui oppose clairement les milieux soumis à un système de culture ou anthropisés pauvres en C organique, en N total, en Mg^{2+} et moins fertiles aux milieux les moins anthropisés riches en ces éléments chimiques. L'axe 1 traduit un gradient d'intensification agricole (Figure 38b).

IV.2.1.6. Discussion

IV.2.1.6.1. Variations des paramètres environnementaux des sols

L'étude de la morphologie superficielle du sol permet d'estimer dans un contexte d'intensification agricole, les proportions des structures physiques et biologiques impliquées dans la formation des macro-agrégats stables (Velasquez *et al.*, 2007b). Cet important attribut du sol est directement lié aux propriétés hydrauliques (infiltration et rétention de l'eau), à la sequestration du carbone et à l'intensité des activités biologiques dans le sol (Blanco-Canqui & Lal, 2004 ; Lavelle *et al.*, 2006). La litière, les invertébrés et les agrégats biogéniques varient suivant la même tendance dans chacun des sites étudiés. Les proportions sont importantes dans les forêts, les cacaoyères et les teckeraies tandis que dans les champs cultivés ces proportions atteignent des valeurs trois à quatre fois inférieures. Les pratiques culturales caractérisées par une intensification agricole qui se traduit par une récurrente utilisation et une exposition au soleil, ont un impact dépressif sur l'abondance des macro-invertébrés et la quantité de litière couvrant le sol, avec pour conséquence immédiate de favoriser la prédominance des agrégats physiques au profit des structures biogéniques (Velasquez *et al.*, 2007b). La dénudation de la surface des sols, la quasi absence d'agrégats biogéniques de grande taille et la faible abondance d'organismes confèreraient aux sols sous

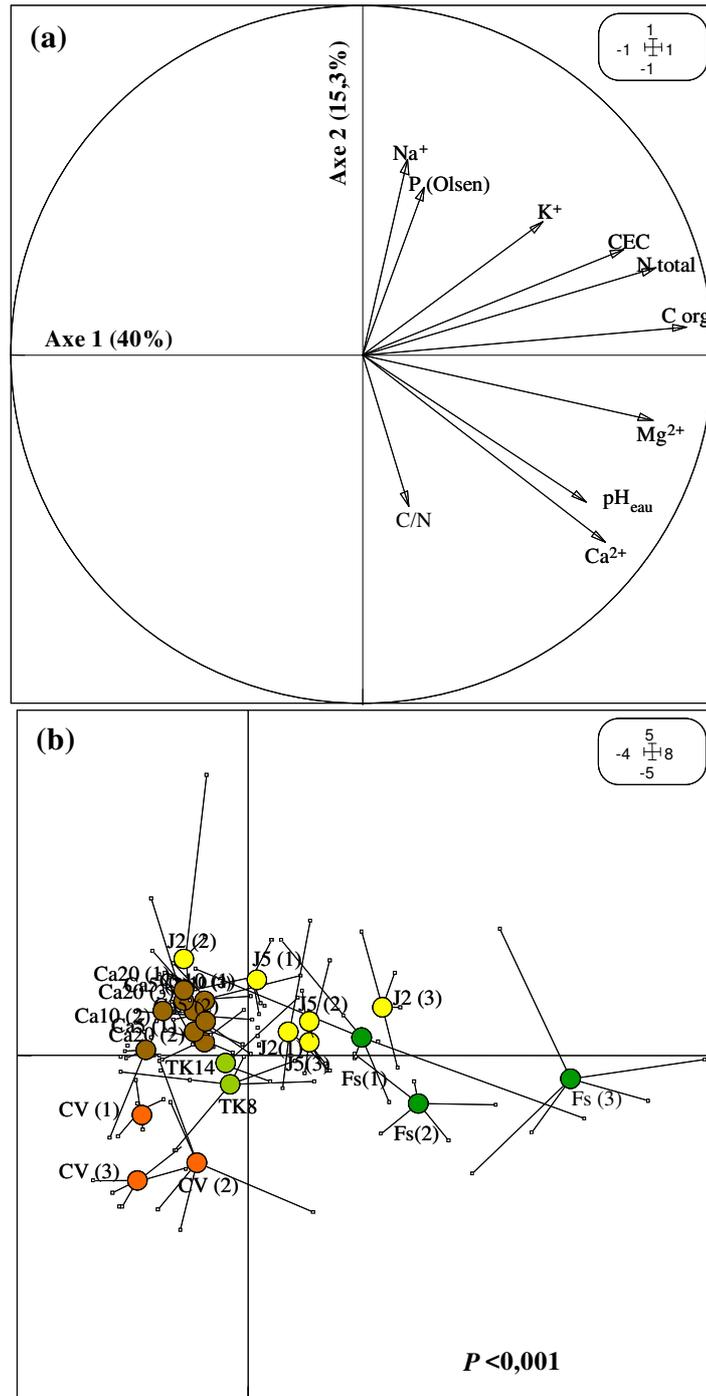


Figure 38 : Analyses en Composantes Principales des caractéristiques chimiques et la matière organique de sols : Cercle de corrélation (a) et carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2. (FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière. Les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les chiffres 1 ; 2 et 3 entre parenthèses correspondent respectivement aux sites "Petit Bouaké", "Djè Koffikro" et "N'Kroiédjô".

culture une faible capacité à retenir l'eau et à séquestrer le carbone (Blanchart *et al.*, 1999 ; Topoliantz *et al.*, 2000). Toutefois, la pratique de la jachère permet à court terme de restaurer ces composantes dans les cinq premiers centimètres du sol.

L'étude de la compaction, la teneur en eau et la densité apparente du sol s'est limitée à la strate superficielle du sol en raison des processus d'incorporation de la litière, de décomposition et d'humification qui s'y déroulent préférentiellement (Boa, 1990 ; Harmand & Nutti, 1998). La mise en culture engendre une variation significative de la résistance du sol à la pénétration. Les valeurs sont faibles dans les cultures vivrières et fortes en forêts et dans les teckeraies. La faible compaction du sol dans les champs cultivés pourrait être expliquée par la pratique du labour léger lors des opérations de sarclages et qui ameublissent le sol en augmentant le nombre des agrégats de petite taille au détriment des agrégats de grande taille (Obalum & Obi., 2010). Les sols des sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro" sont moins compacts ; la résistance à la pénétration varie entre 23,7 et 690,6 kPa. Pourtant sur le site "N'Kroiêdjô"; les valeurs de la compaction sont élevées et atteignent 4101,1 kPa dans la teckeraie de 8 ans. La valeur élevée de la compaction dans la teckeraie de 8 ans est trois fois supérieure à celle obtenue par Assié *et al.* (2008) dans les reboisements plurispécifiques sur le même site. Elle est certainement causée par l'accumulation des éléments grossiers due à l'érosion (bien visible dans ce milieu). L'accumulation de turricules de *D. terrae-nigrae* pourrait être une des raisons.

Il existe une similitude entre la tendance évolutive de la densité apparente et la teneur en eau du sol. Ces deux paramètres varient de manière significative entre les types d'usage des sols des sites "Petit Bouaké" et "N'Kroiêdjô", alors que les valeurs sont statistiquement égales sur le site "Djè Koffikro". La présente étude indique que la mise en culture des forêts des sites "Petit Bouaké" et "N'Kroiêdjô", se traduit par une réduction de la teneur en eau et une augmentation de la densité apparente du sol. Ceci est probablement causé par la réduction de la matière organique dans les champs de culture. La densité apparente est inversement corrélée à la matière organique et à la texture du sol. L'augmentation de la densité apparente du sol est indicatrice d'une diminution de la porosité et de la teneur en matière organique du sol, laquelle baisse entraîne par voie de conséquence la diminution de la teneur en eau gravimétrique du sol (Bhushan & Sharma, 2005 ; Golchin & Asgari, 2008).

A l'exception du site "Petit Bouaké", la teneur du sol en matière organique est en général plus basse dans les milieux anthropisés (cultures vivrières et cacaoyères) et élevée en forêts. En effet, la mise en culture du sol entraîne une diminution rapide du stock de matière organique du sol. L'exportation du carbone et de l'azote sous forme de récoltes et l'érosion

hydrique seraient l'une des raisons plausibles de cette baisse (Geissen *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2010). Les changements des types d'usage des sols et la déforestation causent aussi une réduction de la teneur de carbone en influençant la respiration des microorganismes endogés et les flux du carbone dans le sol (Martin *et al.*, 2010). Dans les forêts, l'apport de matière organique au sol sous forme de litière est beaucoup plus important et la matière organique est moins humifiée (valeur moyenne de C/N = 11,6) que dans les milieux cultivés (valeur moyenne de C/N = 10,9). La litière de feuilles en forêt est en général plus riche en lignine et en polyphénols que celle des autres milieux.

Les teneurs en C organique et en N total du sol sur les sites "Petit Bouaké" (11,6 g.kg⁻¹ et 1,2 g.kg⁻¹), "Djè Koffikro" (12,4 g.kg⁻¹ et 1,1 g.kg⁻¹) et "N'Kroiédjô" (14 g.kg⁻¹ et 1,2 g.kg⁻¹) sont largement supérieures à celles rapportées par Koné *et al.* (2008) dans la région de savane humide de Côte d'Ivoire (7,46 mg.kg⁻¹ et 0,52 mg.kg⁻¹, respectivement). Les teneurs moyennes obtenues sur nos sites sont de loin supérieures au seuil critique de 11 mg.kg⁻¹ défini pour les sols tropicaux par Lal (1997).

Le phosphore assimilable ne varie significativement que sur le site de "Djè Koffikro". Les valeurs mesurées du phosphore assimilable sont en général plus importantes dans les cacaoyères et plus faibles dans les jachères et la forêt. La teneur en phosphore du sol dépend en général des constituants minéraux du sol, de la roche mère et de la décomposition de la matière organique (Morel, 1996 ; Lavelle & Spain, 2001). Dans le cas des cacaoyères, la plus forte teneur pourrait être expliquée par la bonne qualité de la litière des feuilles de cacaoiers (C/N moyenne = 11,4) qui se décompose plus rapidement que celle de la forêt (C/N = 12,1), alors que dans les parcelles de jachères, la forte diversité végétale qui optimise l'exportation du phosphore du sol sous forme végétale semble expliquer les faibles teneurs de cet élément chimique dans ces milieux.

Par comparaison au site "N'Kroiédjô", le pH est légèrement plus acide sur les sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro" et ne varie pas significativement d'un type d'usage à un autre. Le caractère acide des sols de ces sites pourrait-être lié à la nature de la roche mère sous-jacente qui serait responsable d'une forte concentration en aluminium libre (ion Al³⁺). Le pH du sol est étroitement lié à beaucoup d'autres propriétés du sol comme les bases cationiques échangeables et la CEC (Ellis & Mellor, 1995). Selon Duchaufour (1997), le pH du sol augmente avec la CEC. En effet, une élévation du pH favorise l'apparition de charges négatives sur le complexe absorbant susceptibles de retenir les cations, entraînant ainsi l'augmentation de la CEC. Toutefois, cette assertion est en contradiction avec les résultats de la présente étude où par exemple, les sols de forêt présentent les valeurs les plus fortes de

capacité d'échange alors qu'ils ont aussi des faibles pH. La quantité d'argile et la teneur en matière organique seraient aussi d'autres facteurs de variation de la CEC à considérer.

Globalement, les plus grandes teneurs en CEC se trouvent associées aux sols de forêts tandis que les sols de cultures vivrières sont caractérisés par de faibles teneurs. Des résultats similaires ont été obtenus par Golchin & Asgari (2008) et Geissen *et al.* (2009), respectivement dans des sols cultivés en Iran et au Mexique. Ces auteurs soutiennent que les sols de forêts sont naturellement plus riches que ceux des milieux anthropisés en raison de l'hétérogénéité de la végétation sus jacente qui produit une litière riche en éléments chimiques.

IV.2.1.6.2. Facteurs explicatifs de la variation des paramètres environnementaux

Les ACP réalisées sur l'ensemble des 23 types d'usage des sols à partir des données morpho-physiques, et sur les données chimiques et la matière organique confirment les résultats des analyses simples. Les modifications des paramètres environnementaux du sol sont en relation avec sa mise en culture (Velaquez *et al.*, 2007b ; Golchin & Asgari, 2008 ; Geissen *et al.* 2009). Pour chacune des analyses effectuées, le regroupement des milieux montre que le facteur responsable de leur ségrégation est principalement lié aux types d'utilisation du sol. L'ampleur des modifications dépend de l'intensité de la perturbation.

En se basant sur l'analyse des données morphologiques et physiques, le groupe des cultures vivrières est caractérisé par de nombreuses pousses tandis que celui formé par les jachères est principalement riche en structures biogéniques. Le groupe des cacaoyères est caractérisé par une richesse en litière et une bonne teneur en eau du sol. Enfin le dernier groupe composé par les sols des forêts et des teckeraies, sont caractérisés par une forte activité biologique et une résistance à la pénétration élevée dans la strate supérieure du sol.

En se référant aux données chimiques et la matière organique, il ressort que le groupe formé par les cultures vivrières, les cacaoyères et les teckeraies est plus pauvre en matière organique et est caractérisé par une faible capacité d'échange cationique que celui des jachères et des forêts qui sont en fait les milieux les moins perturbés.

IV.2.1.7. Conclusion partielle

L'analyse des propriétés édaphiques révèle de façon nette l'impact des modes d'utilisation du sol sur sa qualité morphologique, physique, chimique et sa teneur en matière organique.

IV.2.2. RELATIONS ENTRE PEUPELEMENTS DE VERS DE TERRE ET PARAMETRES EDAPHIQUES : ANALYSE DE CO-INERTIE

IV.2.2.1. Co-inertie entre les peuplements de vers de terre et les caractéristiques physico-morphologiques

L'analyse de co-inertie réalisée entre l'ensemble des 20 espèces de vers de terre et les caractéristiques physico-morphologiques a mis en évidence une corrélation entre ces deux jeux de données. Il existe une forte correspondance entre les axes de co-inertie et les axes obtenus séparément dans les ACP des données physico-morphologiques et faunistiques ; les valeurs d'inertie maximale obtenues sur les tableaux séparés (inertie 1 et 2) sont proches des valeurs d'inertie projetées sur les axes de co-inertie (variance 1 et 2). De plus, les valeurs de corrélations obtenues entre les systèmes de coordonnées et les axes de la co-inertie ($r = 0,87$) indiquent qu'il existe une forte co-structure entre le tableau faunistique et le tableau des variables édaphiques (Tableau XX). Le test de permutation sur les deux tableaux confirme que cette co-structure est significative ($p < 0,001$).

Les deux premiers axes de la co-inertie expliquent à eux seuls 62,1% de la variabilité totale. L'axe 1 explique 44,2% de l'inertie totale et l'axe 2 ; 17,9% (Figure 39a). L'axe 1 détient deux fois plus d'informations que le deuxième axe, il constituera donc le principal axe d'interprétation des résultats.

Tableau XX: Résultats de l'analyse de co-inertie. Inertie 1 et 2 : inerties maximales obtenues par les analyses séparées que l'on peut projeter sur les axes. Variance 1 et 2 : inerties que l'on projette sur les axes de co-inertie. Corrélation : corrélation entre les systèmes de coordonnées pour les axes 1 et 2 de l'analyse de co-inertie.

Axe	Variance 1	Variance 2	Corrélation	Inertie 1	Inertie 2
1	3,17	4,63	0,8676	3,39	4,95
2	2,26	2,37	0,8675	2,94	3,09

L'examen de la position des différents types d'usage des sols sur le plan de co-inertie décrit par les axes 1 et 2 montre que la distribution des parcelles vue par les variables physico-morphologiques et celle définie par les données faunistiques montre des différences de position principalement pour 6 parcelles du site "N'kroiédjô" (CV, TK14, TK8, Ca5, Ca10, Ca20) et la parcelle Ca10(2) de "Djè Koffikro". Hormis ces 7 parcelles suscitées, la structure

de la répartition des types d'usage des sols vue par ces deux jeux de variables est pratiquement la même dans les autres milieux (Figure 39a).

La relation entre les paramètres physico-morphologiques et les espèces de vers de terre (Figure 39b & c) montre que les peuplements des cultures annuelles (CV(1), CV(2) et CV(3)) caractérisées par les jeunes pousses sont dominés par l'espèce *H. africanus*. Les parcelles de jachères de *C. odorata* riches en agrégats biogéniques et en racines des végétaux sont de préférence peuplées par *D. terraenigrae*, *D. baeri*, *S. zielae*, *M. omodeoi* et *D. erhrhardti*. Les sols de cacaoyères beaucoup humides en raison de l'abondance de la litière présentent des peuplements préférentiellement dominés par les espèces *Dichogaster sp.*, *G. paski*, *A. multivesiculatus* et *A. opisthogynus*. Les milieux forestiers et les teckeraies caractérisés par une forte activité biologique, une importante litière et une compaction élevée dans la strate 0-10 cm présentent une faune de petite taille associée à ces conditions de vie ; ce sont *D. saliens*, *D. eburnea* et *S. compositus*.

Pour une meilleure compréhension, un tableau croisé a été réalisé en vue de montrer une représentation graphique synthétique de l'information portée par les tableaux faunistique et édaphique. Les vingt groupes faunistiques sont placés en ordonnés et les variables physico-morphologiques placées en abscisse (Figure 40). On constate de fortes corrélations positives entre les biomasses des espèces *S. zielae*, *D. baeri*, *D. terraenigrae*, *D. eburnea*, *D. saliens*, *M. nilési*, *S. palustris* et les racines, teneur en eau dans la strate 0-10 cm, agrégats physiques de petite taille et agrégats biogéniques de taille moyenne et grande qui s'opposent aux corrélations négatives entre les biomasses des espèces *H. africanus*, *M. omodeoi* et les paramètres édaphiques précédents. La biomasse de *H. africanus* est positivement corrélée aux jeunes pousses, tandis que la biomasse de *M. omodeoi* est plus corrélée à la densité apparente dans la strate supérieure du sol.

IV.2.2.2. Co-inertie entre les peuplements de vers de terre et les caractéristiques chimiques et la matière organique

L'analyse de co-inertie réalisée entre l'ensemble des espèces de vers de terre et les paramètres chimiques et la matière organique a mis en évidence l'existence d'une corrélation entre ces deux jeux de données. Le test de Monte-Carlo réalisé sur la base de 1000 permutations a montré que la structure résultante de l'analyse est significative ($p < 0,001$). Le plan de co-inertie 1-2 est le même que les plans 1-2 de chaque analyse séparée (Tableau XXI). Les deux projections sont reliées par de très fortes corrélations égales à 0,71 pour chacun des axes 1 et 2 de l'analyse de co-inertie.

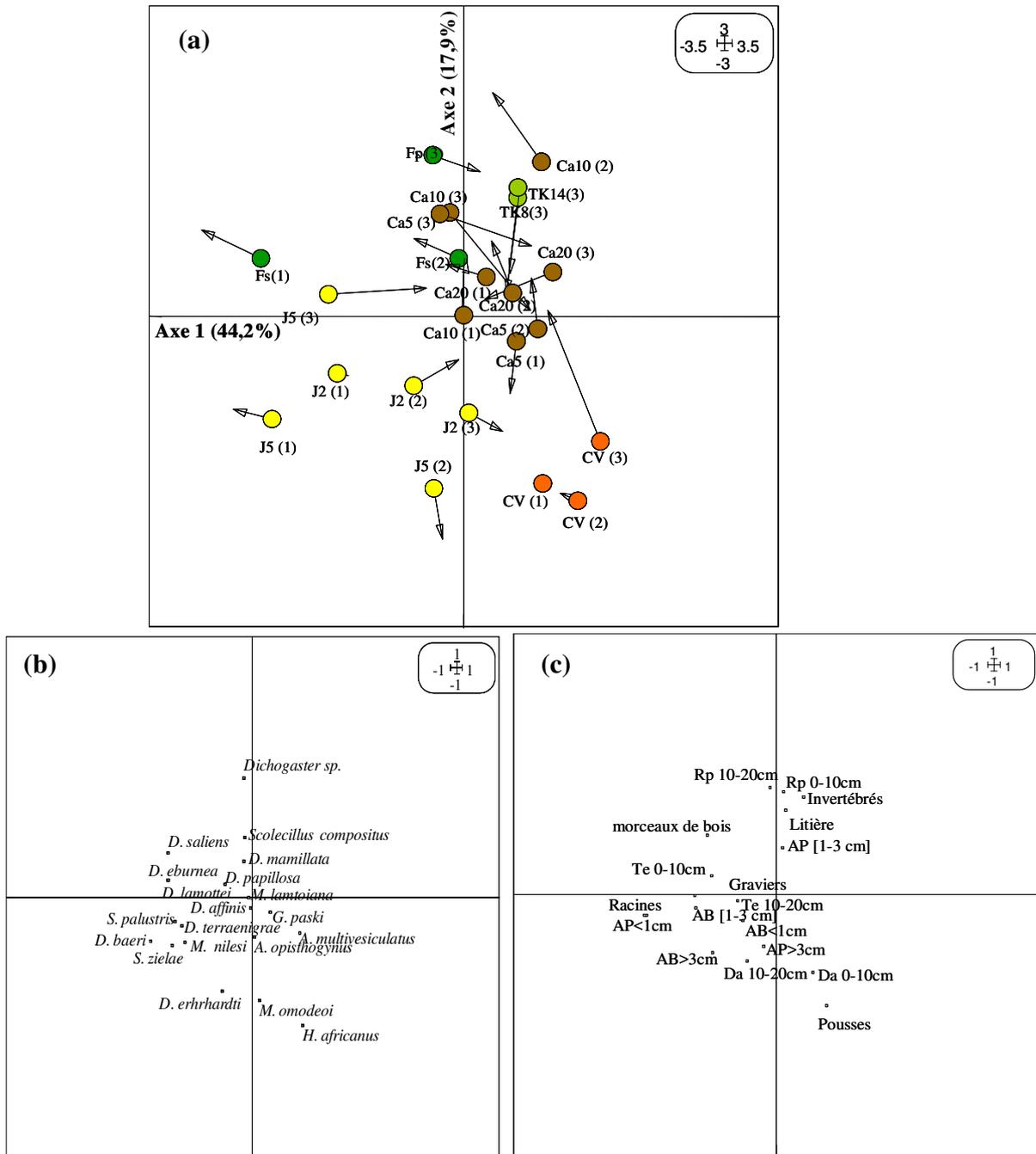


Figure 39 : Résultats de l'analyse de co-inertie. (a) Distribution des sites dans le plan factoriel décrit par les axes 1 et 2 de co-inertie. Les cercles indiquent la position des parcelles par rapport aux variables physico-morphologiques et l'extrémité des flèches la position des parcelles par rapport aux données faunistiques. Distribution des espèces de vers de terre (b) et des variables physico-morphologiques (c) dans l'espace factoriel décrit par les axes de co-inertie 1 et 2. Da : densité apparente ; Te : teneur en eau ; Rp : résistance à la pénétration ; AB : agrégats biogéniques ; AP : agrégats physiques ; < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

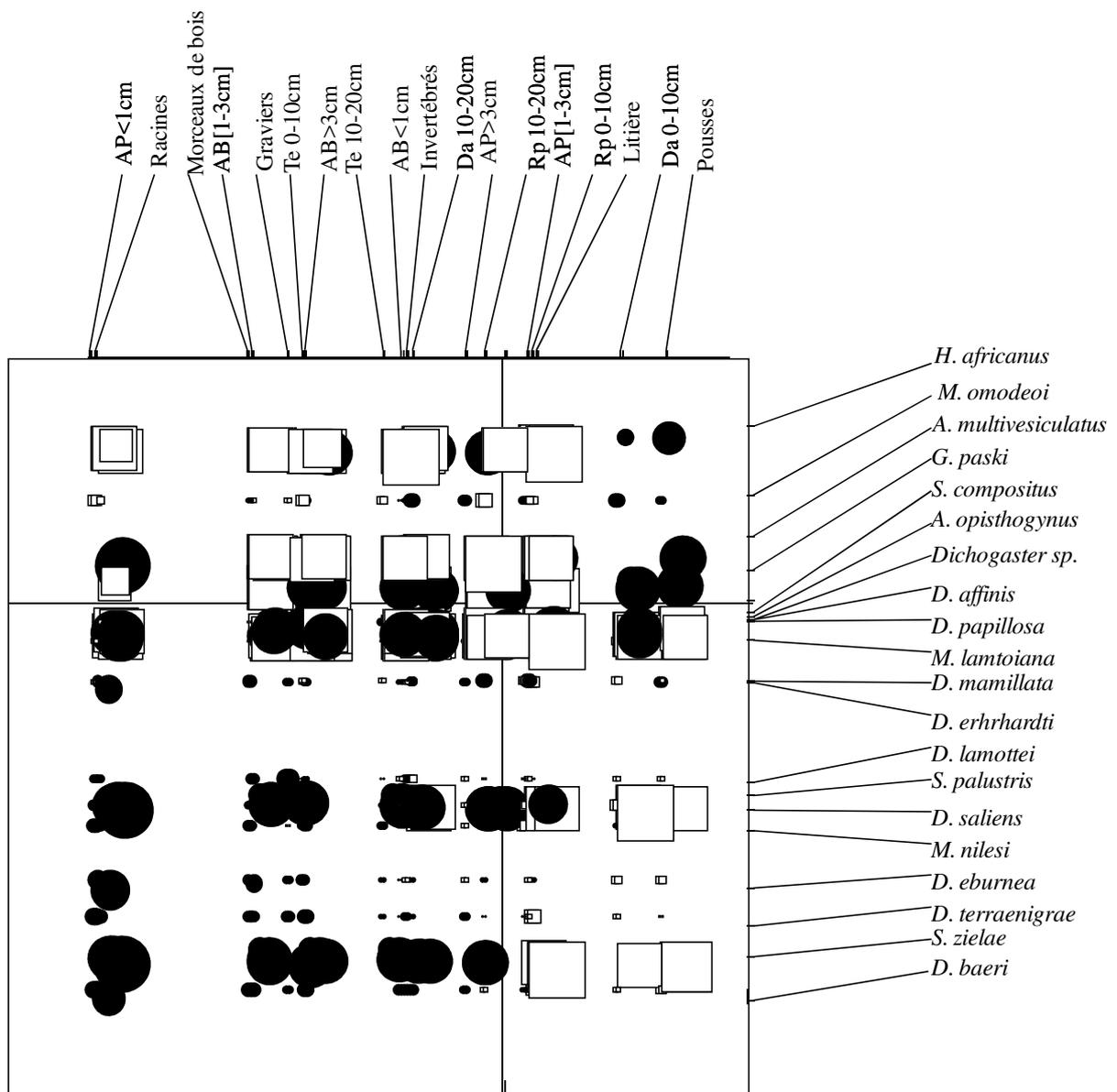


Figure 40 : Représentation graphique du tableau croisé synthétisant l'information des tableaux faunistique et physico-morphologiques. Les points sont ordonnés en abscisse et en ordonnée en fonction de leurs coordonnées sur l'axe principal de l'analyse de co-inertie. Les valeurs positives sont symbolisées par des cercles et les valeurs négatives par des carrés. La surface de chaque symbole est proportionnelle à la valeur absolue observée pour le couple de variables considéré.

Tableau XXI : Résultats de l'analyse de co-inertie.

Axe	Variance 1	Variance 2	Corrélation	Inertie 1	Inertie 2
1	4,29	2,6	0,705	4,55	4,95
2	1,54	3,71	0,718	1,91	3,09

Les deux premiers axes de la co-inertie expliquent à eux seuls 77,2% de la variabilité totale. L'axe 1 détient 46,8% de l'inertie totale et 30,4% pour l'axe 2. La distribution des types d'usage des sols dans le plan factoriel défini par les axes 1 et 2 de la co-inertie (Figure 41a) est pratiquement similaire à celle résultant de l'analyse séparée des paramètres chimiques et de la matière organique du sol du chapitre précédent (cf. chapitre IV.2.1). La position des parcelles sur le plan de co-inertie décrit par les axes 1 et 2 montre que la structure de la répartition des parcelles vue par les variables faunistiques et par les variables chimiques et la matière organique est globalement la même. Les différences les plus importantes s'observent pour les forêts, les téckeraies, les cacaoyères Ca10(1), Ca20(1), Ca5(2) et la jachère J5(1).

En ce qui concerne la relation entre les paramètres chimiques, la matière organique et les peuplements des vers de terre (Figure 41b & c), l'on observe que les milieux soumis à une forte intensification agricole et caractérisés par de faibles teneurs en matière organique (C organique et N total), et de faibles concentrations en éléments chimiques (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , CEC et pH_{eau}) sont associés aux espèces *M. omodeoi*, *H. africanus*, *A. multivesiculatus* et *A. opisthogynus*. Le groupe formé par les parcelles moins anthropisées (moins perturbées) caractérisés par des teneurs plus élevées en ces éléments chimiques sus-cités dispose d'une faune associée à ces conditions de vie qui est caractérisée par la présence des espèces telles que *D. mamillata*, *D. terraenigrae*, *D. baeri*, *S. compositus*, *M. lamtoiana*, *Dichogaster sp.* et *G. paski*.

La représentation graphique des tableaux croisés (Figure 42) révèle d'une part de fortes corrélations positives entre les biomasses des espèces *D. terraenigrae*, *D. baeri*, *D. eburnea*, *D. saliens*, *D. mamillata*, *D. affinis*, *Dichogaster sp.*, *M. nilési*, *M. lamtoiana*, *S. compositus*, *S. palustris*, *G. paski* et les teneurs en C organique, N total et CEC qui s'opposent clairement aux corrélations négatives entre les paramètres environnementaux précédents et les biomasses des espèces *M. omodeoi*, *H. africanus*, *A. multivesiculatus*.

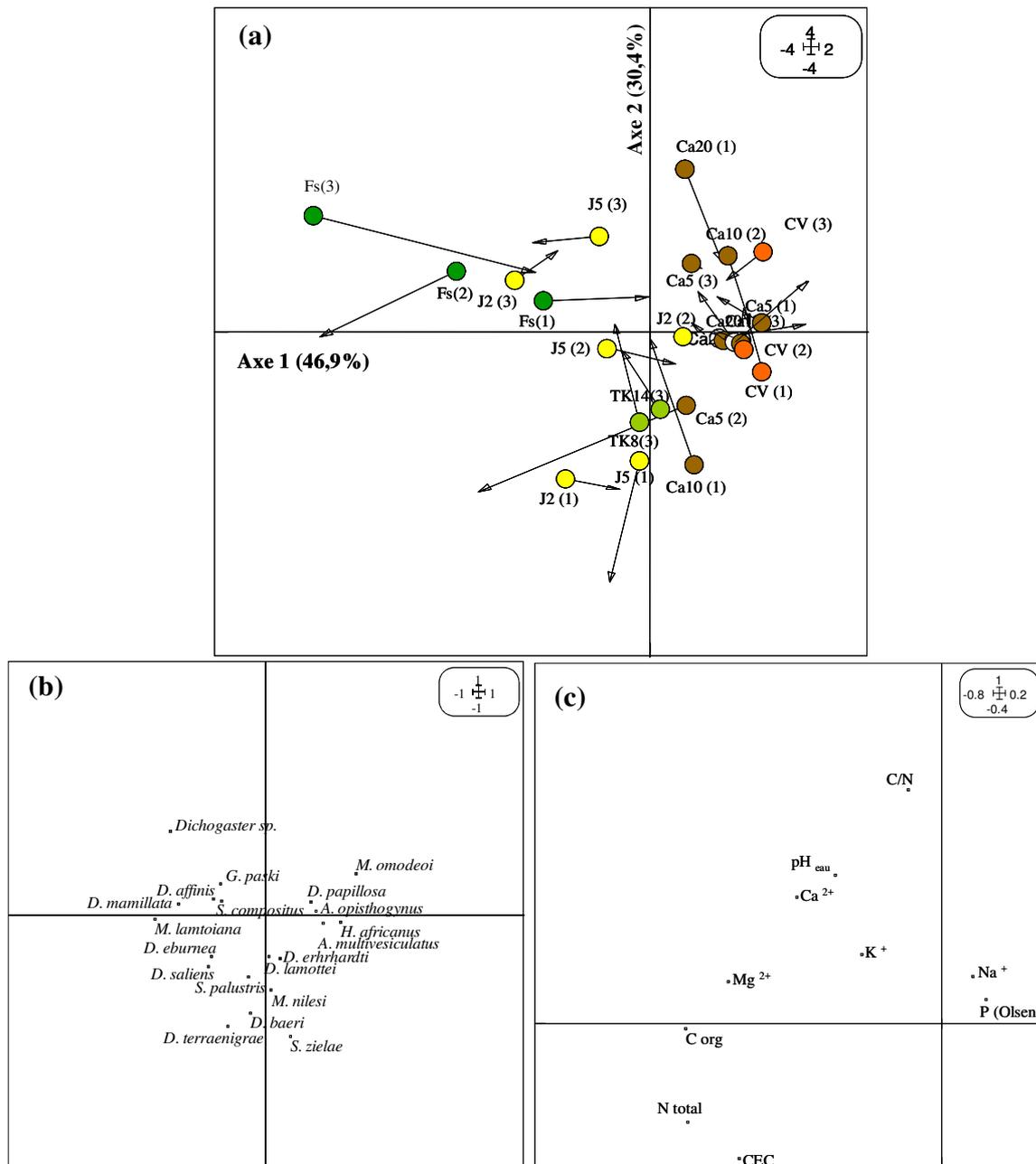


Figure 41 : Analyse de co-inertie réalisée entre le tableau de données faunistiques et le tableau de données édaphiques. (a) Distribution des sites dans le plan factoriel décrit par les axes 1 et 2 de co-inertie. Les cercles indiquent la position des parcelles par rapport aux variables chimiques et de la matière organique et l'extrémité de la flèche la position des parcelles par rapport aux données faunistiques. Distribution des espèces de vers de terre (b) et des variables morpho-physiques (c) dans l'espace factoriel décrit par les axes de co-inertie 1 et 2. C org : carbone organique.

D'autre part, les biomasses des espèces *Dichogaster sp.*, *D. mamillata*, *M. lamtoiana* sont positivement liées au pH_{eau} du sol et aux teneurs en Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} .

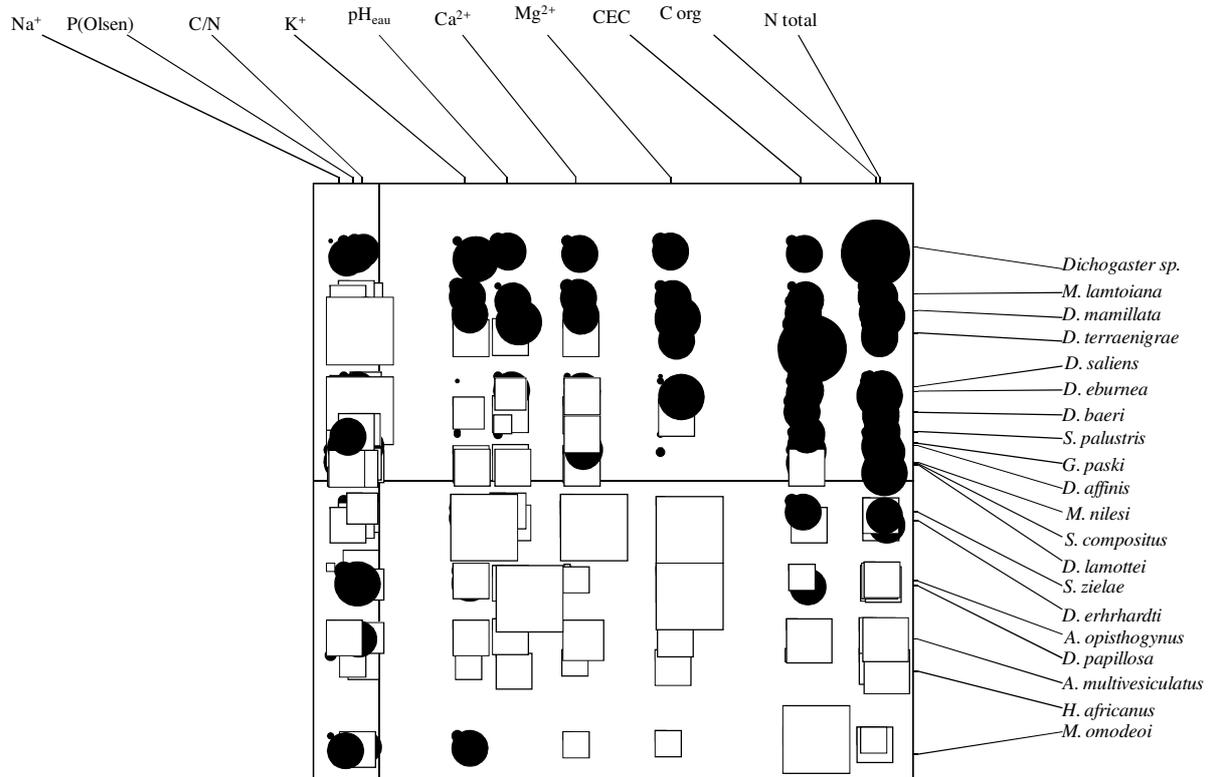


Figure 42 : Représentation graphique du tableau croisé synthétisant l'information des tableaux faunistique et des variables chimiques et de la matière organique. Les valeurs positives sont symbolisées par des cercles et les valeurs négatives par des carrés. La surface de chaque symbole est proportionnelle à la valeur absolue observée pour le couple de variables considéré. C org : carbone organique.

IV.2.2.3. Discussion

Les analyses de co-inertie montrent une étroite relation entre les tableaux des variables édaphiques et le tableau représentant la structure générale de l'assemblage des vers de terre ; les peuplements des vers de terre reflètent par leur abondance et leur composition, les facteurs environnementaux qui caractérisent les types d'usage des sols dans lesquels ils vivent. Ces résultats sont similaires à ceux de Decaens *et al.* (2008) et Zirbes *et al.* (2009) qui mettent en évidence que le type d'usage du sol a un impact significatif sur l'occurrence et l'abondance des espèces de vers de terre. La mise en culture des forêts induit une profonde modification des caractéristiques édaphiques du sol. On note une importante diminution de la teneur en matière organique, de la capacité d'échange cationique, des concentrations en éléments chimiques (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+), un faible pH_{eau} et une augmentation de la densité des jeunes pousses. Ceci

induit la disparition des espèces épigées détritivores, plus sensibles à l'intensification agricole, au profit des vers de terre appartenant à la catégorie écologique des endogés géophages (*M. omodeoi*, *H. africanus*, *A. multivesiculatus* et *A. opisthogynus*) recensée comme la catégorie la plus résistante au labour du sol et à l'élévation de la température (Mathieu *et al.*, 2005, Zirbes *et al.*, 2009; Simonsen *et al.*, 2010). L'importante biomasse de l'espèce *H. africanus* dans les milieux de cultures caractérisés par une faible teneur en matière organique et un pH_{eau} acide appuie l'hypothèse de Tondoh *et al.* (2007) stipulant que ladite espèce pouvait-être considérée comme indicatrice des écosystèmes dégradés par les activités anthropiques.

La baisse de l'intensification de l'exploitation du sol peut induire des modifications de certains paramètres édaphiques et améliorer les conditions de vie dans le sol. Du fait de la couverture du sol par la litière de feuilles, il règne une condition d'humidité viable dans les sols des cacaoyères. Ceci engendre un impact notable sur la structure et la composition spécifique des vers de terre ; on observe l'installation de l'espèce épigée (*Dichogaster sp.*) en plus des endogées (*M. omodeoi*, *H. africanus*, *A. multivesiculatus* et *A. opisthogynus*). Cette espèce épigée semble être un indicateur sensible aux changements des conditions hydriques du sol. Cette assertion pourrait être appuyée par les travaux de Buckerfield *et al.* (1997) qui ont montré que les vers de terre *Aporrectodea rosea*, *A. trapezoides*, *Microscoclex dubius* et *M. phosphoreus* étaient des indicateurs du régime hydrique dans les sols arides du sud de l'Australie ; leur densité et biomasse sont élevées dans les prairies humides et inversement liées à la teneur du sol en sables grossiers.

Les parcelles en réconstitution, à savoir les jachères à *C. odorata* sont caractérisées par une abondance de structures biogéniques, de racines et d'importantes teneurs en Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+} . Les espèces de vers associées à ces sols sont *D. terraenigrae*, *D. baeri*, *D. ehrhardti*, *Dichogaster sp.*, *S. zielae*, *M. omodeoi* et *G. paski*. Les abondances de *D. terraenigrae*, *D. baeri* et *S. zielae* indiquent une qualité biologique de ces parcelles par leur richesse en racines et en agrégats biogéniques. Ces 3 espèces de vers de terre sont les plus sensibles à l'humidité du sol ; cela pourrait s'expliquer par la forte corrélation positive qui existe entre leurs biomasses et la teneur en eau du sol dans la strate 0-10 cm (Figure 40).

Les milieux forestiers et les teckeraies ont des teneurs plus élevées de matière organique, d'éléments chimiques, une importante litière et une forte activité biologique qui permettent l'installation d'une plus grande gamme des catégories écologiques. Les analyses de co-inertie ont ainsi permis d'associer à ces milieux 6 espèces épigées (*D. saliens*, *D. eburnea*, *D. baeri*, *D. mamillata*, *Dichogaster sp.*, *G. paski*), une espèce anécique (*M. lamtoiana*), une espèce endogée polyhumique (*S. compositus*) et une espèce endogée

oligohumique (*D. terraenigrae*). La prolifération de ces espèces dans les milieux forestiers et les teckeraies est en partie dûe à l'abondance de la matière organique qui leur sert de source de nourriture. Cette assertion est étayée par l'existence de corrélations positives entre leurs biomasses et les teneurs du sol en C organique et N total (Figure 42). D'autres études mettent en évidence la relation entre la matière organique du sol et l'abondance des vers de terre (Huerta *et al.*, 2007 ; Fonte *et al.*, 2009) avec par exemple, l'abondance globale des vers de terre positivement liée à la teneur en C organique et en N total.

IV.2.2.4. Conclusion partielle

La modification des paramètres morphologiques, physiques, chimiques et la matière organique du sol comme conséquence de l'intensification agricole influence la composition des peuplements de vers de terre. Des groupes de réponse sont associés à des caractéristiques particulières de chaque type d'usage des sols indiquant l'aptitude des vers de terre à être utilisées comme indicateurs biologiques de l'état du sol. Cependant, l'une des limites de cette étude, c'est l'absence de test statistique permettant d'évaluer l'association des espèces aux différents types de milieux en présence.

IV.3. PEUPELEMENTS DES VERS DE TERRE COMME BIOINDICATEURS DE L'ETAT DES ECOSYSTEMES

IV.3.1. Typologie des types d'usage des sols et caractéristiques faunistiques

Une classification hiérarchique a été réalisée sur le tableau des données de la biomasse des peuplements à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude. Le dendrogramme obtenu par la méthode de Ward basée sur la distance euclidienne permet de répartir les types d'usage des sols en quatre groupes (niveau de partition 4) (Figure 43) :

- Le groupe 1 est un peu plus hétérogène, il regroupe essentiellement les milieux du site N'kroiédjô [TK14(3), TK8(3), Ca 20(3), Ca 10(3), J 5(3), J 2 (3) et CV(3)], Ca 20(1), Ca 10(1), Ca 5(2) et J 2(2).
- Le groupe 2 est constitué de parcelles soumises à un système de culture [Ca 5(3), Ca 5(1), Ca 10(2), Ca 20(2), CV(1) et CV(2)].
- Le groupe 3 est formé par les forêts naturelles ne subissant pas de pressions anthropiques importantes [FS(1), FS(2) et FS(3)].
- Le groupe 4 est composé de jachères naturelles à *C. odorata* [J 2(1), J 5(1) et J 5(2)].

L'analyse de l'abondance relative (biomasse) des espèces de vers de terre dans chaque groupe de la typologie a mis en évidence l'existence d'une structure bien définie (Tableau XXII). Nous considérons 50% comme seuil supérieur car aucune espèce de vers de terre n'atteint cette proportion dans un groupe de la typologie.

Les milieux du groupe 1 sont caractérisés principalement par l'espèce *Stuhlmannia zielae*, *Dichogaster baeri* et *Millsonia omodeoi*. Deux espèces de vers de terre sont inexistantes dans ce groupe. Ce sont notamment *Dichogaster lamottei* et *Agastrodrilus opisthogynus*.

Les différents types d'usage des sols du groupe 2 sont constitués principalement par quatre espèces endogées dont *Stuhlmannia zielae*, *Millsonia omodeoi*, *Dichogaster ehrhardti* et *Hyperiodrilus africanus*. Les espèces épigées sont faiblement représentées. *Dichogaster mamillata* et *Scolecilus compositus* n'apparaissent dans aucun des milieux appartenant à ce groupe.

Les milieux appartenant au groupe 3 rassemblent les forêts naturelles. Les espèces de vers de terre associées à ce groupes sont : *Stuhlmannia zielae*, *Dichogaster eburnea*, *Dichogaster baeri* et *Dichogaster ehrhardti*.

Le groupe 4 est principalement caractérisé par les espèces *Stuhlmannia zielae*, *Dichogaster terraenigrae* et *Dichogaster baeri*.

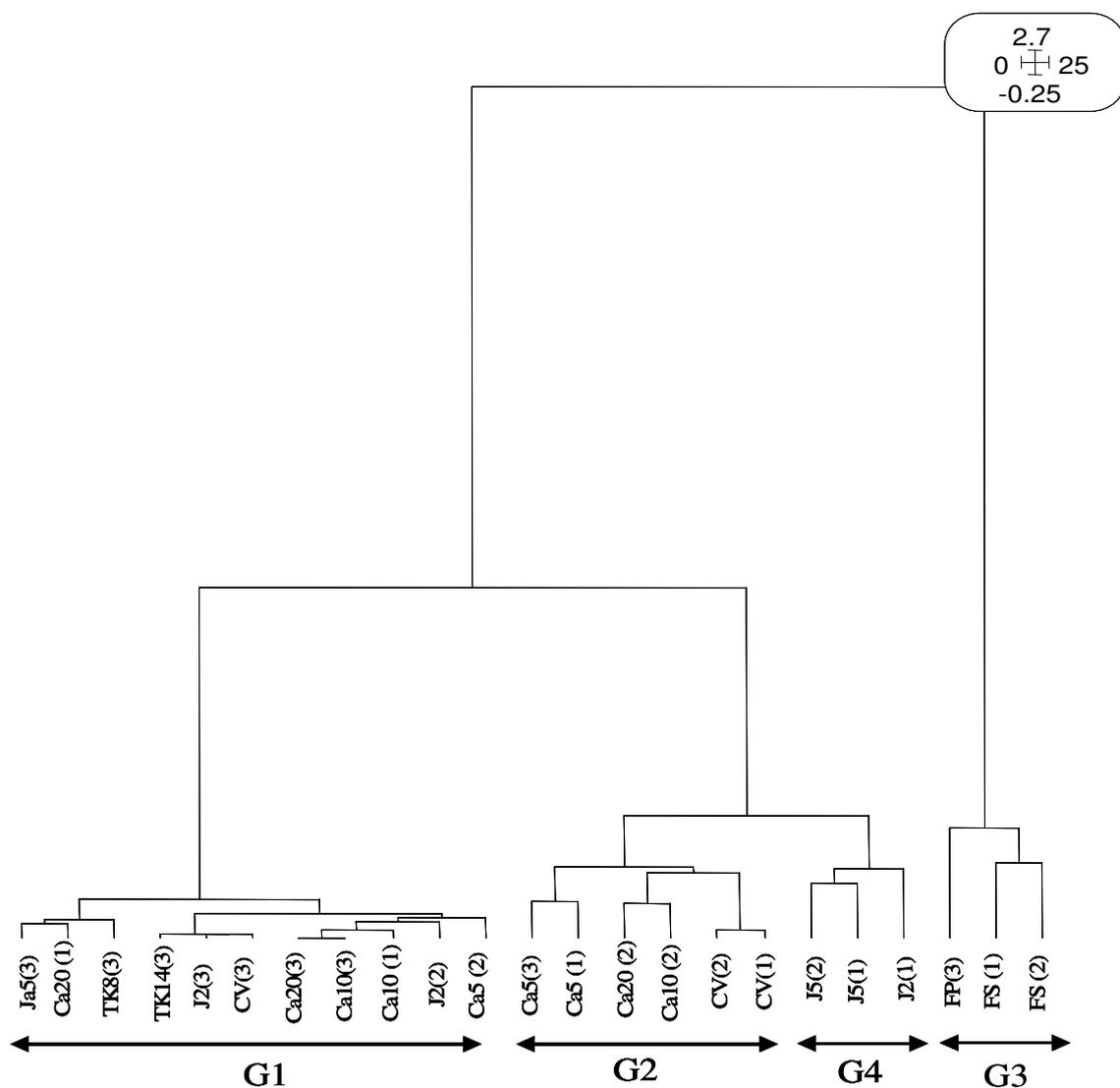


Figure 43 : Classification hiérarchique des 23 types d'usage des sols. FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière. Les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les chiffres 1 ; 2 et 3 entre parenthèses correspondent respectivement aux sites "Petit Bouaké", "Djè Koffikro" et "N'Kroiédjô". G1 : groupe 1 ; G2 : groupe 2 ; G3 : groupe 3 et G4 : groupe 4.

Tableau XXII : Classification des espèces de vers selon l'abondance relative entre les quatre groupes de types d'usage des sols. Classes d'abondance : - : espèce absente ; + : < 10% ; ++ : 10-19% ; +++ : 20-29% ; ++++ : 30-39% ; +++++ : > 40%.

Espèces	Groupes de milieux			
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
<i>Millsonia lamtoiana</i>	+	+	+	+
<i>Millsonia omodeoi</i>	++	++	+	+
<i>Millsonia nilesi</i>	-	-	+	-
<i>Dichogaster baeri</i>	++	+	++	++
<i>Dichogaster terraenigrae</i>	+	+	+	++
<i>Dichogaster saliens</i>	+	+	+	+
<i>Dichogaster erhrhardti</i>	+	++	++	+
<i>Dichogaster lamottei</i>	-	+	+	+
<i>Dichogaster papillosa</i>	+	+	+	+
<i>Dichogaster eburnea</i>	+	+	+++	+
<i>Dichogaster mamillata</i>	+	-	+	+
<i>Dichogaster affinis</i>	+	+	+	+
<i>Dichogaster sp.</i>	+	+	+	-
<i>Agastrodrilus multivesiculatus</i>	+	+	-	+
<i>Agastrodrilus opisthogynus</i>	-	+	-	-
<i>Hyperiodrilus africanus</i>	+	++	-	+
<i>Scolecillus compositus</i>	+	-	+	-
<i>Stuhlmannia zielae</i>	++++	+++	+++	+++++
<i>Stuhlmannia palustris</i>	+	+	+	+
<i>Gordiodrilus paski</i>	+	+	+	+

Groupe 1; 2; 3 et 4 (cf. Figure 43).

IV.3.2. Peuplements des vers de terre comme indicateurs des écosystèmes naturels

Nous avons appliqué l'IndVal à la typologie obtenue à partir de l'analyse multivariée des données des vers de terre du paragraphe ci-dessus (cf. paragraphe IV.3.1). Sur l'ensemble des 20 espèces de vers analysées et sur la base du dendrogramme obtenu, dix huit (18) espèces présentent des valeurs IndVal supérieures ou égales à 25%. Mais parmi ces 18 espèces, seulement 5 (soit une proportion de 25%) présentent des valeurs indicatrices significatives au seuil de probabilité de 5% (Figure 44) et sont indicatrices du groupe des milieux forestiers établi par le niveau hiérarchique 4 de la typologie ; ce sont *Dichogaster eburnea*, *D. saliens*, *D. mamillata*, *Stuhlmannia palustris* et *Millsonia nilesi*.

Nous avons étendu l'analyse aux 3 niveaux hiérarchiques précédents afin d'identifier les espèces de vers responsables des divisions à l'intérieur de chaque groupe. A cet effet, aucune espèce de vers de terre n'est indicatrice au niveau 1 de la partition. En effet, à ce niveau tous les types d'usages forment un seul groupe.

Au niveau 2, les relevés se subdivisent en deux groupes (forêts naturelles et autres milieux) en fonction de la richesse en litière. Cependant, seul le groupe des forêts naturelles associe quatre (4) espèces de vers indicatrices : une endogée *S. palustris* (90,1) et 3 épigées [*D. saliens* (81,5), *D. eburnea* (89,9) et *D. mamillata* (96,1)].

Au niveau 3 de la partition, les types d'usage des sols se répartissent en trois groupes (forêts naturelles, parcelles cultivées + jachères et autres milieux'). La tendance observée au niveau 2 s'observe encore au niveau 3 de la partition. Seul le groupe des forêts naturelles associe cinq (5) espèces de vers indicatrices : *M. nilesi* (62,3), *S. palustris* (81,3), *D. saliens* (69,1), *D. eburnea* (81,6) et *D. mamillata* (93,1) (Figure 44). Aucune espèce indicatrice n'est associée aux deux autres groupes.

L'évolution des valeurs IndVal au fur et à mesure que les groupes se subdivisent montre de fortes différences entre les 5 espèces. *M. nilesi* est la seule espèce de vers spécialiste (Figure 45a), sa valeur indicatrice augmente au fur et à mesure que les milieux sont subdivisés à l'intérieur des groupes. L'espèce *D. saliens* est généraliste (Figure 45b), sa valeur indicatrice est maximale quand tous les milieux sont rassemblés en un seul groupe. Toutefois, sa valeur indicatrice commence à diminuer dès que les milieux sont subdivisés en 2 groupes. Les espèces *D. eburnea*, *D. mamillata* et *S. palustris* présentent à peu près les mêmes caractéristiques (Figure 45c-e) que l'espèce *D. saliens*. Elles montrent une augmentation de leurs valeurs indicatrices du premier au deuxième niveau de partition, suivies ensuite d'une diminution au fur et à mesure que le niveau de partition augmente ; ce sont des espèces moins généralistes que *D. saliens*.

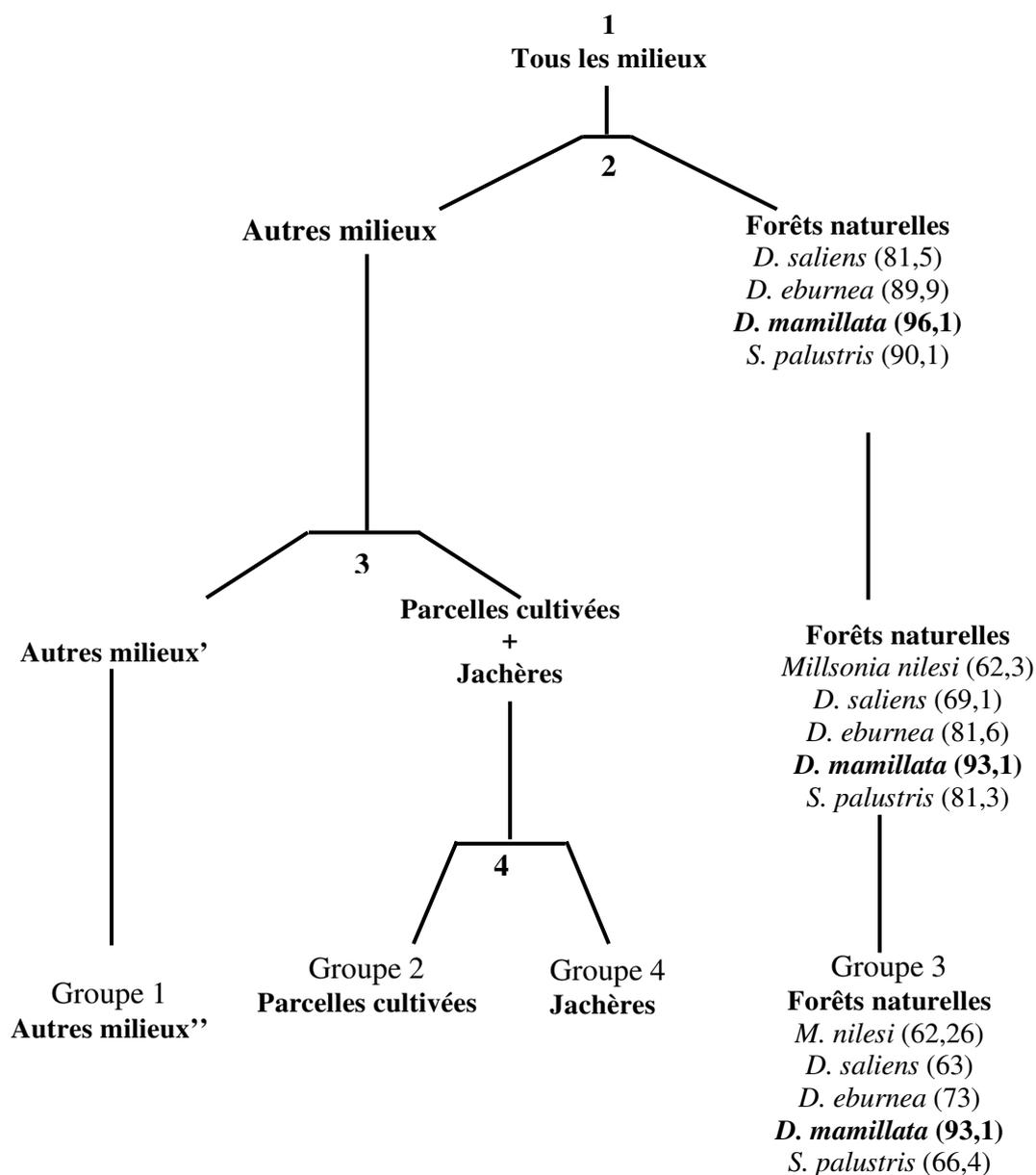


Figure 44 : Espèces indicatrices associées aux différents groupes de types d'usages des sols. Les valeurs IndVal sont entre parenthèses. Seules les valeurs significatives et supérieures ou égales à 25% sont représentées. L'espèce présentant une valeur indicatrice maximale pour le niveau hiérarchique considéré apparaît en gras.

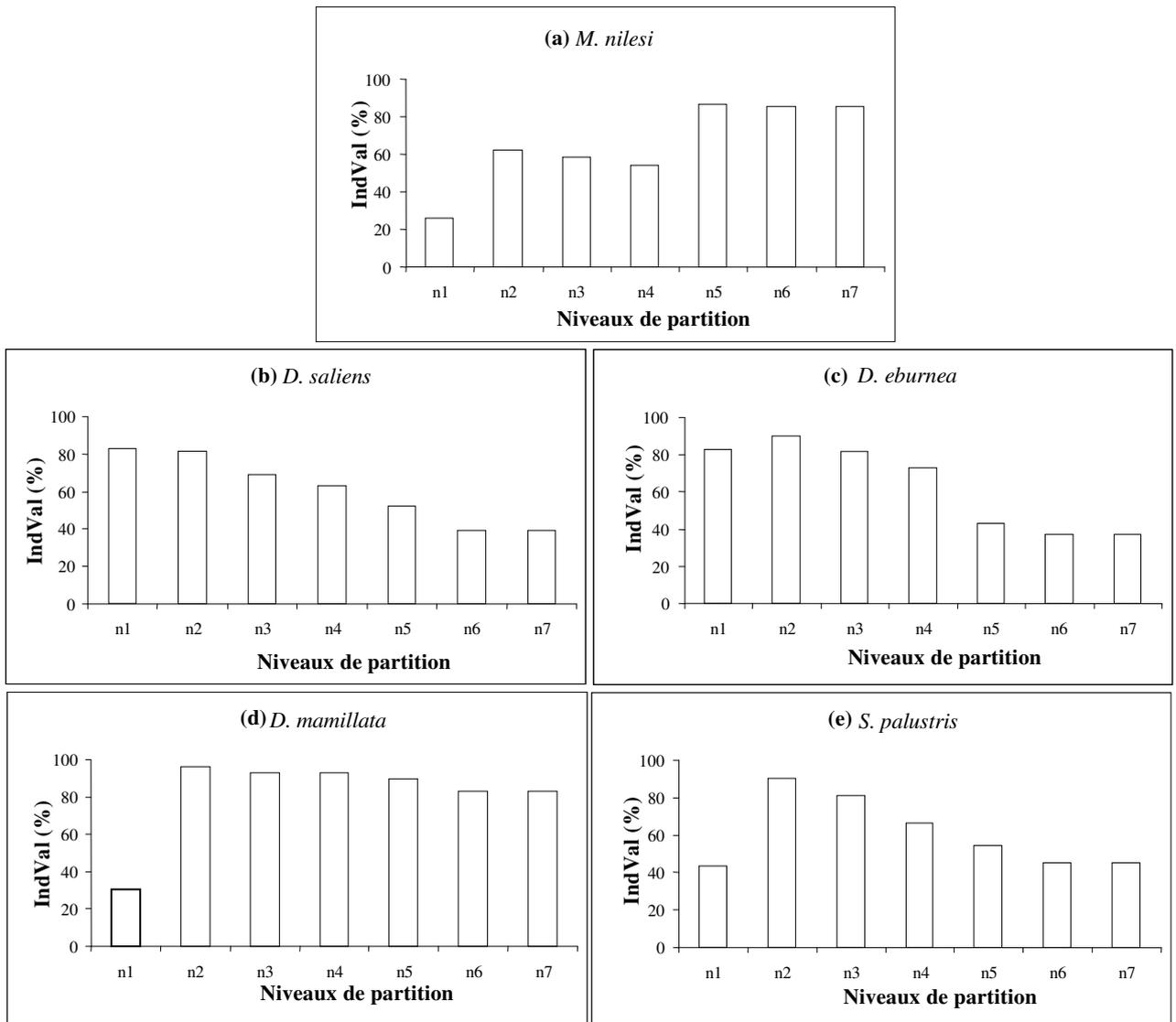


Figure 45 : Variation des valeurs IndVal des vers de terre indicateurs significatifs du groupe des forêts en fonction des niveaux de partitions.

La possibilité d'utiliser le niveau des genres pour la détermination de la valeur IndVal a été explorée dans le but de faciliter l'identification des vers indicateurs. A cet effet, les 20 espèces de vers de terre ont été regroupées au niveau du genre réduisant ainsi le nombre de variables à 7. L'analyse réalisée au 4^{ème} niveau hiérarchique sur les résultats de l'analyse multivariée (ACP) donne une classification des types d'usage des sols (Figure 46) sensiblement identique à celle obtenue avec le niveau espèce (cf. Figure 43).

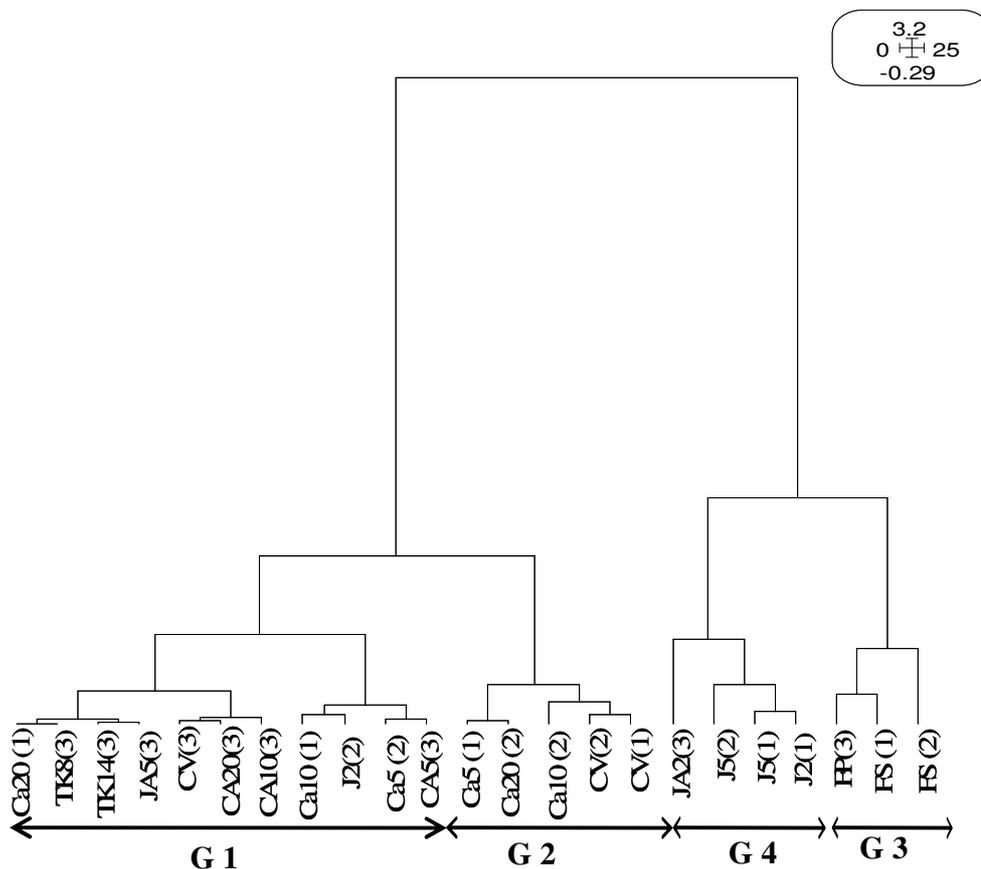


Figure 46 : Classification hiérarchique des 23 types d'usage des sols de l'étude en utilisant les données faunistiques regroupées au niveau du genre. G1 : groupe 1 ; G2 : groupe 2 ; G3 : groupe 3 et G4 : groupe 4.

L'analyse IndVal réalisée sur le tableau de données faunistiques a permis d'identifier un seul genre de vers (soit une proportion de 17%) indicateur ; il s'agit du genre *Dichogaster*. Ce genre est indicateur significatif aux niveaux de partition 2 et 3. Au niveau 2 de la partition, le genre *Dichogaster* (73,55) est indicateur du groupe formé par les forêts [FS(3), FS(1) et FS(2)] et les jachères [J2(1), J5(1), J5(2) et J2(3)]. A la partition 3, *Dichogaster* (57,35) est indicateur du groupe des forêts. A partir du niveau de partition 4, aucun genre de vers de terre n'est associé à un groupe.

IV.3.3. Discussion

L'étude de la typologie des modes d'usage des sols à l'échelle de la zone de Goulikao montre quatre (4) groupes différents sur la base de la biomasse faunistique. Cinq (5) espèces de vers de terre (*M. nilesi*, *Dichogaster saliens*, *D. eburnea*, *D. mamilatta* et *S. palustris*) ce sont révélées indicatrices uniquement du groupe défini par les forêts. Nos résultats révèlent ainsi que la biomasse des vers peut-être un indicateur approprié pour la surveillance de l'état des écosystèmes. Les vers de terre sont bien connus comme bioindicateurs des milieux forestiers dans un contexte d'intensification agricole à l'échelle du paysage (Rossi *et al.*, 2010). En effets, ces organismes sont très sensibles aux changements des conditions édaphiques, permettent l'évaluation de l'effet de la contamination des sols par des métaux lourds, les pesticides et sont de bons indicateurs de la perturbation des agrosystèmes par les activités anthropogéniques (Paoletti *et al.*, 1991 ; Jégou *et al.*, 2002 ; Nahmani *et al.*, 2006 ; Tondoh *et al.*, 2007). Nos résultats soulignent l'état favorable des conditions environnementales prévalant dans les écosystèmes forestiers. Ce sont des milieux caractérisés par une diversité de litière et une importante quantité de matière organique en décomposition (cf. Chapitre. IV.2.1). Tondoh *et al.* (2011) ont montré que le carbone organique du sol est l'un des principaux paramètres gouvernant les modifications du patron d'assemblage des vers de terre. En outre, les forêts sont des milieux ombragés avec une condition d'humidité propice à la bonne croissance et au dynamisme des vers (Muys & Granval, 1997).

Les cinq espèces de vers sont indicatrices de différentes manières ; *M. nilesi* constitue la seule espèce spécialiste des écosystèmes forestiers (valeur IndVal augmente avec la partition) tandis que *D. saliens*, *D. eburnea*, *D. mamilatta* et *S. palustris* sont des espèces généralistes (diminution de la valeur indicatrice le long de la partition) (Dufrêne & Legendre, 1997). La connaissance d'espèces spécialistes constitue un avantage pour l'orientation de la politique de conservation de la biodiversité du sol et la promotion une agriculture durable (Nahmani *et al.*, 2006) ; car leur raréfaction ou disparition entraîne la disparition des services écologiques irremplaçables qu'elles assurent (Larsen *et al.*, 2005). La présente étude a révélé que l'espèce de vers *M. nilesi* est spécialiste des milieux forestiers de la zone de Goulikao. Des résultats similaires ont été obtenus par Rossi *et al.* (2010) dans la région sud en Guyane française. Les travaux de ces auteurs ont montré que le ver *Pontoscolex corethrurus* était la seule espèce spécialiste de la forêt secondaire. Les forêts constituent en effet, des zones refuges utiles pour conserver la biodiversité résiduelle, et sont des sources de colonisation des écosystèmes environnants.

L'interprétation des résultats de l'Indval peut-être réalisée à deux niveaux taxonomiques différents : le genre et l'espèce à partir d'une liste réduite de taxons indicateurs. Certes, il existe une sensible similitude dans le classement des milieux obtenu à partir de chacun de ces niveaux taxonomiques. Toutefois, le niveau de l'espèce reste la meilleure résolution de bioindication comme déjà suggéré par Nahmani *et al.* (2006), car il revêt le meilleur pourcentage de taxons indicateurs, permet la détermination d'espèce spécialiste et ne pêche pas en généralisant dans l'attribution de la valeur Indval comme c'est le cas du niveau du genre. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le niveau du genre, contrairement au niveau de l'espèce, entraîne une perte d'information en regroupant plusieurs espèces dans un seul niveau taxonomique (genre). Le groupe résultant bien que phylogénétiquement correct car associant plusieurs individus appartenant au même genre, peut-être écologiquement dénué de sens (Nahmani *et al.*, 2006). En effet, *M. nilesi* s'est révélée comme la seule espèce spécialiste des écosystèmes forestiers lorsque l'on considère le niveau spécifique. Mais cette information est perdue lorsque l'on passe au niveau du genre où le genre *Dichogaster* qui ne regroupe que des espèces généralistes, se présente comme indicateur des forêts.

IV.3.4. Conclusion partielle

La présente étude a montré que les peuplements de vers de terre peuvent-être utilisés pour indiquer l'état de dégradation des écosystèmes dans un contexte d'intensification agricole. Contrairement au niveau du genre, le niveau spécifique s'est révélé comme le niveau de bioindication qui donne plus d'information. Nous arrivons à la conclusion selon laquelle l'espèce est le niveau taxonomique le plus pertinent dans les études de bioindication même si elle nécessite un effort soutenu d'identification, une connaissance accrue et beaucoup de temps.

A partir des observations du présent chapitre et de celles du précédent chapitre (cf. chapitre IV.2), nous allons dans la suite de notre étude, considérer les peuplements de vers de terre dans la construction d'un système synthétique indicateur de la qualité des sols et montrer que ces organismes, à travers leur abondance peuvent-être des indicateurs biologiques de la qualité des sols.

IV.4. ELABORATION D'UN INDICATEUR MULTIFONCTIONNEL DE LA QUALITE DU SOL A PARTIR DES PEUPELEMENTS DE VERS DE TERRE : INDICE GENERAL DE LA QUALITE DES SOLS (IGQS)

IV.4.1. Elaboration de l'IGQS des sols du site "Petit Bouaké"

IV.4.1.1. Recherche des variables de différenciation des milieux

IV.4.1.1.1. Peuplements des vers de terre

Les deux premiers axes de l'ACP des biomasses des 20 espèces de vers récoltées dans les types d'usage des sols expliquent 34,1% de la variabilité totale. L'axe 1 du cercle de corrélation explique 20,4% de l'inertie totale et le deuxième axe 13,7% (Figure 47a). Le cercle de corrélation révèle sur la base de la contribution relative de chaque espèce sur les axes, que le côté positif du premier axe est principalement caractérisé par les espèces *D. saliens*, *D. eburnea*, *S. palustris*, *M. nilesi*, *D. baeri*, *D. terraenigrae* et *S. zielae* et le côté négatif par *M. omodeoi*, *H. africanus* et *G. paski*. L'axe 2 est représenté sur son côté positif par *D. lamottei*, *S. palustris* et *S. compositus*. Le côté négatif de l'axe est caractérisé principalement par *S. zielae* et *D. terraenigrae*.

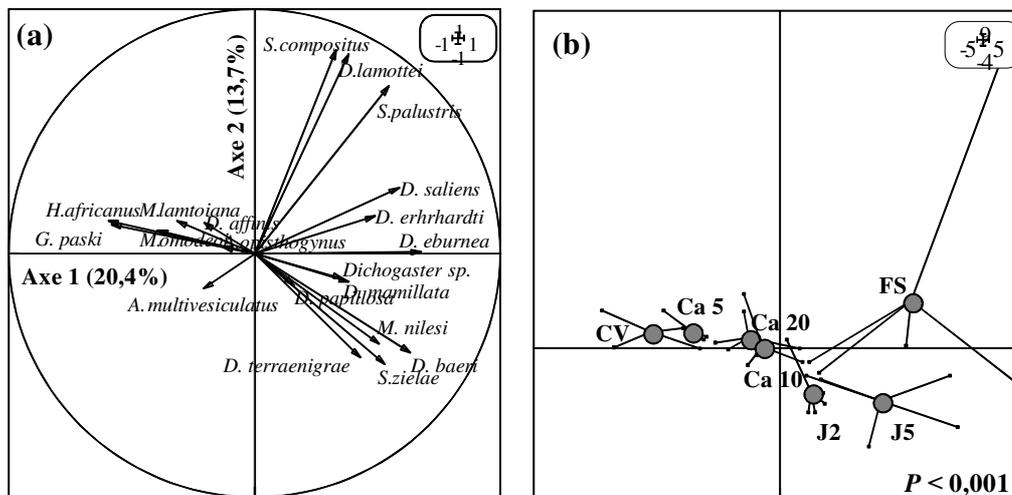


Figure 47 : Analyse en Composantes Principales réalisée sur la biomasse des peuplements des vers de terre : (a) cercle de corrélation des variables et (b) plan factoriel 1-2. FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

La carte factorielle des relevés permet de repérer sur le plan 1-2 un gradient d'intensification agricole reflété dans la simplification de la diversité végétale et la diversité d'habitats. Quatre groupes de milieux se distinguent le long de l'axe 1. Le premier groupe

situé à l'extrémité droite de l'axe est constitué par la forêt secondaire. Le groupe formé par les parcelles de jachère de 2 et 5 ans suit la forêt, vient ensuite le groupe des cacaoyères de 10 et 20 ans. Le dernier groupe situé à l'extrême gauche de l'axe 1 est formé par la culture vivrière et la cacaoyère de 5 ans. Trois groupes se distinguent suivant l'axe 2. Il y a d'une part, le milieu naturel (forêt), le groupe formé de milieux anthropisés (cacaoyères et cultures vivrières) et d'autre part le groupe formé des écosystèmes en reconstitution (jachères). Le test de permutation montre que cette ordination est significative ($p < 0,001$) (Figure 47b).

IV.4.1.1.2. Matière organique

Les axes 1 et 2 de l'analyse des variables de la matière organique (C organique, N total et rapport C/N) totalisent 99,7% de l'inertie totale. Les variables C et N sont positivement corrélées à l'axe 1 (82,6%), tandis que le ratio C/N est négativement lié. Seul le ratio C/N est fortement corrélé à l'axe 2 (17,6%) (Figure 48a). Les interprétations s'articuleront autour de l'axe 1 qui détient l'essentiel de l'information.

La projection des milieux dans le plan factoriel 1-2 (Figure 48b) révèle une ségrégation significative des types d'usage des sols en 3 groupes suivant l'axe 1. Le groupe 1 est composé de jachères, le groupe 2 de la forêt et des cacaoyères de 10 et 20 ans, et enfin le groupe 3 composé de la cacaoyère de 5 ans et la culture vivrière. L'axe 1 sépare les milieux en fonction de la teneur du sol en C organique et N total. Cet axe définit de la gauche vers la droite, un gradient des teneurs de C et N.

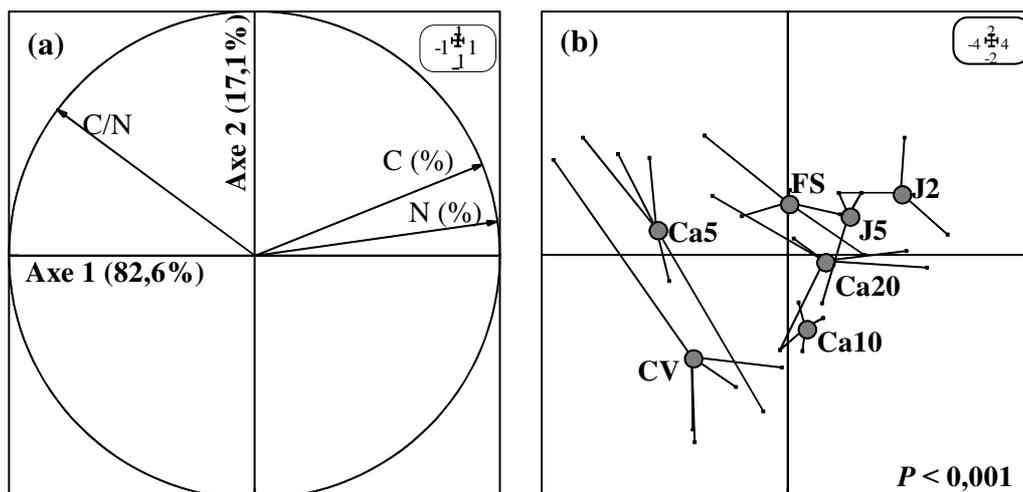


Figure 48 : Analyses en Composantes Principales des variables de la matière organique : (a) Cercle de corrélation et (b) carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2.

IV.4.1.1.3. Paramètres chimiques

Les axes 1 et 2 de l'analyse expriment respectivement 38,6 et 22,6% de l'inertie totale. Le premier axe separe les types d'usage des sols en fonction des concentrations de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et la CEC. Le second axe separe les milieux qui ont de fortes teneurs en P (Olsen) et Na^+ des milieux caractérisés par des teneurs plus faibles en ces éléments chimiques (Figure 49a). La projection des milieux dans le plan factoriel montre que l'axe 1 sépare le groupe des jachères et de la cacaoyère de 20 ans de celui formé par la forêt, les cacaoyères de 5 et 10 ans et la culture vivrière. Suivant l'axe 2, il y a une opposition entre le groupe de la jachère de 5 ans, la forêt, la cacaoyère de 10 ans, la culture vivrière et le groupe des cacaoyères de 5 et 20 ans et la jachère de 2 ans (Figure 49b).

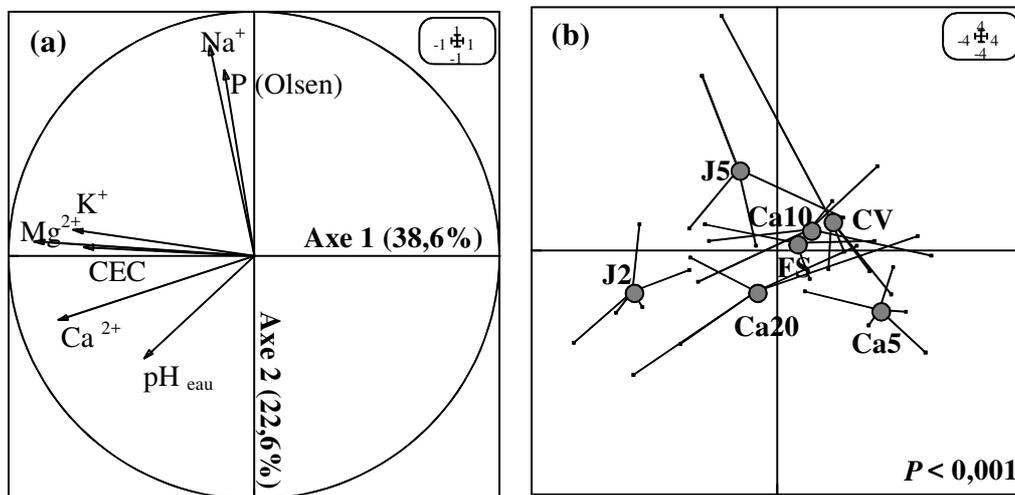


Figure 49 : Analyses en Composantes Principales des variables chimiques : (a) Cercle de corrélation et (b) carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2. . FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

IV.4.1.1.4. Paramètres physiques

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 65,6 et 25,6% de la variance totale, soit 91,2% de l'inertie totale. L'axe 1 détient l'essentiel de l'inertie totale. Les variables teneur en eau et résistance à la pénétration sont négativement liées à l'axe 1, tandis que seule la densité apparente est positivement liée (Figure 50a). Toutefois, les variables teneur en eau et résistance à la pénétration sont fortement corrélées à l'axe 1.

Le plan factoriel 1-2 révèle que l'axe 1 separe les milieux en 3 groupes en fonction de la teneur en eau et la compaction du sol : le groupe de la jachère de 5 ans et des cacaoyères de

10 et 20 ans, celui formé par la forêt et la jachère de 2 ans et le troisième groupe formé par la culture vivrière et la plus jeune cacaoyère (Figure 50b).

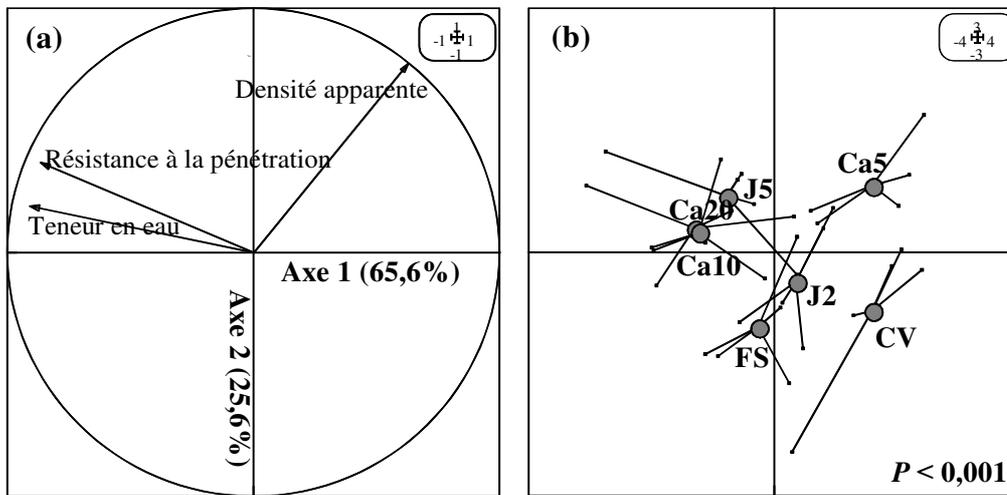


Figure 50 : Analyses en Composantes Principales des variables physiques : (a) Cercle de corrélation et (b) carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2.

IV.4.1.1.5. Paramètres morphologiques

Les axes 1 et 2 expliquent respectivement 26 et 16,4% de la variance totale entre les paramètres morphologiques des sols ; soit une inertie totale de 42,4%. A l'exception des variables litière, pousse et agrégats physiques de grande taille qui sont négativement liées, toutes les autres variables sont positivement corrélées à l'axe 1. Les variables pousses, racines, morceaux de bois et graviers sont négativement corrélées à l'axe 2, tandis que les variables agrégats biogéniques, physiques, invertébrés et litière sont positivement corrélés à cet axe (Figure 51a). Toutefois, les variables invertébrés, agrégats biogéniques de taille moyenne et grande sont fortement corrélés à l'axe 1. Les agrégats physiques de taille moyenne, les pousses et la litière sont fortement corrélés à l'axe 2.

La projection des types d'usage des sols dans le plan factoriel 1-2 révèle une ségrégation significative en 3 groupes : un groupe composé par les cacaoyères caractérisées par une litière abondante, un autre groupe formé par les jachères et la forêt caractérisées par une abondance d'invertébrés et de structures biogéniques et enfin le dernier groupe formé par la culture vivrière caractérisé par une abondance de jeunes pousses (Figure 51b).

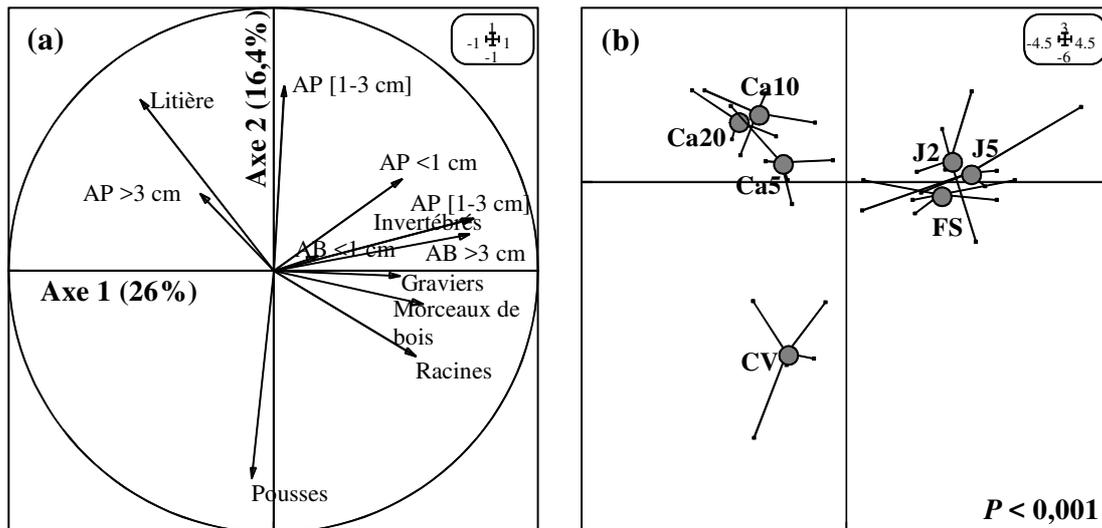


Figure 51 : Analyses en Composantes Principales des variables morphologiques : (a) Cercle de corrélation et (b) carte factorielle montrant l'ordination des types d'usage des sols dans le plan 1-2. AB : agrégats biogéniques ; AP : agrégats physiques ; < 1 cm : petite taille ; [1-3 cm] : taille moyenne ; > 3 cm : grande taille.

IV.4.1.6. Analyses de co-inertie

Les analyses de co-inertie réalisées entre les paires de jeux de variables en vue de déterminer les relations entre les variables montrent qu'il existe une corrélation entre tous les jeux de variables pris deux à deux (Tableau XXIII^o). Toutefois, la biomasse des peuplements des vers de terre est plus fortement liée aux autres paramètres de la qualité du sol.

Tableau XXIII : Analyses de co-inertie entre chaque paire de jeux variables

Variables	Facteurs (%)		Significativité*
	F1	F2	
Vers de terre/matière organique	93,1	6,8	p < 0,001
Vers de terre/chimiques	54,3	21,3	p < 0,001
Vers de terre/physiques	78,1	18,4	p < 0,001
Vers de terre/morphologiques	55,1	15,6	p < 0,001
Matière organique/chimiques	98,7	1,3	p < 0,001
Matière organique/physiques	99,8	2	p < 0,025
Matière organique/morphologiques	92,8	7	p < 0,001
Chimiques/physiques	93,9	5	p < 0,038
Chimiques/morphologiques	63	22,6	p < 0,002
Physiques/morphologiques	76	19,2	p < 0,001

*Test de Monté Carlo (1000 permutations)

IV.4.1.2. Sélection des variables discriminant mieux les types d'usage des sols

Les variables pertinentes de chaque groupe de la qualité du sol sont rétenuées à partir des résultats des ACP. Les variables discriminantes sélectionnées sont celles dont la contribution relative (en valeur absolue) est supérieure ou égale à la moitié de la contribution maximale sur les deux premiers axes définis par l'ACP.

IV.4.1.2.1. Peuplements des vers de terre

Onze (11) espèces de vers de terre ont été sélectionnées pour le calcul du sous-indicateur des peuplements des vers. Les espèces rétenuées sont suivies d'un astérisque (Tableau XXIV).

Tableau XXIV : Contributions relatives des espèces de vers sur les facteurs (F) 1 et 2 de l'ACP.

Variables	Facteurs	
	F1	F2
<i>Millsonia lamtoiana</i>	-999	173
<i>Millsonia omodeoi</i>	-1551	86
<i>Millsonia nilesi*</i>	2574	-1378
<i>Dichogaster baeri*</i>	3988	-1644
<i>Dichogaster terraenigrae</i>	1836	-1826
<i>Dichogaster saliens*</i>	3454	721
<i>Dichogaster erhrhardti*</i>	2396	227
<i>Dichogaster lamottei*</i>	1455	6644
<i>Dichogaster papillosa</i>	263	-171
<i>Dichogaster eburnea*</i>	4601	0
<i>Dichogaster mamillata</i>	1288	-106
<i>Dichogaster affinis</i>	-425	155
<i>Dichogaster sp.</i>	1470	-141
<i>Hyperiodrilus africanus*</i>	-3540	175
<i>Scolecillus compositus*</i>	1101	6942
<i>Stuhlmannia zielae*</i>	2809	-2055
<i>Stuhlmannia palustris*</i>	2992	4679
<i>Agastrodrilus multivesiculatus</i>	-427	-215
<i>Agastrodrilus opisthogynus</i>	-169	6
<i>Gordiodrilus paski*</i>	-3401	140
	4601/2 = 2300,5	6942/2 = 3471

(*) Espèce sélectionnée qui différencie mieux les types d'usage des sols

IV.4.1.2.2. Matière organique

Toutes les variables de la matière organique discriminant mieux les types d'usage des sols (Tableau XXV). Trois variables dont le C organique (85,8%), N total (96,6%) et le ratio C/N (64,25%) ont été sélectionnées suivant l'axe 1 et une seule variable choisie (C/N : 35,69%) le long de l'axe 2.

Tableau XXV : Contributions relatives des variables de la matière organiques sur les facteurs (F) 1 et 2 de l'ACP.

Variables	Facteurs	
	F1	F2
C organique*	8580	1383
N total*	9660	185
C/N*	-6425	3569
	9660/2 = 4830	3569/2 = 1784,5

(*) Variable de la matière organique sélectionnée qui différencie mieux les types d'usage des sols

IV.4.1.2.3. Paramètres chimiques

Sur les sept variables chimiques, six (6) ont été retenues pour le calcul du sous-indicateur de la qualité chimique des sols. Il s'agit notamment du P (Olsen), CEC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ (Tableau XXVI). Les contributions relatives de la CEC, Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ sont respectivement de 48,03 ; 63,39 ; 79,82 et 54,10% sur le premier facteur de l'analyse multivariée. Les contributions du P (olsen) et Na^+ sont respectivement de 57,98 et 74,05% sur le facteur 2.

Tableau XXVI : Contributions relatives des variables chimiques sur les facteurs 1 et 2

Variables	Facteurs	
	F1	F2
P (Olsen)*	-142	5789
pH _{eau}	-2004	-1784
CEC*	-4803	12
Ca^{2+} *	-6339	-703
Mg^{2+} *	-7982	33
K^+ *	-5410	109
Na^+ *	-331	7405
	7982/2 = 3991	7405/2 = 3702,5

(*) Variable chimique sélectionnée qui différencie mieux les types d'usage des sols

IV.4.2.2.4. Paramètres physiques

Toutes les 3 variables de la qualité physique ont été sélectionnées (Tableau XXVII). Deux variables dont la teneur en eau (85,16%) et la résistance à la pénétration (74,78%) ont été sélectionnées suivant l'axe 1, tandis qu'une seule variable est choisie (densité apparente : 59,78%) le long de l'axe 2.

Tableau XXVII : Contributions relatives des variables physiques sur les facteurs 1 et 2.

Variables	Facteurs	
	F1	F2
Densité apparente*	3972	5978
Teneur en eau*	-8216	357
Résistance à la pénétration*	-7478	1335
	8216/2 = 4108	5978/2 = 2989

(*) Variable physique sélectionnée qui différencie mieux les types d'usage des sols

IV.4.1.2.5. Paramètres morphologiques

Sur un total de 12 variables, huit à savoir les agrégats biogéniques de taille moyenne et grande, les agrégats physiques de taille moyenne, les racines, les morceaux de bois morts, les invertébrés, les pousses et la litière différencient mieux les types d'usage des sols et ont été sélectionnées pour le calcul du sous-indicateur de la morphologie du sol (Tableau XXVIII). Les variables de la morphologie sélectionnées suivant le premier axe sont : les agrégats biogéniques de taille moyenne (56,95%) et grande (54,84%), les racines (28,75%), les morceaux de bois (31,77%) et invertébrés (56,34%). Suivant l'axe 2, l'on note les agrégats physiques de taille moyenne (48,99%), les pousses (62,6%) et la litière (42,26%).

Tableau XXVIII : Contributions relatives des variables morphologiques sur les facteurs 1 et 2.

Variables	Facteurs	
	F1	F2
Agrégats biogéniques < 1 cm	278	28
Agrégats biogéniques [1-3 cm]*	5695	391
Agrégats biogéniques > 3 cm*	5484	183
Agrégats physiques < 1 cm	2358	1199
Agrégats physiques [1-3 cm]*	16	4899
Agrégats physiques > 3 cm	-750	850
Racines*	2875	-1067
Morceaux de bois*	3177	-167
Invertébrés*	5634	383
Pousses*	-64	-6260
Litière*	-2538	4226
Graviers	2287	-4
	5695/2 = 2847,5	6260/2 = 3130

(*) Variable morphologique sélectionnée différenciant mieux les types d'usage des sols

IV.4.1.3. Calcul des sous-indicateurs de la qualité des sols

Les sous indicateurs de chaque groupe de la qualité du sol ont été calculés à partir des variables retenues. Chacun des 5 sous-indicateurs (SI_q) de la qualité est la somme des n variables (v₁-v_n) retenues multipliée par leurs contributions relatives (w₁-w_n) sur les deux premiers axes de l'ACP :

$$SI_q : v_1 * w_1 + v_2 * w_2 + \dots + v_n * w_n$$

Au cours du calcul, les valeurs des variables sont réduites dans un intervalle de 0,1 à 1 à l'aide de la formule homothétique suivante : $Y = 0,1 + ((x-b)/(a-b)) * 0,9$ où Y = valeur de la variable après transformation ; x = variable à transformer ; a = valeur maximale de la variable ; b = valeur minimale de la variable.

Pour les variables telles que la densité apparente et les 3 classes d'agrégats physiques, dont les valeurs augmentent quand le sol est de mauvaise qualité, nous avons utilisé une formule homothétique opposée : $Y = 1,1 - 0,1 + (((x-b)/(a-b)) * 0,9)$.

Le Tableau XXIX présente les valeurs des sous-indicateurs calculés pour chaque type d'usage des sols. Les valeurs des sous-indicateurs de la matière organique, des caractéristiques chimiques et de la morphologie sont plus élevées dans les deux parcelles de jachère.

Tableau XXIX : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "Petit Bouaké"

Sous-indicateurs	Types d'usage des sols						
	FS	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV
Vers de terre	0,53	0,29	0,29	0,23	0,4	0,31	0,15
Matière organique	0,67	0,72	0,64	0,33	0,81	0,93	0,36
Caractéristiques chimiques	0,55	0,57	0,54	0,25	0,77	0,84	0,50
Caractéristiques physiques	0,67	0,36	0,36	0,43	0,31	0,60	0,75
Morphologie	0,59	0,28	0,37	0,32	0,63	0,60	0,27

FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols.

La forêt affiche en général des valeurs intermédiaires des sous-indicateurs des peuplements des vers (0,53), de la matière organique (0,67), la qualité chimique (0,55), physique (0,67) et la morphologie (0,59). Toutefois elle possède la plus grande valeur du sous-indicateur des peuplements des vers de terre.

Les cacaoyères affichent de faibles valeurs des sous-indicateurs des communautés des vers, de la qualité physique et de la morphologie. La cacaoyère de 5 ans particulièrement possède de

petites valeurs des sous-indicateurs des peuplements des vers (0,23), la matière organique (0,33), la qualité chimique (0,25), physique (0,43) et la morphologie (0,32).

A l'exception du sous-indicateur de la qualité physique (0,75) et chimique (0,5), la culture vivrière possède les plus petites valeurs des sous-indicateurs des peuplements des vers de terre (0,15), la matière organique (0,36) et la morphologie (0,27).

IV.4.1.4. Formulation et calcul de l'IGQS des types d'usage des sols

Une ACP est ensuite réalisée sur l'ensemble des valeurs des sous-indicateurs en vue de déterminer la contribution relative de chaque sous-indicateur à la formation des deux premiers axes et les inerties expliquées par les facteurs 1 et 2. Pour chaque sous-indicateur, une constante est obtenue en réalisant la somme des produits entre la contribution relative de chaque sous-indicateur sur les facteurs 1 et 2 et le pourcentage d'inertie expliquée par les facteurs respectifs (Tableau XXX).

Tableau XXX : Contribution et inertie de chaque sous-indicateur aux facteurs 1 et 2

Sous-indicateurs	Contributions		Inertie		Constante
	F1	F2	F1	F2	
Vers de terre	3918	-3109	0,49	0,23	1,18
Matière organique	7752	677	0,49	0,23	3,91
Caractéristiques chimiques	6179	1047	0,49	0,23	3,24
Caractéristiques physiques	-65	-6078	0,49	0,23	-1,43
Morphologie	6313	-618	0,49	0,23	2,92

Finalement, l'IGQS est formulé dans le site "Petit Bouaké" de la manière suivante :

$$IGQS = 1,18SI_{vdt} + 3,91SI_{mo} + 3,24SI_{cchim} - 1,43SI_{cphy} + 2,92SI_{morph}$$

vdt: peuplements des vers de terre

mo : matière organique

cchim : caractéristiques chimiques

cphy : caractéristiques physiques

morph : morphologie

Une fois formulé, l'IGQS est appliqué aux 7 types d'usage des sols du site "Petit Bouaké" enfin de calculer leurs valeurs indicielles. Les sols des jachères obtiennent des valeurs de l'IGQS supérieures à 0,70 (0,8±0,03 et 0,79±0,06, respectivement pour les jachères de 2 ans et 5 ans), indiquant une bonne qualité des sols. Alors que les sols sous culture vivrière (0,33±0,08) et cacaoyère de 5 ans (0,31±0,03) sont de mauvaise qualité (IGQS <

0,55). Des valeurs moyennes de l'IGQS ($0,55 \leq \text{IGQS} < 0,7$) s'observent en forêt ($0,62 \pm 0,05$) et dans les cacaoyères de 20 ans ($0,57 \pm 0,05$) et de 10 ans ($0,55 \pm 0,04$). L'indicateur général de la qualité des sols varie de manière significative entre ces différents types d'usage des sols (Anova 1, $p < 0,001$) (Figure 52).

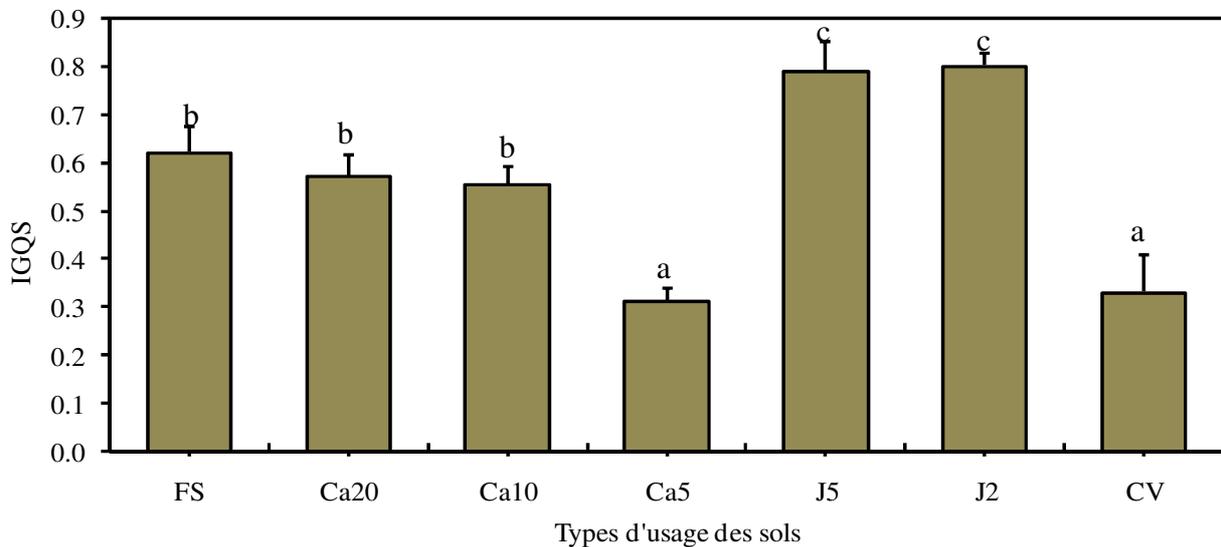


Figure 52 : Variation de l'IGQS à travers les différents types d'usage des sols du site "Petit Bouaké". FS : Forêt secondaire, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (Anova 1, seuil de probabilité 5%).

IV.4.2. Validation de l'IGQS avec les données des sites " Djè Koffikro" et "N'Kroiêdjô"

En procédant par la même méthodologie appliquée dans le site "Petit Bouaké", nous obtenons d'abord le tableau XXXI des analyses de co-inertie entre chaque paire de jeux de variables. Les résultats des analyses de co-inertie réalisées entre les dix paires de variables de la qualité des sols de "Djè Koffikro" ne révèlent que cinq (5) analyses significatives. En effet, la co-structure n'est significative entre les peuplements de vers de terre, la matière organique et la qualité chimique, entre la matière organique, les caractéristiques chimiques et physiques, et entre les caractéristiques chimiques et physiques.

Sur le site "N'Kroiêdjô", toutes les analyses de co-inertie sont significatives à l'exception des peuplements des vers avec la morphologie et la matière organique avec la morphologie. De manière similaire au site "Petit Bouaké", les peuplements des vers de terre sont plus fortement liés à la matière organique et aux autres paramètres physico-chimiques du sol.

Tableau XXXI : Analyses de co-inertie entre chaque paire de jeux variables

Variables	Facteurs (%)		Significativité*
	F1	F2	
Site "Djè Koffikro"			
Vers de terre/matière organique	72,36	27,38	p < 0,001
Vers de terre/chimiques	55,22	27,4	p < 0,034
Vers de terre/physiques	75	17,84	p < 0,157
Vers de terre/morphologiques	40,7	21,65	p < 0,295
Matière organique/chimiques	92,9	7,1	p < 0,001
Matière organique/physiques	96,36	4,1	p < 0,001
Matière organique/morphologiques	60,2	39,1	p < 0,648
Chimiques/physiques	92,04	7,4	p < 0,001
Chimiques/morphologiques	66,31	18,76	p < 0,689
Physiques/morphologiques	65,66	25,58	p < 0,509
Site "N'Kroiédjô"			
Vers de terre/matière organique	80,5	19,42	p < 0,001
Vers de terre/chimiques	52,11	33,25	p < 0,001
Vers de terre/physiques	57,79	32,59	p < 0,001
Vers de terre/morphologiques	28,99	23,18	p < 0,301
Matière organique/chimiques	97,77	2,22	p < 0,032
Matière organique/physiques	99,74	0,25	p < 0,004
Matière organique/morphologiques	87,2	12,75	p < 0,054
Chimiques/physiques	89,42	9,8	p < 0,028
Chimiques/morphologiques	40,40	37,88	p < 0,005
Physiques/morphologiques	53,8	42,59	p < 0,008

*Test de Monté Carlo (1000 permutations)

Les valeurs des sous-indicateurs calculés pour chaque milieu sont présentées par les Tableaux XXXII & XXXIII. Tous les types d'usage des sols de "Djè Koffikro" affichent des valeurs très élevées du sous- indicateur de la biodiversité des vers de terre ; les valeurs sont supérieures à 0,70 (Tableau XXXII). La forêt affiche les plus fortes valeurs des sous-indicateurs de la matière organique (0,83), de la qualité chimique (0,87) et de la morphologie (0,79). Elle possède cependant une faible valeur du sous-indicateur de la qualité physique.

Les plus petites valeurs des sous-indicateurs de la matière organique s'observent dans la culture vivrière (0,36), la jachère de 5 ans (0,45) et la plus jeune cacaoyère (0,45). Les cacaoyères de 20 ans (0,44), de 10 ans (0,33) et la culture vivrière (0,38) possèdent les plus faibles valeurs du sous-indicateur de la qualité chimique. Alors que la jeune cacaoyère (0,28) et le champ de vivrier (0,36) affichent les plus petites valeurs des sous-indicateurs de la morphologie et de la qualité physique, respectivement.

Tableau XXXII : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "Djè Koffikro"

Sous-indicateurs	Types d'usage des sols						
	FS	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV
Vers de terre	0,79	0,93	0,92	0,90	0,93	0,90	0,73
Matière organique	0,83	0,79	0,66	0,45	0,45	0,67	0,36
Caractéristiques chimiques	0,87	0,44	0,33	0,63	0,72	0,52	0,38
Caractéristiques physiques	0,38	0,52	0,55	0,56	0,47	0,56	0,36
Morphologie	0,79	0,47	0,47	0,28	0,65	0,73	0,32

Sur le site "N'Kroiêdjô", les valeurs du sous-indicateur des peuplements des vers de terre sont très élevées en forêt (0,92), dans la teckeraie de 14 ans (0,93), la cacaoyère de 20 ans (0,96), la cacaoyère de 5 ans (0,9), les jachères de 5 ans (0,91) et de 2 ans (0,95) (Tableau XXXIII). La forêt a les plus fortes valeurs des sous-indicateurs de la matière organique (0,76), de la qualité chimique (0,9) et de la morphologie (0,88).

Tableau XXXIII : Sous-indicateurs de la qualité des types d'usage des sols de "N'Kroiêdjô"

Sous-indicateurs	Types d'usage des sols								
	FS	TK14	TK8	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV
Vers de terre	0,92	0,93	0,67	0,96	0,66	0,90	0,91	0,95	0,56
Matière organique	0,76	0,22	0,61	0,39	0,35	0,52	0,42	0,32	0,22
Chimiques	0,9	0,24	0,76	0,32	0,35	0,27	0,77	0,73	0,31
Physiques	0,56	0,62	0,84	0,55	0,54	0,26	0,90	0,29	0,36
Morphologie	0,88	0,73	0,75	0,83	0,83	0,81	0,73	0,71	0,69

Enfin, la validation de l'IGQS sur les sites de "Djè Koffikro" et de "N'Kroiêdjô" a généré les formulations suivantes :

- Site "Djè Koffikro"

$$\text{IGQS} = 1,26\text{SI}_{\text{vdt}} + 0,35\text{SI}_{\text{mo}} - 2,01\text{SI}_{\text{cchim}} + 0,22\text{SI}_{\text{cphy}} - 2,39\text{SI}_{\text{morph}}$$

vdt: peuplements des vers de terre

mo : matière organique

cchim : caractéristiques chimiques

cphy : caractéristiques physiques

morph : morphologie

Les sols de forêt ($0,77 \pm 0,11$), des cacaoyères de 20 ans ($0,70 \pm 0,07$) et 10 ans ($0,75 \pm 0,06$) sont de bonne qualité (Figure 53a) ; les valeurs de l'IGQS sont supérieures ou égales à 0,70. Les sols de la culture vivrière ($0,23 \pm 0,03$), de la cacaoyère de 5 ans ($0,43 \pm 0,09$) et de la jachère de 2 ans ($0,48 \pm 0,07$) sont de qualité mauvaise. La jachère de 5 ans ($0,58 \pm 0,04$) possède une valeur moyenne de l'IGQS. L'indicateur IGQS varie de manière significative entre les différents types d'usage des sols du site "Djè Koffikro" (Anova 1, $p < 0,001$).

- Site "N'Kroiêdjô"

$$\text{IGQS} = -0,37\text{SI}_{\text{vdt}} + 2,13\text{SI}_{\text{mo}} + 2,44\text{SI}_{\text{cchim}} + 1,79\text{SI}_{\text{cphy}} - 0,01\text{SI}_{\text{morph}}$$

Les sols du site "N'Kroiêdjô" se répartissent en deux groupes diamétralement opposés (Figure 53b). D'un côté nous avons les milieux dont les sols sont de bonne qualité, il s'agit de la forêt ($0,9 \pm 0,05$), la teckeraie de 8 ans ($0,88 \pm 0,03$) et de la jachère à *C. odorata* de 5 ans ($0,8 \pm 0,03$). Et de l'autre côté, se présentent les sols de mauvaise qualité en l'occurrence la culture vivrière ($0,23 \pm 0,03$), la teckeraie de 14 ans ($0,26 \pm 0,02$), les cacaoyères (Ca20 : $0,37 \pm 0,04$; Ca10 : $0,39 \pm 0,05$ et Ca5 : $0,29 \pm 0,05$) et la jachère de 2 ans ($0,46 \pm 0,08$). Les valeurs de l'IGQS varient significativement d'un type d'usage des sols à un autre (Anova 1, $p < 0,001$).

Les valeurs des sous-indicateurs diffèrent d'un site d'étude à un autre. Il en est de même de la formulation de l'indicateur IGQS qui est spécifique à chaque site. Toutefois la méthodologie d'élaboration reste la même quelque soit le site d'étude.

IV.4.3. Relations entre l'IGQS et l'abondance globale des vers de terre

Nous avons réalisé une série de regressions simples entre l'indicateur IGQS et la densité et la biomasse globale des vers de terre dans chaque site d'étude (Tableau XXXIV).

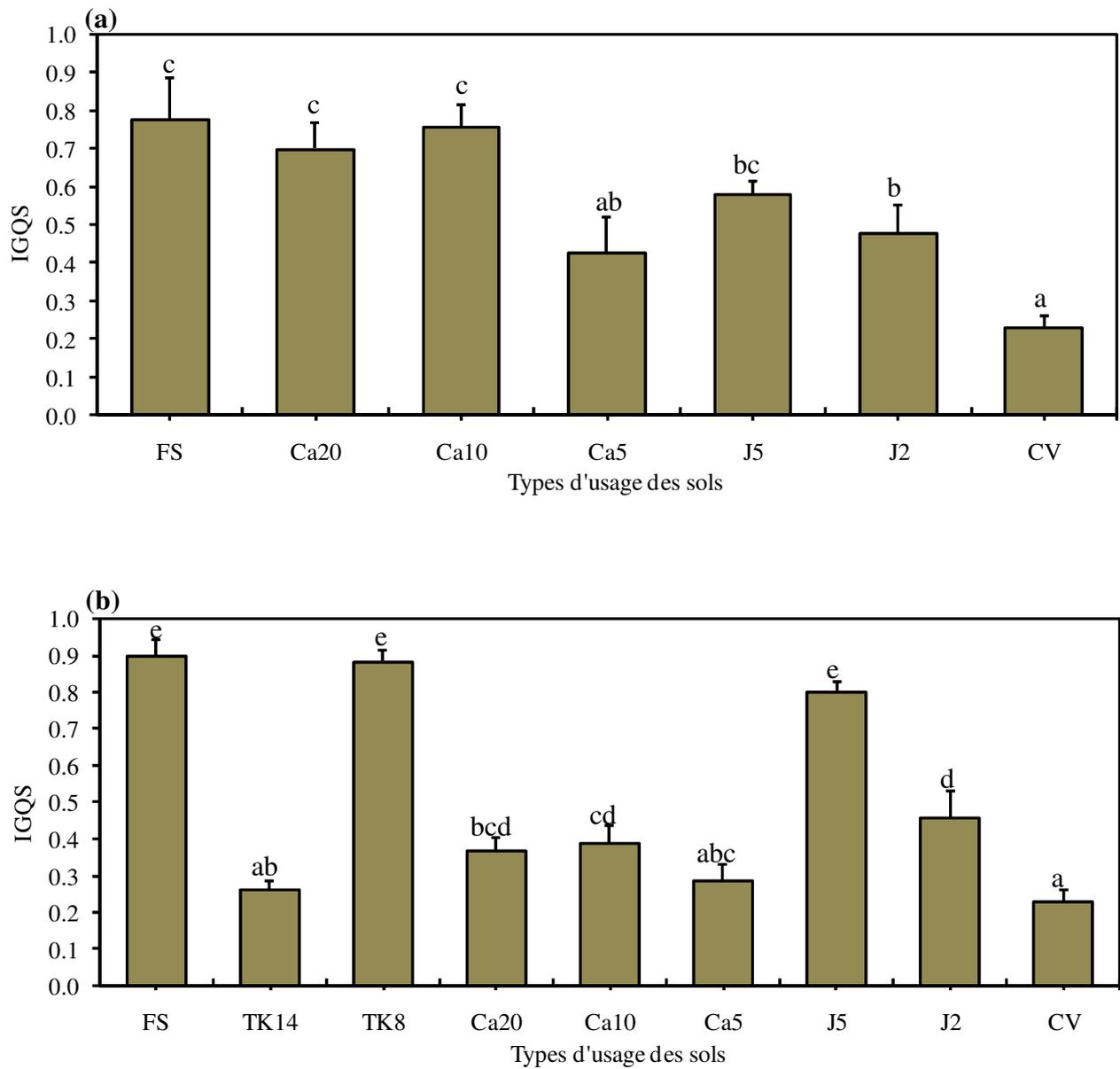


Figure 53 : Variation de l'IGQS à travers les différents types d'usage des sols : (a) site "Djè Koffikro" et (b) site "N'Kroiêdjô". FS : Forêt secondaire, TK : Teckeraie, Ca : Cacaoyère, J : Jachères, CV : Culture vivrière, les chiffres qui suivent les lettres correspondent aux différents âges (années) des types d'usage des sols. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (Anova 1, seuil de probabilité 5%).

Les résultats révèlent qu'à l'exception de la biomasse globale du site "N'Kroiêdjô", les valeurs octroyées par l'IGQS sont reliées aux variations de l'abondance des vers de terre. En effet, les corrélations sont significatives entre l'IGQS et l'abondance des vers des sites "Petit Bouaké" et "Djè Koffikro". Ainsi, une augmentation de la valeur de l'indice indiquerait l'augmentation de la densité et de la biomasse des vers de terre dans ces sites. En revanche, sur le site "N'Kroiêdjô", seule la densité augmente significativement avec l'IGQS.

Tableau XXXIV : Corrélations entre l'IGQS et les paramètres de l'abondance globale des vers de terre.

	Equations	R	N	P (test de Spearman)
Site "Petit Bouaké"				
Densité	$Y = 214,04X + 6,1153$	0,57	35	< 0,001
Biomasse	$Y = 44,677X + 4,3906$	0,41	35	0,014
Site "Djè Koffikro"				
Densité	$Y = 207,15X - 1,4379$	0,58	35	< 0,001
Biomasse	$Y = 42,673X + 0,2257$	0,40	35	0,017
Site "N'Kroiêdjô"				
Densité	$Y = 65,098X + 21,991$	0,40	45	< 0,001
Biomasse	$Y = 19,327X + 17,639$	0,16	45	ns

ns : Différence non significative

IV.4.4. Discussion

IV.4.4.1. Méthode agrégative et relations entre sous-indicateurs

Le choix de la méthode d'agrégation est très décisif dans l'élaboration de l'IGQS. L'approche additive est plus conservatrice que l'approche multiplicative où la mauvaise valeur d'un seul indicateur peut compromettre l'appréciation globale de l'IGQS, même si les autres indicateurs donnent de bons résultats. Avec la méthode additive, une mauvaise (ou bonne) performance d'un sous-indicateur ne peut être suffisamment compensée par les valeurs élevées (ou faibles) d'autres sous-indicateurs. Au contraire, dans l'approche multiplicative, une mauvaise valeur de sous-indicateur non durable peut diminuer l'évaluation de la durabilité de l'ensemble du système (Ferraro *et al.*, 2003 ; Castoldi & Bechini, 2010).

Les pratiques d'usage des sols dans les sites "Petit Bouaké", "Djè Koffikro" et "N'Kroiêdjô" ont des effets significatifs sur les paramètres chimiques, physiques, morphologiques, faunistiques et la matière organique du sol comme déjà montré par plusieurs travaux traitant de la qualité des sols (Doran, 2002 ; Aparicio & Costa, 2007 ; Zornoza *et al.*,

2007 ; 2008 ; Qui *et al.*, 2009). Les jachères du site Petit Bouaké ont les meilleures caractéristiques chimiques et de la matière organique. Toutefois, la faible valeur du sous-indicateur de la diversité biologique des vers de terre sous ces milieux indique que la restauration de la communauté des vers n'est pas encore achevée. Une situation similaire de restauration inachevée s'observe sous la forêt dont la valeur du sous-indicateur peuplement des vers est en deça du seuil supérieur de la classe de qualité moyenne. La monoculture de cacaoyers induit en général une baisse de la qualité physique, morphologique et des peuplements des vers, mais possède tout de même un bon stock de matière organique. Les jachères des sites "Djè Koffikro" et "N'Kroiêdjô" possèdent de fortes valeurs des sous-indicateurs de la qualité chimique, physique, morphologie, et sont associées à la plus abondante et diversifiée communauté des vers de terre. Toutefois, la performance du sol à séquestrer durablement le carbone ne serait pas complètement restaurée dans ces types d'usage des sols ; cela pourrait s'expliquer à travers les valeurs du sous-indicateur de la matière organique en moyenne inférieure à 0,55 (Velasquez *et al.*, 2007a). Un autre exemple intéressant est celui de la forêt secondaire de "Djè Koffikro" où toutes les composantes de la qualité sont restaurées excepté la qualité physique. Par conséquent, il est fort probable que ce milieu soutienne faiblement certains services liés aux propriétés hydrauliques du sol, tels que le stockage et l'infiltration de l'eau (Velasquez *et al.*, 2007a).

IV.4.4.2. Effet des types d'usage des sols sur l'IGQS et relation IGQS/vers de terre

L'évaluation de la qualité des sols sur la base de l'indice général de la qualité révèle l'influence des types d'usage des sols sur cet indicateur dans chaque site d'étude. En appliquant à l'IGQS, la classification de la qualité des sols adoptée par Marzaioli *et al.* (2010), nous pouvons répartir les 23 types d'usage des sols en 3 principaux groupes de qualité. D'un côté il y a le groupe des sols de bonne qualité qui renferme les parcelles J5(1), J2(1), FS(2), Ca20(2), Ca10(2), FP(3), TK8(3) et J5(3), le groupe des sols de qualité moyenne qui inclut les parcelles FS(1), Ca20(1), Ca10(1) et J5(2), et de l'autre côté le groupe des sols de mauvaise qualité composé de Ca5(1), CV(1), Ca5(2), J2(2), CV(2), TK14(3), Ca20(3), Ca10(3), Ca5(3), J2(3) et CV(3).

La bonne qualité des sols des jachères J5(1), J2(1) et J5(3) pourrait être justifiée par le fait que ces sols sont de bonne qualité chimique, physique, morphologique, et possèdent un bon stock de matière organique. L'observation des sous-indicateurs respectifs peut étayer cette assertion. Le maintien de résidus de culture à la surface du sol des parcelles de jachères constitue une importante source de restitution de la matière organique au sol, laquelle matière

organique est un paramètre clé de la qualité du sol car influençant sa structure physique, son aggrégation (Shukla *et al.*, 2006) et sa teneur en éléments chimiques à travers la prolifération des microorganismes impliqués dans le processus de minéralisation (Lagomarsino *et al.*, 2009). Les fortes valeurs de l'indice de la qualité des sols forestiers FS(2) et FP(3) seraient dûes à l'hétérogénéité de la litière source de diversification des apports en éléments minéraux et des ressources alimentaires pour les vers de terre. En outre, les milieux forestiers sont ombragés avec une condition d'humidité propice à la bonne croissance et au dynamisme des vers. Celles des cacaoyères Ca20(2) et Ca10(2) sont probablement dûes à la couverture du sol par une importante quantité de litière de feuilles source de matière organique et à l'origine de la bonne croissance des vers. Selon Kosmas *et al.* (2000) et Marzaioli *et al.* (2010), la couverture du sol par la litière est une condition importante pour améliorer certaines propriétés du sol telles que la teneur en matière organique, le taux d'infiltration de l'eau et la protection contre les processus d'érosion, pour ainsi augmenter la qualité du sol.

Les sols des champs de vivriers CV(1), CV(2) et CV(3) sont de mauvaises qualités. Des résultats similaires ont été obtenus par Velasquez *et al.* (2007a) dans le site de Nicaragua où la valeur de l'IGQS du sol sous culture de maïs (0,19) est moins importante que celles de la forêt (0,77) et de la jachère (0,8). La qualité médiocre des sols sous culture serait essentiellement attribuable à la détérioration irréversible des différentes propriétés de la qualité.

La densité des peuplements des vers de terre présente des co-inerties les plus significatives avec les autres sous-indicateurs de la qualité. Ce résultat est révélateur de l'idée selon laquelle les vers reflètent les différents aspects de la qualité des sols dans leur composition et abondance. Ce travail apporte aussi une confirmation sur les rares tentatives faites jusqu'ici pour produire des systèmes de bioindication en prenant en compte les communautés des vers de terre (Nahmani *et al.*, 2006 ; Richard *et al.*, 2007 ; Ruiz *et al.*, 2011). En outre, l'augmentation de l'indicateur IGQS avec l'abondance des vers de terre impliquerait que leur densité et biomasse peuvent-être des indicateurs pertinents de l'amélioration de la qualité du sol. Les vers par leur présence dans le sol influencent positivement sa qualité. Ils participent à la décomposition de la matière organique au sol, à l'amélioration de la porosité, de l'aération, du régime hydrique (Andren *et al.*, 2001 ; Sarr *et al.*, 2001 ; Jouquet *et al.*, 2008 ; Ernst *et al.*, 2009a ; 2009b) et de la stabilité structurale (Eltaif & Gharaibeh, 2009).

IV.4.5. Conclusion partielle

La présente étude a permis de formuler l'indicateur IGQS en prenant en considération les peuplements des vers de terre. L'indicateur IGQS permet d'appréhender avec précision les problèmes liés au fonctionnement du sol et facilite la mesure des services écosystémiques rendus par chaque type d'usage des sols à travers le calcul des différents sous-indicateurs. Cet indicateur sera d'une grande utilité dans la conception des approches de restauration des sols et dans l'évaluation des politiques de gestion et d'amélioration de la qualité des sols.

La formulation de l'indice général de la qualité des sols varie d'un site d'étude à un autre ; ceci atteste que l'IGQS est spécifique à chaque site. Toutefois la méthodologie d'élaboration reste la même quelque soit le site d'étude.

Par ailleurs, il ressort de ce travail que la densité et la biomasse globales des vers de terre augmentent avec l'indicateur IGQS (particulièrement dans les sites "Pétit Bouaké" et "Djè Koffikro") et peuvent-être utilisées comme des paramètres indicateurs de la qualité du sol. Nos résultats confirment l'importance des vers de terre, ingénieurs de l'écosystème, pour améliorer la qualité du sol.

IV.5. MODIFICATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL PAR LES VERS DE TERRE DANS UN AGROSYSTEME TROPICAL : RÔLE DES ATTRIBUTS FONCTIONNELS DES ESPECES.

IV.5.1. Abondance et taux de survie des espèces de vers de terre

Au bout de 3 mois d'incubation, à l'exception des traitements *M. omodeoi* et *D. terrae-nigrae* qui montrent un taux de survie supérieure à 50%, tous les autres traitements enregistrent un faible taux de survie avec des valeurs variant entre 24,6% dans le traitement *M. omodeoi*+*D. terraenigrae*+*H. africanus* et 49% dans le traitement *M. omodeoi*+*H. africanus* (Tableau XXXV). Cependant, un gain de masse est observé chez tous les individus récoltés car les biomasses individuelles sont supérieures aux biomasses moyennes initiales qui sont de l'ordre de 5,5 ; 3,5 et 1 g, respectivement pour *M. omodeoi*, *D. terraenigrae* et *H. africanus*.

IV.5.2. Caractéristiques physiques du sol

IV.5.2.1. Infiltration de l'eau

La figure 54a traduit la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol en fonction du temps. A l'exception du traitement *Hyperiodrilus africanus*, l'eau s'infiltré rapidement pendant les dix premières minutes dans les sept autres traitements. Ensuite, la vitesse d'infiltration diminue progressivement jusqu'à 50 mn. Au delà de 50 min, le taux d'infiltration de l'eau demeure faible et tend à devenir constant jusqu'à la fin de l'expérimentation. Dans le traitement recevant uniquement l'espèce *H. africanus*, le taux d'infiltration de l'eau dans le sol est important durant les 30 premières minutes. La vitesse d'infiltration de l'eau augmente de la 30^{ème} à la 40^{ème} min, et tend à se stabiliser jusqu'à la fin de l'expérience.

En générale, l'inoculation des vers de terre entraîne une augmentation significative du taux d'infiltration de l'eau dans le sol (Anova 1, $p < 0,001$) ; le taux augmente de 22 à 77%. Les traitements *H. africanus* ($4,98 \pm 0,39 \text{ cm.min}^{-1}$) et *M. omodeoi* + *D. terraenigrae* ($4,09 \pm 0,25 \text{ cm.min}^{-1}$) induisent les vitesses d'infiltration les plus élevées, tandis que les plus faibles valeurs s'observent dans les traitements mixtes *H. africanus* + *D. terraenigrae* ($3,42 \pm 0,27 \text{ cm min}^{-1}$), *M. omodeoi* + *H. africanus* ($3,49 \pm 0,26 \text{ cm.min}^{-1}$) et *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* ($3,55 \pm 0,22 \text{ cm.min}^{-1}$). Les valeurs intermédiaires ont été enregistrées dans les traitements *M. omodeoi* ($3,72 \pm 0,26 \text{ cm.min}^{-1}$) et *D. terraenigrae* ($3,61 \pm 0,27 \text{ cm.min}^{-1}$) (Figure 54b).

Tableau XXXV : Abondance et taux de survie des espèces des vers de terre récolté par traitement

Traitements	Individus par traitement				Biomasse (g) par traitement				Taux de survie (%)
	Mo	Dt	Ha	Total	Mo	Dt	Ha	Total	
Témoin	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mo	9	0	0	9	60,5	0	0	60,5	50
Dt	0	10	0	10	0	45,6	0	45,6	55,6
Ha	0	0	26	26	0	0	30,5	30,5	48,3
MoHa	8	0	14	22	40,7	0	20,4	61,1	49
MoDt	8	5	0	13	45,8	18,4	0	64,2	43
HaDt	0	9	11	20	0	40,6	15,3	55,9	44,4
MoHaDt	3	2	9	14	18,5	9,6	22,6	50,7	24,6

Mo: *M. omodeoi*; Ha: *H. africanus*; Dt: *D. terraenigrae*.

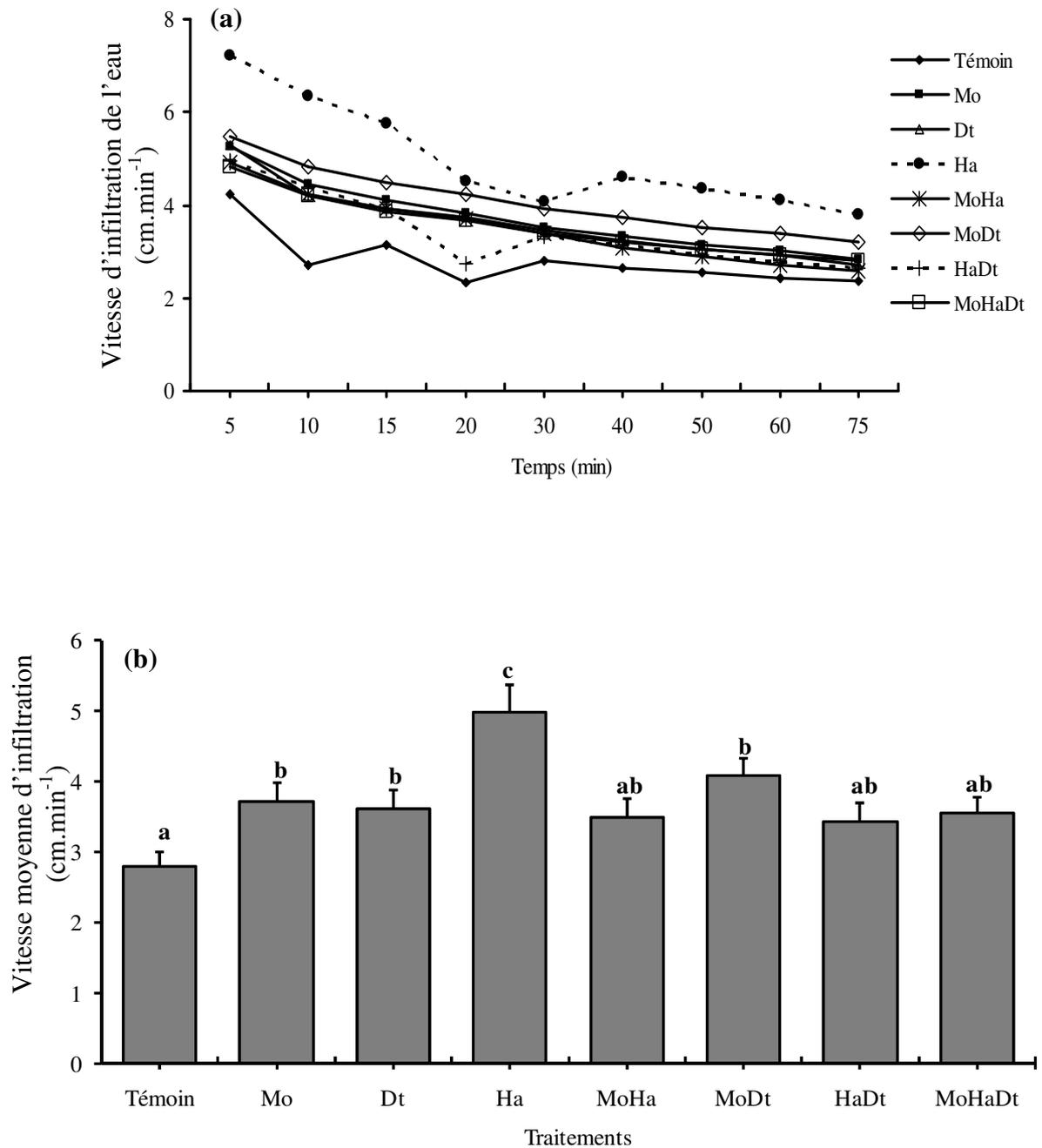


Figure 54 : Infiltration de l'eau : (a) Vitesse d'infiltration de l'eau en fonction du temps et (b) variation de la vitesse moyenne d'infiltration à travers les différents traitements. Mo : *M. omodeoi*, Dt : *D. terraenigrae*, Ha : *H. africanus*. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (Anova 1, seuil de probabilité 5%).

IV.5.2.2. Densité apparente

Aucun traitement n'induit une variation significative de la densité apparente, et ce quelque soit la strate du sol considéré. Cependant, la densité apparente a tendance à diminuer dans les traitements inoculés par les vers de terre (Tableau XXXVI).

IV.5.2.3. Résistance à la pénétration

L'espèce *D. terraenigrae* (226,50±69,09 kPa) et son association avec *M. omodeoi* (143,41±18,58 kPa) augmentent la compaction du sol dans sa couche supérieure. Mais cette compaction n'est pas significativement plus importante par comparaison aux autres traitements. Dans la couche 10-20 cm, l'association entre *M. omodeoi* et *D. terraenigrae* (598,71±158,5 kPa) et chacune de ces espèces inoculées séparément entraînent une augmentation de la compaction du sol. Le décompactant *H. africanus* diminue la compaction du sol ; la plus faible valeur de la pénétrométrie est obtenue avec cette espèce (193,56±27,94 kPa). L'analyse de la variance réalisée sur les données de la couche 10-20 cm montre que la pénétrométrie varie significativement entre les traitements (Tableau XXXVI).

Tableau XXXVI : Densité apparente et pénétrométrie des différents traitements.

Traitements	Densité apparente (g.cm ⁻³)		Pénétrométrie (kPa)	
	0 – 10 cm	10 – 20 cm	0 – 10 cm	10 – 20 cm
Témoin	0,70 (0,02) a	0,75 (0,02) a	127,83 (35,15) a	365,04 (59,22) abc
Mo	0,70 (0,01) a	0,75 (0,01) a	121,82 (19,18) a	522,74 (82,08) cd
Dt	0,65 (0,02) a	0,72 (0,01) a	226,50 (69,09) a	457,71 (59,94) bcd
Ha	0,68 (0,03) a	0,69 (0,01) a	134,87 (22,29) a	193,56 (27,94) a
MoHa	0,70 (0,02) a	0,72 (0,02) a	124,95 (27,45) a	332 (20,08) abc
MoDt	0,67 (0,02) a	0,75 (0,02) a	143,41 (18,58) a	598,71 (158,53) d
HaDt	0,68 (0,01) a	0,72 (0,02) a	130,61 (24,23) a	313,40 (74,75) abc
MoHaDt	0,69 (0,01) a	0,71 (0,02) a	110,29 (10,76) a	237,82 (44,21) ab
<i>p</i> (Anova 1)	ns	ns	ns	0,0099

Mo: *M. omodeoi*, Dt: *D. terraenigrae*, Ha : *H. africanus*. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes ; ns : différence non significative.

IV.5.2.4. Agrégats biogéniques et diamètre moyen pondéral (DMP)

La distribution des agrégats dans la strate 0-10 cm du sol montre que seuls les agrégats de taille moyenne (500-2000 μm) et ceux de grande taille ($>2000 \mu\text{m}$) varient de manière significative (Anova 1, $p < 0,001$) entre les traitements. Alors que dans la couche 10-20 cm, ce sont les agrégats de tailles fines (200-500 μm), moyennes (500-2000 μm) et grandes ($>2000 \mu\text{m}$) qui varient de manière significative (Anova 1, $p = 0,049$; $p < 0,001$; $p = 0,017$ et $p < 0,001$, respectivement).

Le sol inoculé par l'espèce *M. omodeoi* est caractérisé par un plus grand pourcentage d'agrégats de grande taille ($> \mu\text{m} 2000$) quelque soit la couche de sol considérée (Anova 1, $p < 0,001$). Le pourcentage des agrégats de grande taille du traitement *M. omodeoi* vaut environ deux fois celui du traitement *D. terraenigrae*. Par comparaison au témoin, le pourcentage des agrégats de grande taille augmente dans tous les traitements où l'espèce *M. omodeoi* est introduite. La proportion des agrégats de grande taille ($>2000 \mu\text{m}$) diminue au profit des agrégats fins (200-500 μm) et moyens (500-1000 μm) dans le traitement inoculé par l'espèce *H. africanus* (Figure 55).

L'inoculation des vers de terre augmente de manière significative (Anova 1, $p < 0,001$) le diamètre moyen pondéral (DMP) des agrégats du sol. Le DMP est grand dans tous les traitements où l'espèce *M. omodeoi* est présente. Le sol témoin affiche le plus petit DMP ; les valeurs sont de $0,73 \pm 0,03$ mm dans la strate 0-10 cm du sol et de $0,76 \pm 0,04$ mm dans la strate 10-20 cm. Alors que les valeurs du DMP sont plus élevées dans le traitement *M. omodeoi* ($1,87 \pm 0,45$ mm vs $2,09 \pm 0,49$ mm, respectivement dans les couches 0-10 et 10-20 cm) (Figure 56). En se basant sur les valeurs du DMP, les traitements peuvent être classés selon l'ordre décroissant suivant : *M. omodeoi* < *M. omodeoi* + *D. terraenigrae* < *M. omodeoi* + *H. africanus* < *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* < *D. terraenigrae* < *H. africanus* + *D. terraenigrae* < *H. africanus* < Témoin.

Une série de régressions simples de Spearman a été réalisée entre le diamètre moyen pondéral des agrégats biogéniques et les autres paramètres physiques du sol. Les tests n'ont révélés aucune corrélation significative entre le DMP et les paramètres physiques dans la couche 0-10 cm du sol. Cependant, seule la corrélation entre le DMP et la résistance à la pénétration s'est avérée significative ($r = 0,39$; $n = 8$; $p = 0,0216$) au niveau de la couche 10-20 cm du sol (Figure 57).

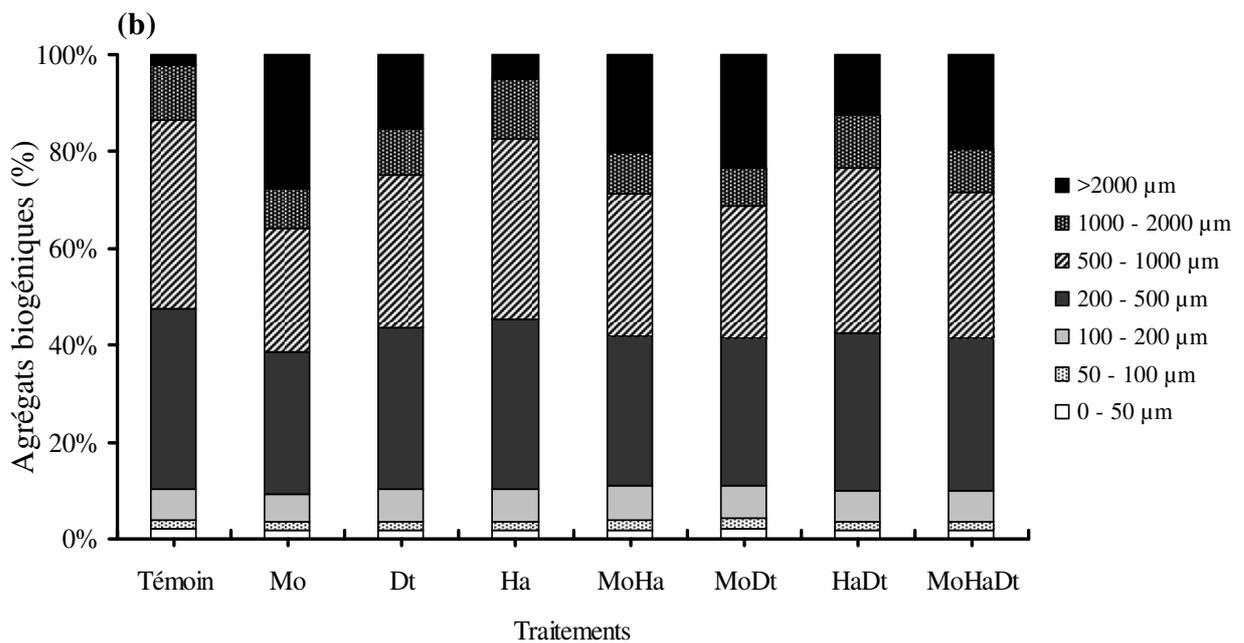
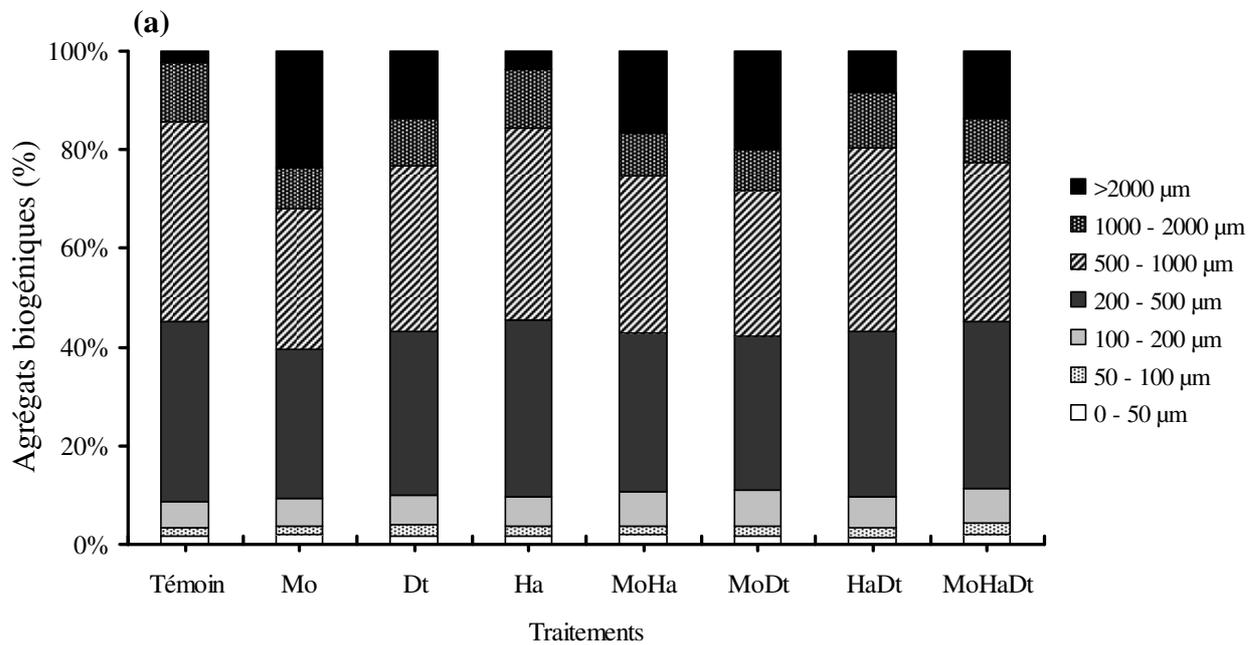


Figure 55 : Distribution des agrégats biogéniques des sols des traitements : (a) strate 0-10 cm et (b) strate 10-20 cm. Mo: *M. omodeoi*, Dt : *D. terraenigrae*, Ha : *H. africanus*.

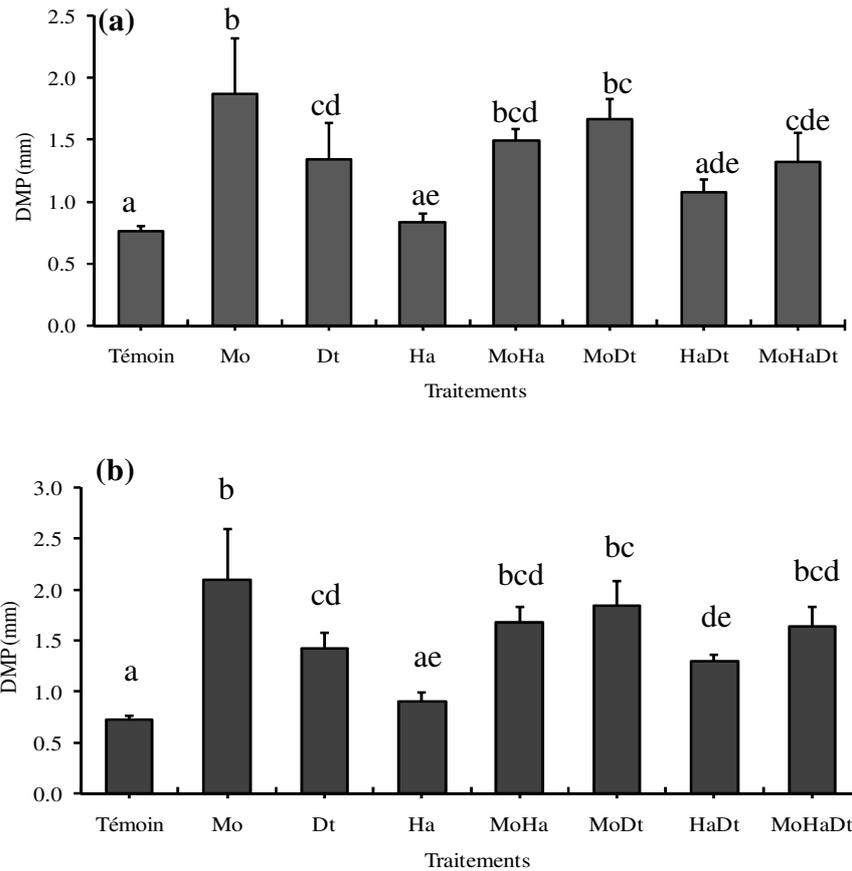


Figure 56 : Variation du diamètre moyen pondéral des agrégats biogéniques des sols des traitements en fonction des strates : (a) strate 0-10 cm et (b) strate 10-20 cm. Mo: *M. omodeoi*, Dt : *D. terraenigrae*, Ha : *H. africanus*. Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (Anova 1, seuil de probabilité 5%).

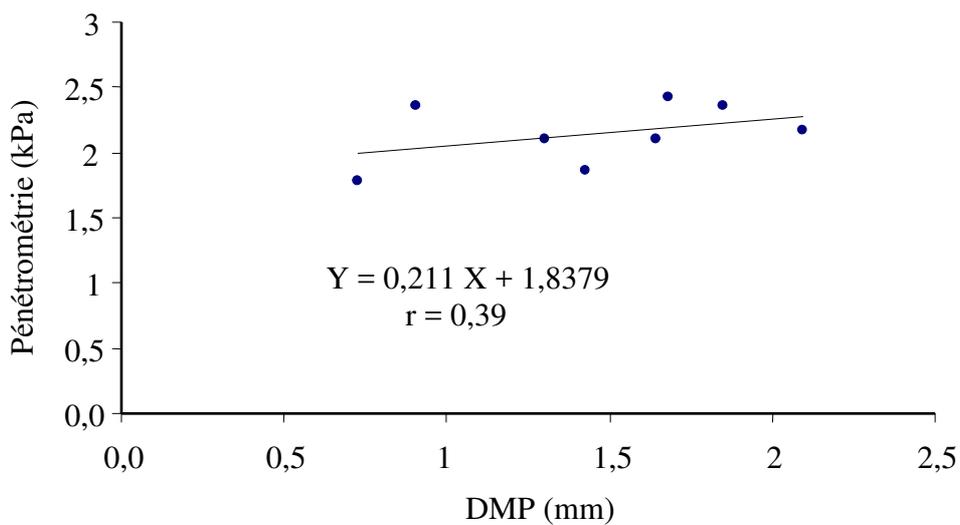


Figure 57 : Relation entre la résistance à la pénétration et le DMP dans la strate 10-20 cm du sol.

IV.5.3. Matière organique et rapport C/N

Le stock de carbone dans l'horizon 0-10 cm augmente dans les traitements inoculés par les vers de terre dans l'ordre suivant : Témoin < *D. terraenigrae* < *H. africanus* + *D. terraenigrae* < *M. omodeoi* < *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* < *H. africanus* ≤ *M. omodeoi* + *D. terraenigrae* < *M. omodeoi* + *H. africanus*. Dans la strate 10-20 cm, l'ordre de l'augmentation dévient *M. omodeoi* + *H. africanus* < *H. africanus* + *D. terraenigrae* < *H. africanus* < *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* < control ≤ *M. omodeoi* < *D. terraenigrae* < *M. omodeoi* + *D. terraenigrae*. La tendance qui se dégage des deux niveaux du sol est que l'association des deux vers compactants *M. omodeoi* et *D. terraenigrae* accroît le stock de C dans le sol ($13,1 \pm 0,77$ t C.ha⁻¹ vs $14,3 \pm 0,35$ t C.ha⁻¹, respectivement dans les strates 0-10 et 10-20 cm). Cependant, les variations du stock de C ne sont significatives entre les 8 traitements dans aucune des couches (Tableau XXXVII).

L'association des trois espèces *M. omodeoi*, *H. africanus* et *D. terraenigrae* ($1,26 \pm 0,09$ t N.ha⁻¹) induit une augmentation du stock d'azote total dans l'horizon supérieur du sol. Le stock d'azote est élevé dans les traitements *M. omodeoi* ($1,37 \pm 0,13$ t N.ha⁻¹) et *H. africanus* + *D. terraenigrae* ($1,3 \pm 0,14$ t N.ha⁻¹). Le plus faible stock d'azote s'observe dans le traitement *H. africanus* ($1,13 \pm 0,1$ t N.ha⁻¹). Toutefois, les variations des stocks de N observées entre les traitements ne sont pas statistiquement significatives (Tableau XXXVII).

Le ratio C/N ne varie pas significativement d'un traitement à un autre quelque soit l'horizon considéré. Les valeurs du rapport C/N varient entre 10,4 et 12,5 (Tableau XXXVII).

IV.5.4. Discussion

IV.5.4.1. Impact des vers de terre sur les caractéristiques physiques du sol comme fonction des traits fonctionnels

Les mortalités observées seraient essentiellement dûes à la baisse de la pluviométrie. En effet, la pluviométrie moyenne mensuelle au cours de la période d'étude (Septembre à Novembre 2009) est faible et varie entre 57,8 et 90,9 mm, tandis que celle des 10 précédentes années (1999-2008) de Septembre à Novembre varie entre 112 et 180,9 mm (données SODEXAM). Toutefois, le gain de biomasse observé chez les individus de vers renforce l'assertion selon laquelle les activités d'ingestion de sol et de création de galeries de ces macroinvertébrés ont induit un impact sur la vitesse d'infiltration de l'eau, la résistance à la pénétration, la distribution des classes d'aggrégats et le DMP.

Il ressort de manière générale que l'inoculation des vers de terre augmente le taux d'infiltration de l'eau dans tous les traitements par rapport au témoin.

Tableau XXXVII : Stocks de C organique et N total, et rapport C/N des sols des différents traitements.

	Traitements								<i>p</i> (Anova 1)
	Témoin	Mo	Dt	Ha	MoHa	MoDt	HaDt	MoHaDt	
C organique (t/ha)									
0-10 cm	12,4(0,31) a	12,8(0,35) a	12,5(0,58) a	13,1(0,41) a	13,2(0,51) a	13,1(0,77) a	12,6(0,62) a	12,8(0,24) a	ns
10-20 cm	13,6(0,6) a	13,6(0,3) a	13,7(0,68) a	13,3(0,41) a	12,7(0,50) a	14,3(0,35) a	13,2(0,52) a	13,4(0,32) a	ns
N total (t/ha)									
0-10 cm	1,23(0,19) a	1,13(0,08) a	1,1(0,1) a	1,13(0,08) a	1,21(0,17) a	1,20(0,13) a	1,05(0,07) a	1,26(0,09) a	ns
10-20 cm	1,25(0,14) a	1,37(0,13) a	1,16(0,15) a	1,13(0,1) a	1,16(0,1) a	1,25(0,12) a	1,30(0,14) a	1,18(0,10) a	ns
Rapport C/N									
0-10 cm	11,6(2,53) a	11,5(0,82) a	11,9(0,95) a	11,9(1,12) a	11,6(1,46) a	11,3(0,77) a	12,1(0,35) a	10,4(0,73) a	ns
10-20 cm	11,5(1,29) a	10,4(1,16) a	12,5(1,39) a	12,1(1,02) a	11,2(0,8) a	11,9(1,08) a	10,6(0,9) a	11,6(0,92) a	ns

Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards ; ns : différence non significative. Mo: *M. omodeoi*; Ha: *H. africanus*; Dt: *D. terraenigrae*.

Cet impact est nettement marqué dans les traitements *H. africanus* et *M. omodeoi* + *D. terraenigrae*. Si le premier traitement produit un résultat escompté puisque l'espèce en présence est décompactante (Derouard *et al.*, 1996), celui obtenu dans le second traitement est inattendu car la combinaison de deux espèces présentant le même attribut fonctionnel (espèces compactantes) devrait réduire le taux d'infiltration de l'eau dans le sol conformément aux résultats des études antérieures (Gilot *et al.*, 1996; Blanchart *et al.*, 1997; Derouard *et al.*, 1996). L'augmentation du taux d'infiltration de l'eau aurait été induite exclusivement par la présence de *D. terraenigrae*, une espèce endogée et à l'origine de la création de galeries dans les 20 premiers centimètres du sol du site d'étude (Tondoh, données non publiées). Car le statut de vers compactant attribué à l'espèce *M. omodeoi* a déjà été étayé par des études antérieures réalisées dans la savane de Lamto (Derouard *et al.*, 1996; Blanchart *et al.*, 2004). Au cours de ses activités de création de galeries, l'espèce *D. terraenigrae* aurait favorisé la prolifération des macropores qui seraient à la base de l'augmentation de la conductivité hydraulique du sol. En effet, les galeries des vers de terre augmentent la macroporosité du sol (Capowiez *et al.*, 2009), et par conséquent, contribuent à l'aération et à l'augmentation du taux d'infiltration de l'eau dans le sol (Lavelle, 1997 ; François & Fraser, 1998 ; Ernst *et al.*, 2009a ; Bottinelli *et al.*, 2010).

Certes les différences ne sont pas statistiquement significatives, mais l'on observe une tendance à la baisse de la densité apparente dans tous les traitements inoculés par les vers de terre. Cette observation est corroborée par les travaux de Lavelle & Spain (2001) et ceux de Maraschi & Scullion (2003) qui ont montré que les vers de terre agissent sur la structure physique du sol en la rendant meuble et beaucoup plus poreuse à travers leur activités de création de galeries.

Le taux des agrégats biogéniques de grande taille augmente dans tous les traitements inoculés, excepté le traitement *H. africanus*. Cette augmentation de turricules de grande taille est la résultante des activités d'alimentation des espèces *M. omodeoi* et *D. terraenigrae* (Tondoh, données non publiées). Ces deux espèces sont des géophages qui produisent beaucoup plus de turricules lorsqu'ils se nourrissent dans un sol pauvre en matière organique. Cette assertion peut être justifiée par la faible teneur en matière organique (1,48%) du sol ayant servi de substrat d'incubation. Les vers géophages consomment beaucoup de sol pour combler leurs besoins énergétiques dans un sol de faible teneur en matière organique (Blanchart *et al.*, 2004). Loranger-Merciris *et al.* (2008) ont également montré que les individus de l'espèce endogée *Aporrectodea caliginosa* produisaient de nombreux agrégats de grandes tailles quand ils sont nourris dans un sol dont la litière est de qualité médiocre. Par

ailleurs, la production de turricules compacts dans les traitements *M. omodeoi*, *D. terraenigrae* et *M. omodeoi* + *D. terraenigrae* est responsable de la compaction du sol. Les faibles valeurs de la résistance à la pénétration dans les traitements *H. africanus*, *H. africanus* + *D. terraenigrae*, *H. africanus* + *M. omodeoi* et *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* sont indicatrices du potentiel de *H. africanus* à agir comme régulateur de la structure du sol dans les écosystèmes.

Un autre aspect de l'action positive des vers sur la composante physique du sol est celui de leur effet sur la stabilité structurale en produisant des agrégats dont la stabilité serait plus élevée que celle des agrégats environnants. Le diamètre moyen pondéral (DMP) est fréquemment utilisé comme un indice approprié pour évaluer la stabilité des agrégats du sol (Kemper & Rosenau, 1986; Jouquet *et al.*, 2008; Paul *et al.*, 2008). Notre expérience révèle que les sols inoculés par le ver compactant *M. omodeoi* ont les valeurs de DMP les plus élevées. Des résultats similaires ont été obtenus avec l'espèce *Allolobophora caliginosa* qui est responsable d'une augmentation significative du DMP dans les sols cultivés par rapport au témoin non inoculé (Eltaif & Gharaibeh, 2009). Nos travaux démontrent comme ceux de Blanchart *et al.* (1997) que le ver *M. omodeoi* confère une importante stabilité à la structure du sol grâce à la production de turricules compacts. La corrélation positive entre la compaction du sol et le DMP appuie cette affirmation. Comparativement à *M. omodeoi*, les faibles valeurs de DMP observées dans les traitements *M. omodeoi* + *H. africanus*, *M. omodeoi* + *H. africanus* + *D. terraenigrae* et *H. africanus* + *D. terraenigrae* confirment la tendance à la diminution de la compaction du sol en présence de l'espèce *H. africanus*.

A la lumière des résultats sur la vitesse d'infiltration de l'eau, la distribution des agrégats biogéniques et le DMP, *D. terraenigrae* semble être une espèce compactante mais à un degré moindre que l'espèce *M. omodeoi*. *D. terraenigrae* est susceptible d'entraîner une forte production de turricules et la création de galeries pouvant avoir un impact significatif sur le fonctionnement du sol à l'image de l'espèce tropicale anécique *Martiodrilus sp* dans la plaine orientale de la Colombie (Jimenez & Decaëns, 2004). Toutefois, la confirmation de l'attribut fonctionnel de cette espèce nécessite plus d'études de terrain et de laboratoires.

IV.5.4.2. Impact des vers de terre sur le stockage de la matière organique du sol

Les vers de terre n'augmentent pas significativement les stocks de carbone et d'azote total dans le sol. Nos résultats ne sont pas en concordance avec ceux de Fonte *et al.* (2007) et Bhadauria & Saxena (2010) qui ont montré que les déjections (turricules) des vers sont plus riches en N et en matières organiques humifiées que le sol environnant. L'absence d'impact

des vers dans le stockage de la matière organique serait probablement attribuable entre autre à la durée de l'expérimentation et aux conditions climatiques défavorables. La période de trois mois (durée de l'expérience) ne serait pas suffisante pour observer un impact notable des vers sur l'accumulation du C et N dans les horizons. En outre, la baisse de la pluviométrie pendant les 3 mois d'expérimentation aurait réduit les activités d'ingestion de sol et de production de turricules par les espèces en présence.

IV.5.4.3. Effet de la richesse spécifique sur le fonctionnement du sol : l'hypothèse d'assurance ?

En accord avec notre hypothèse de départ, la richesse spécifique a un impact positif sur la régulation de la structure du sol, laquelle régulation est cruciale pour la productivité de l'écosystème et par conséquent supporte l'hypothèse d'assurance (Yachi & Loreau, 1999). En effet, les principaux indicateurs de la dégradation de sol, à savoir la compaction due à la présence de *M. omodeoi* et/ou *D. terraenigrae* et la décompaction provoquée par *H. africanus* sont équilibrées par la présence simultanée des trois espèces. Idem pour la distribution et la stabilité des agrégats.

L'augmentation de la richesse spécifique engendre la co-occurrence spatiale des deux principaux groupes fonctionnels (Rossi, 2003), qui assurent à leur tour la régulation de la structure des sols des agrosystèmes.

IV.5.5. Conclusion partielle

Les vers de terre ont entraîné des modifications significatives de la structure physique du sol. L'espèce *H. africanus* et l'association entre *M. omodeoi* et *D. terraenigrae* induisent une augmentation du taux d'infiltration de l'eau dans le sol, mais l'impact d'*H. africanus* est plus marqué que toutes les autres espèces. Le ver compactant *M. omodeoi* produit beaucoup plus de turricules de grandes taille que *D. terraenigrae*, et semble conférer une importante stabilité à la structure du sol à travers l'importante hausse du DMP. Par ailleurs, à travers la confirmation du premier volet de notre hypothèse, la présente étude vient soutenir l'hypothèse d'assurance biologique stipulant qu'une richesse spécifique élevée procure à l'écosystème une capacité tampon vis-à-vis des variations de l'environnement physique et, par conséquent, une grande stabilité de son fonctionnement.

IV.6. GESTION INTEGREE DE LA FERTILITE DES SOLS DANS LES AGROSYSTEMES : INFLUENCE DE L'ASSOCIATION DE DEUX VERS A EFFETS ANTAGONISTES SUR LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DE MAÏS.

IV.6.1. Biomasse et taux de survie des vers inoculés

Le Tableau XXXVIII montre le nombre total d'individus de vers de terre inoculés et récoltés pendant et à la fin de l'expérimentation. A la fin du cycle végétatif du maïs, un important nombre d'individus d'*H. africanus* est mort alors qu'un grand nombre d'individus de *M. omodeoi* a été récolté dans les traitements. Le taux de survie des individus d'*H. africanus* varie entre 0-4,6% avec une valeur moyenne de 1,2%. Les individus de l'espèce *M. omodeoi* sont caractérisés par un taux de survie élevé variant entre 54,6 et 72,2% avec une valeur moyenne de 65,9%. Lorsque les deux espèces sont prises en compte simultanément, le taux de survie varie entre 26,4 et 40,9% avec une valeur moyenne de 33,9%.

En dépit de la faiblesse du taux de survie lorsque les deux espèces sont considérées, une augmentation de la biomasse globale des vers est enregistrée dans les traitements Ms+Vers+U (88,34±11,1 g) et Ms+Vers+S (90,54±11,3 g) ; la biomasse totale initiale étant de 71,5 g. La biomasse de l'espèce *M. omodeoi* quant à elle a augmenté dans tous les traitements.

IV.6.2. Impact sur les propriétés physiques du sol

La résistance du sol à la pénétration augmente dans tous les traitements inoculés par les vers, quelque soit la strate considérée. Cependant, cette augmentation n'est uniquement significative (Anova 1, $p < 0,001$) que dans l'horizon 10-20 cm (Tableau XXXIX). Les sols les plus compactés s'observent dans les traitements Ms+Vers (2361,57±205,08 kPa), Ms+Vers+U+S (2268,91±349,12 kPa), Ms+Vers+S (1985,63±354,28 kPa) et Ms+Vers+U (1943,9±485,82 kPa) alors que le témoin affiche la plus petite valeur de la compaction (538,51±99,14 kPa).

La densité apparente ne varie pas de manière significative entre les traitements (Tableau XXXIX) au niveau des deux horizons. Toutefois, les plus petites valeurs sont obtenues dans le traitement Ms+Vers+U+S (0-10 cm: 0,67±0,01 g.cm⁻³, 10-20 cm: 0,72±0,01 g.cm⁻³) caractérisé par la présence des vers de terre et les fertilisants chimiques.

Tableau XXXVIII : Abondance et taux de survie des espèces de vers inoculées et récoltées par traitement

	Nombre d'individus inoculés par traitement				
	Ms+Vers	Ms+Vers+U	Ms+Vers+S	Ms+Vers+U+S	
<i>M. omodeoi</i>	11	11	11	11	
<i>H. africanus</i>	11	11	11	11	
	22	22	22	22	
	Nombre d'individus récoltés par traitement				
	Ms+Vers	Ms+Vers+U	Ms+Vers+S	Ms+Vers+U+S	
<i>M. omodeoi</i>	6,6(1,4)	8,4(1,1)	8,4(1)	5,8(1,3)	
<i>H. africanus</i>	0	0	0,6(0,4)	0	
	6,6(1,4)	8,4(1,1)	9(1,2)	5,8(1,3)	
	Biomasse (g) récoltées par traitement				
	Ms+Vers	Ms+Vers+U	Ms+Vers+S	Ms+Vers+U+S	
<i>M. omodeoi</i>	66(13,6)	84,2(11,2)	89,34(11)	62,14(12,4)	
<i>H. africanus</i>	0	0	1,2(0,8)	0	
	66(13,6)	84,2(11,2)	90,54(11,3)	62,14(12,4)	
	Taux de survie (%)				
	Ms+Vers	Ms+Vers+U	Ms+Vers+S	Ms+Vers+U+S	Moyenne
<i>M. omodeoi</i>	63,6	72,7	72,7	54,6	65,9
<i>H. africanus</i>	0	0	4,6	0	1,2
	31,8	36,4	40,9	27,3	34,1

Ms+Vers : Maïs + Vers ; Ms+Vers+U : Maïs + Vers + urée ; Ms+Vers+S : Maïs + Vers + superphosphate ; Ms+Vers+U+S : Maïs + Vers + urée + superphosphate.

Tableau XXXIX : Résistance à la pénétration et densité apparente des sols des traitements

Traitements	Pénétration (kPa)		Densité apparente (g.cm ⁻³)	
	0 – 10 cm	10 – 20 cm	0 – 10 cm	10 – 20 cm
Ms (témoin)	201,32(4,05) a	538,81(99,14) a	0,73(0,01) a	0,76(0,01) a
Ms+U	203,19(27,93) a	858,34(150,09) a	0,72(0,01) a	0,75(0,02) a
Ms+S	239,82(68,75) a	980,31(201,14) a	0,69(0,02) a	0,75(0,03) a
Ms+U+S	230,62(24,09) a	819,25(166,86) a	0,72(0,01) a	0,79(0,01) a
Ms+Vers	324,12(23,50) a	2361,57(250,08) b	0,70(0,03) a	0,75(0,01) a
Ms+Vers+U	283,38(65,15) a	1943,90(485,82) b	0,69(0,02) a	0,75(0,03) a
Ms+Vers+S	218,50(30,61) a	1985,63(354,28) b	0,71(0,02) a	0,75(0,02) a
Ms+Vers+U+S	269,29(30,86) a	2268,91(349,12) b	0,67(0,01) a	0,72(0,01) a
<i>p</i> (Anova 1)	ns	<0,001	ns	ns

Ms : Maïs (témoin) ; Ms+U : Maïs + urée ; Ms+S : Maïs + superphosphate ; Ms+U+S : Maïs + urée + superphosphate ; Ms+Vers : Maïs + Vers ; Ms+Vers+U : Maïs + Vers + urée ; Ms+Vers+S : Maïs + Vers + superphosphate ; Ms+Vers+U+S : Maïs + Vers + urée + superphosphate. Les valeurs entre parenthèses sont les erreurs standards. Les valeurs suivies par des lettres différentes sont significativement différentes. ns : non significatif.

IV.6.3. Impact des vers sur la croissance du maïs

De manière générale, le pied de maïs croît du 30^{ème} au 75^{ème} jour après semis (JAS) dans chaque traitement. Cependant, la variation de la hauteur moyenne des pieds de maïs entre les huit traitements n'est significative qu'au 30^{ème} JAS (Figure 58). Les mésocosmes dans lesquels sont ajoutés les vers de terre et/ou les fertilisants chimiques possèdent les plants les plus grands. Le plus grand plant de maïs s'observe dans le traitement Ms+Vers+U (59,8±4,40 cm). Il est suivi dans l'ordre de hauteur décroissante par le traitement Ms+U+S (56,26±1,76 cm), le traitement associant le maïs aux vers et aux engrais inorganiques (Ms+Vers+U+S : 55,98±2,15 cm) et le traitement associant uniquement le maïs aux vers (Ms+Vers : 53,48±2,45 cm).

Aucune différence significative n'est observée entre les traitements aux 50^{ème} et 75^{ème} JAS. Cependant, il semble que l'impact des vers de terre (Ms+Vers : 186±12,9 cm) sur la croissance du maïs est amélioré par les engrais minéraux (Ms+Vers+U+S : 199±6,75 cm) bien que la différence de hauteur ne soit pas statistiquement significative (Figure 58).

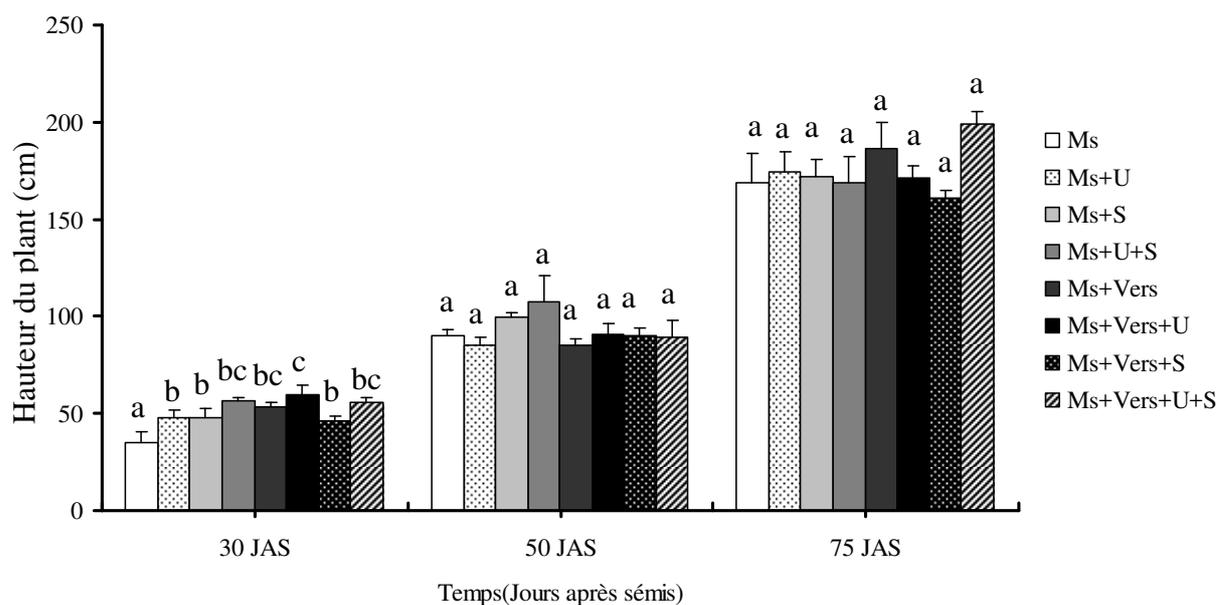


Figure 58 : Hauteur du plant de maïs aux différents jours après semis (JAS). Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes (Anova 1, seuil de probabilité 5%). Ms : Maïs (témoin) ; Ms+U : Maïs + urée ; Ms+S: Maïs + superphosphate ; Ms+U+S: Maïs + urée + superphosphate ; Ms+Vers : Maïs + Vers ; Ms+Vers+U: Maïs + Vers + urée ; Ms+Vers+S: Maïs + Vers + superphosphate ; Ms+Vers+U+S: Maïs + Vers + urée + superphosphate.

IV.6.4. Impact des vers sur les rendements de maïs

La biomasse épigée du maïs est significativement plus importante (test de Kruskal-Wallis, $p = 0,048$) dans les mesocosmes inoculés par les vers de terre et/ou associés aux intrants inorganiques (Figure 59a). Par comparaison au traitement témoin, la biomasse épigée a augmenté de 171,2 ; 62,2 ; 59,9 ; 53,3 et 35,5%, respectivement dans les traitements Ms+Vers, Ms+Vers+U+S, Ms+U+S, Ms+Vers+U et Ms+Vers+S. Les plus grandes valeurs s'observent respectivement dans les traitements Ms+Vers ($10,63 \pm 4,41 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), Ms+Vers+U+S ($6,36 \pm 1,94 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) et Ms+U+S ($6,24 \pm 1,86 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Les vers (*M. omodeoi* et *H. africanus*) seuls ou associés aux fertilisants chimiques augmentent de manière significative la production de grains de maïs (Kruskal-Wallis, $p = 0,0183$). La biomasse des grains augmente de 266,9% dans le traitement à base de vers de terre (Ms+Vers), de 58,8 (Ms+S) à 111,04% (Ms+U+S) dans les traitements à base de fertilisants chimiques et de 92,64 (Ms+Vers+S) à 122,09% (Ms+Vers+U) dans les traitements combinant à la fois vers et fertilisants chimiques (Figure 59b).

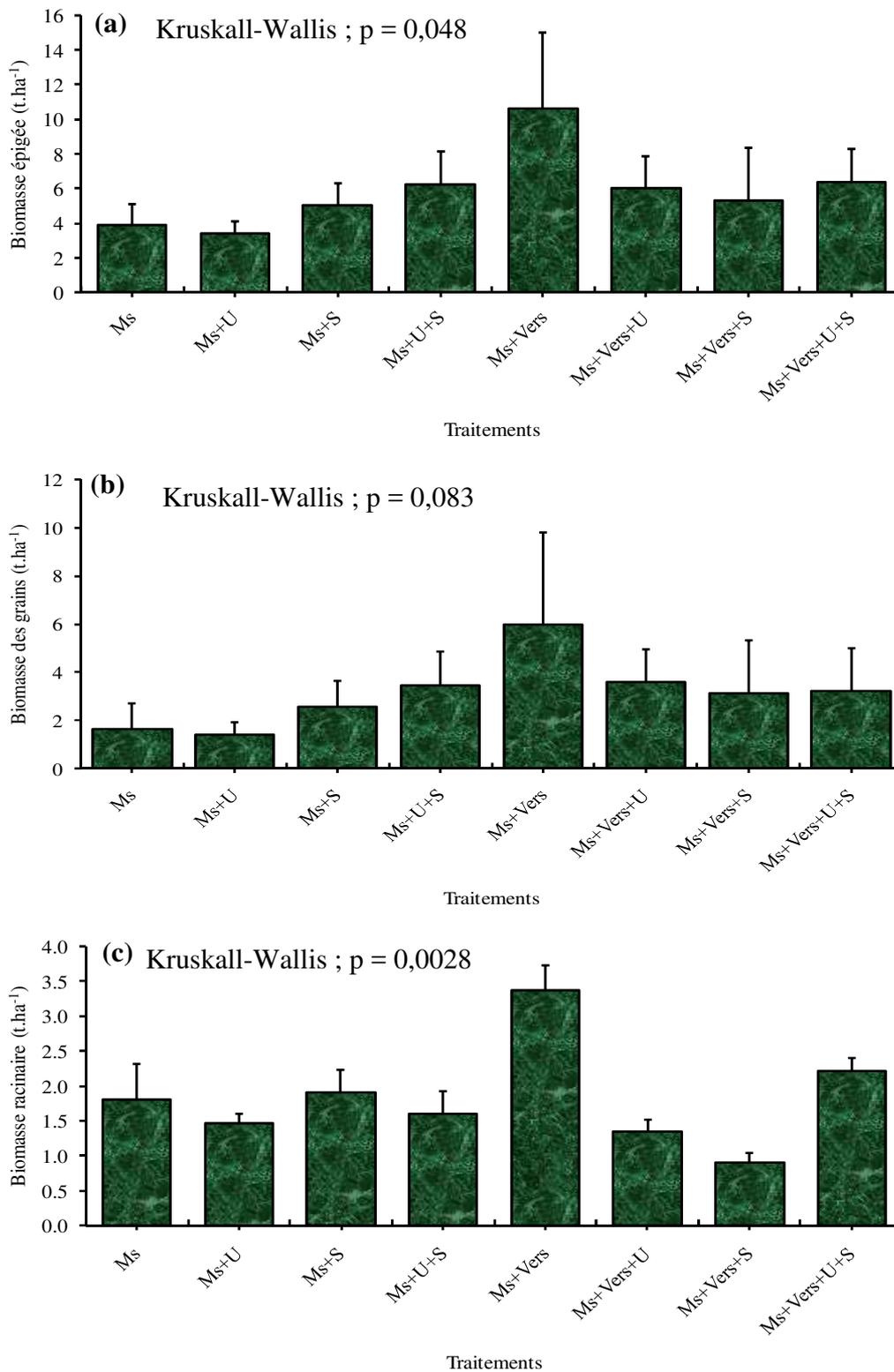


Figure 59 : Production du maïs en fonction des traitements : (a) biomasse épigée, (b) biomasse des grains et (c) biomasse racinaire. Voir la figure 58 pour les correspondances des traitements.

Les rendements en grains de maïs peuvent être rangés dans l'ordre décroissant suivant: Ms+Vers : $5,98 \pm 3,84 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+Vers+U : $3,62 \pm 3,4 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+U+S : $3,44 \pm 1,4 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+Vers+U+S : $3,2 \pm 1,77 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+Vers+S : $3,14 \pm 2,18 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+S : $2,59 \pm 1,08 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms : $1,63 \pm 1,06 \text{ t.ha}^{-1}$ > Ms+U : $1,41 \pm 0,52 \text{ t.ha}^{-1}$.

Les vers (Ms+Vers) et leur association aux fertilisants (Ms+Vers+U+S) améliorent la production des systèmes racinaires (Kruskal-Wallis, $p = 0,0028$) respectivement de 190 et 120%. La biomasse racinaire est plus faible dans les traitements Ms+Vers+S ($0,9 \pm 0,13 \text{ t.ha}^{-1}$), Ms+Vers+U ($1,34 \pm 0,17 \text{ t.ha}^{-1}$), Ms+U ($1,47 \pm 0,13 \text{ t.ha}^{-1}$) et Ms+U+S ($1,60 \pm 0,32 \text{ t.ha}^{-1}$) que dans les traitements Ms+Vers ($3,38 \pm 0,36 \text{ t.ha}^{-1}$) et Ms+Vers+U+S ($2,21 \pm 0,19 \text{ t.ha}^{-1}$) (Figure 59c).

IV.6.5. Relation entre la production de maïs et les caractéristiques du sol

Des régressions simples de Spearman ont été réalisées entre les paramètres de production du maïs et les paramètres physiques du sol. Les tests n'ont révélés aucune corrélation significative entre les paramètres de production et les paramètres physiques dans la couche 10-20 cm du sol. Cependant, dans la couche 0-10 cm, seule la corrélation entre la biomasse racinaire et la résistance à la pénétration s'est avérée significative ($R^2 = 0,1402$, $N = 40$, $p = 0,0173$) (Figure 60).

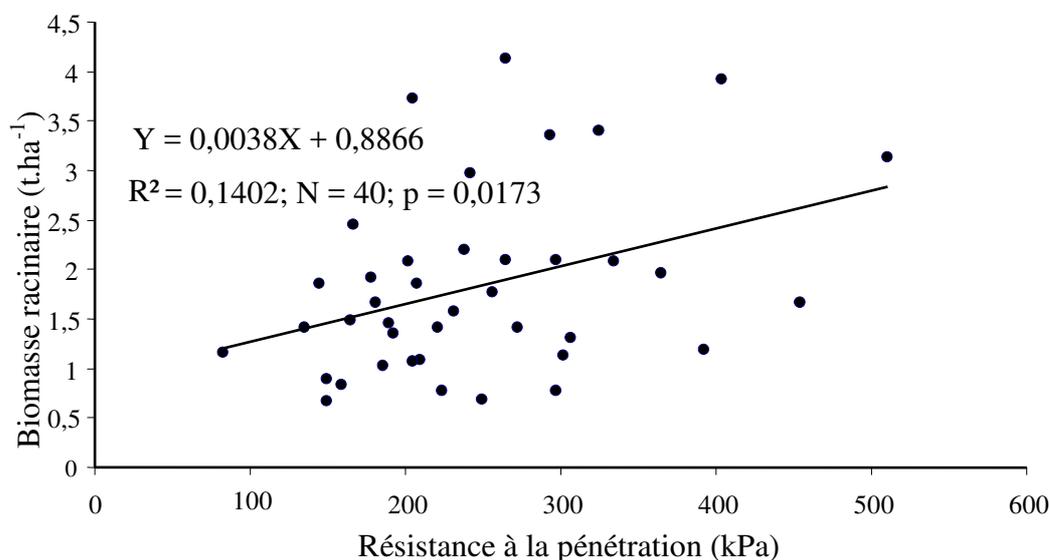


Figure 60 : Relation entre la biomasse racinaire et la résistance à la pénétration dans la strate 0-10 cm du sol.

IV.6.6. Efficience d'utilisation des nutriments et de l'eau par le maïs

Seulement cinq (5) traitements ont été pris en compte pour le calcul de ces paramètres agronomiques. Il s'agit notamment des traitements Ms (témoin), Ms+U, Ms+S, Ms+Vers+U et Ms+Vers+S.

IV.6.6.1. Efficience d'utilisation de l'azote et du phosphore

L'inoculation des vers entraîne une légère réduction de l'utilisation de l'azote par le maïs ; la valeur de l'efficience d'utilisation de l'azote (EUA) en absence des vers de terre est de $55,92 \pm 12,8 \text{ kg.kg}^{-1}$ contre $53,6 \pm 14,4 \text{ kg.kg}^{-1}$ dans le traitement avec vers de terre (Figure 61a). Contrairement à l'EUA, les vers de terre améliorent de 275,4% la capacité du maïs à utiliser de manière efficace le phosphore (Test de Student; $p = 0,0095$) (Figure 61a). La valeur moyenne de l'efficience d'utilisation du phosphore (EUP) en présence des vers ($118,9 \pm 50,5 \text{ kg.kg}^{-1}$) est 4 fois supérieure à celle du traitement sans vers de terre ($31,7 \pm 12,8 \text{ kg.kg}^{-1}$).

IV.6.6.2. Efficience d'utilisation de l'eau

On note une légère baisse de l'utilisation de l'eau par le plant de maïs en présence des vers dans le traitement fertilisé à l'urée. La valeur de l'efficience d'utilisation de l'eau (EUE) par le maïs en absence des vers est de $0,0193 \pm 0,007 \text{ kg.mm}^{-1}$ contre $0,0185 \pm 0,007 \text{ kg.mm}^{-1}$ en présence de vers (Figure 61b). Pourtant dans le traitement fertilisé au superphosphate, l'on observe un gain de biomasse de $0,0257 \pm 0,015 \text{ kg}$ pour un millimètre d'eau absorbé par le plant de maïs en présence des vers de terre contre $0,0101 \pm 0,005 \text{ kg.mm}^{-1}$ en l'absence de vers (Test de Student; $p = 0,0058$) ; soit une augmentation de biomasse épigée de 154,46% induite par les vers.

IV.6.7. Discussion

L'inoculation simultanée des deux espèces appartenant à différents groupes fonctionnels induit un effet depressif sur la population de l'espèce *H. africanus* ; son taux de survie est extrêmement faible (1,2%) par rapport à celui de *M. omodeoi* (65,9%). En outre, le gain de masse des individus de *M. omodeoi* dans tous les traitements inoculés, suggère que ce ver est le principal contributeur aux processus du sol. Deux raisons pourraient étayer le faible taux de survie observé de l'espèce *H. africanus*. D'une part, les individus d'*H. africanus* appartiennent à la stratégie démographique de type r, c'est à dire qu'ils sont caractérisés par un faible taux de survie (Tondoh & Lavelle, 2005), contrairement à l'espèce *M. omodeoi* qui est stratège-k et caractérisée par un taux de survie très élevé (Lavelle, 1981),

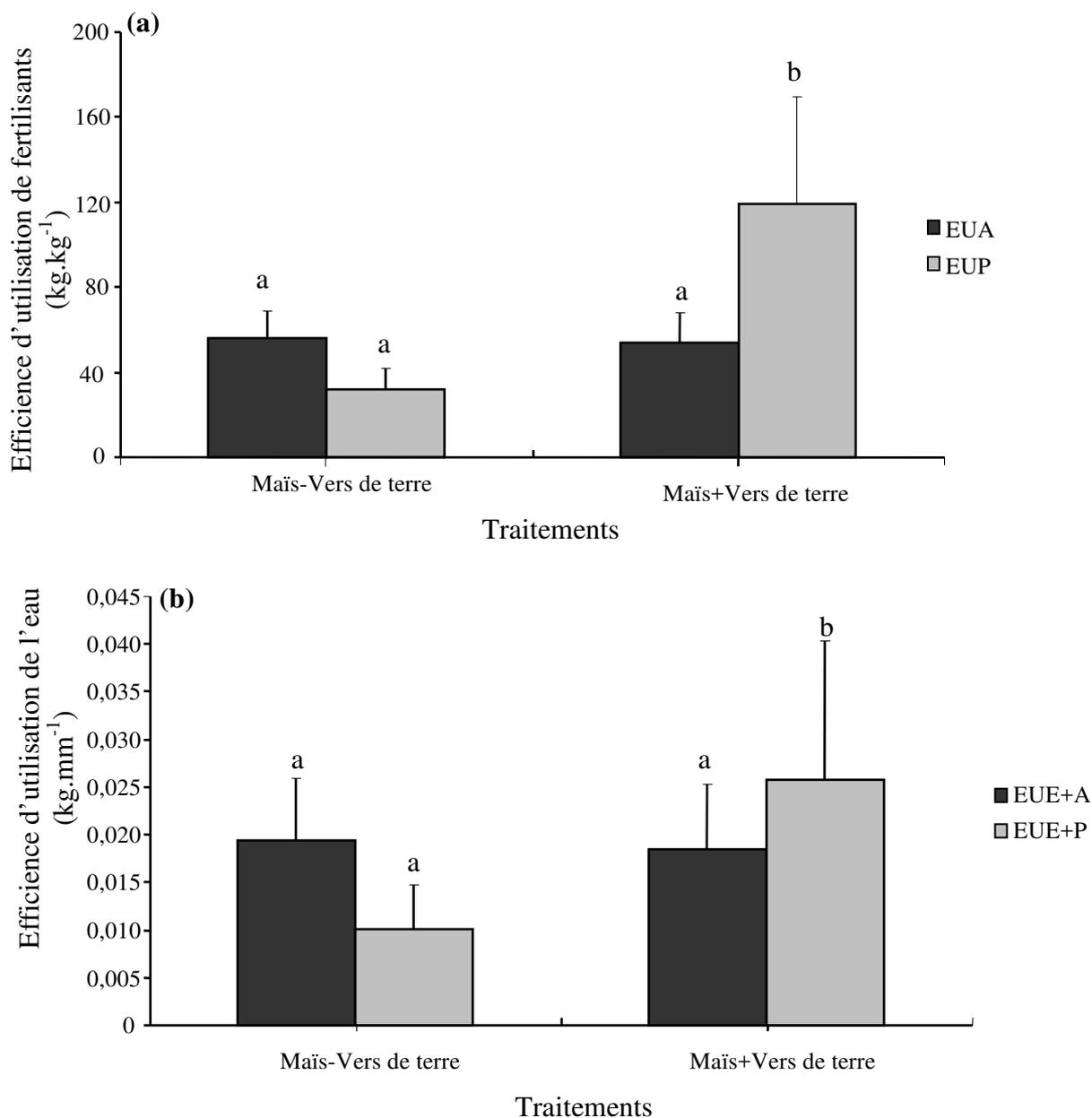


Figure 61: Efficiencia d'utilització dels nutrients i de l'aigua pel blat de moro en presència i en absència dels vers. (a) Efficiencia d'utilització de nutrients (EUA : efficiencia d'utilització de l'azot i EUP : efficiencia d'utilització del fòsfor). (b) efficiencia d'utilització de l'aigua (EUE+A : efficiencia d'utilització de l'aigua en presència de l'azot i EUE+P : efficiencia d'utilització de l'aigua en presència del fòsfor). Maïs-Vers de terre : blat de moro sense vers de terre, Maïs+Vers de terre : blat de moro amb vers de terre. D'un tractament a un altre, les valors seguits de lletres diferents són significativament diferents (test t de Student, p = 5%).

et d'autre part la compétition interspécifique entre les deux populations aurait réduit la niche écologique d'*H. africanus* qui n'arriverait plus à consommer les grandes quantités de macro-agrégats produites par *M. omodeoi*. Ainsi, l'effet compactant de *M. omodeoi* aurait pris le dessus sur la fonction décompactante d'*H. africanus*. Cela expliquerait l'augmentation du niveau de compaction dans les sols inoculés et vient corroborer les résultats d'une méta-analyse établie par Uvarov (2009) qui stipulent que la prévalence de réponses négatives dans les interactions entre vers de terre suggère le chevauchement des niches et la prédominance de rapports de compétition entre espèces.

L'effet des vers sur la croissance du maïs 30 jour après semis, est amélioré par l'application des fertilisants chimiques. Ce résultat semble être justifié par l'effet synergique entre les vers (*M. omodeoi* et *H. africanus*) et les fertilisants inorganiques, qui serait bénéfique pour la croissance du maïs. Selon Marhan & Scheu (2005), la combinaison entre la matière organique et les fertilisants minéraux est une condition préalable pour renforcer les activités des vers de terre dans les écosystèmes tempérés ; leurs travaux ont révélés que l'association du fumier au fertilisant chimique NPK augmentait de 42,8% l'activité du ver endogé *Octolasion tyraeum*. Toutefois, contrairement aux études de Helling & Larink (1998) qui suggèrent que la minéralisation azotée est améliorée par l'interaction vers-urée dans les agrosystèmes tempérés, nos résultats montrent une baisse ou une légère augmentation de la croissance et la production de maïs dans les traitements associant les vers à l'urée.

L'impact positif des vers sur la croissance du maïs est renforcé par l'ajout des fertilisants inorganiques. La gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) est préconisée pour être l'une des meilleures options pour soutenir une production agricole durable dans les systèmes agricoles traditionnels car elle promeut à la fois la durabilité et la production des systèmes agricoles traditionnels, en s'appuyant principalement sur l'utilisation d'intrants organiques, engrais minéraux et de matériel biologique (Vanlauwe & Giller, 2006 ; Vanlauwe *et al.*, 2010). Les explications suivantes pourraient fondamentalement étayer ce résultat : (i) en se nourrissant de la matière organique produite par la coque de café, (ii) les vers de terre intensifient leur activité de bioturbation et améliorent les services écosystémiques tels que la capacité d'infiltration de l'eau, le bon développement du système racinaire, lesquels services (iii) améliorent à leur tour l'efficacité d'utilisation du phosphore et de l'eau par le plant de maïs. Cependant, la croissance du plant de maïs est restreinte aux 30 premiers jours après semis, montrant ainsi la courte durée de l'impact bénéfique de l'inoculation des vers de terre. Sachant que 30 jours correspond à peu près au temps d'une génération de l'espèce *H. africanus* (45 jours) (Tondoh, 1998), l'on pourrait donc spéculer sur l'association entre cette

espèce et *M. omodeoi* qui pourrait avoir un effet positif sur la capacité d'infiltration de l'eau et la réduction des macro-agrégats comme l'ont déjà montré Derouard *et al.* (1996).

Contrairement à la thèse générale selon laquelle l'action bénéfique des vers sur la croissance des plantes est plus accentuée dans les sols pauvres en éléments minéraux (Brown *et al.*, 2004), la présente étude confirme les travaux antérieurs réalisés en France sur les effets positifs des vers de terre dans les sols amendés avec des fertilisants minéraux (Laossi *et al.*, 2009).

La production du maïs, particulièrement la biomasse épigée, les grains et les racines sont significativement améliorées par les vers. Des expérimentations antérieures réalisées sur l'impact de l'inoculation des vers sur la production des cultures ont révélés des résultats similaires (Gilot-Villenave *et al.*, 1996; Derouard *et al.*, 1996 ; Blouin *et al.*, 2006; Eriksen-Hamel & Whalen, 2007). Les travaux réalisés à Lamto par Derouard *et al.* (1996) ont montré que l'inoculation des vers (*M. omodeoi* et *Sthulmannia zielae*) induisait une hausse de la production des feuilles de maïs de 23% et une augmentation de la biomasse et du nombre d'épis, respectivement de 300 et 260%. Parmi les mécanismes exercés par les vers de terre et influençant la croissance végétative des plantes (Scheu, 2003), trois (3) processus dont l'efficacité d'utilisation de l'eau et du phosphore et le développement du système racinaire sont identifiés dans le présent travail. Les vers de terre créent des conditions favorables au bon développement du système racinaire dans les dix premiers centimètres du sol grâce à leurs « activités d'ingénierie ». Cela induit en retour un impact positif sur l'absorption de l'eau et du phosphore par la plante. Des résultats similaires ont été obtenus au Burkina-Faso avec les termites par Ouédraogo *et al.* (2006). Ces derniers ont montré que le sorgho (*Sorghum bicolor*) utilisait mieux l'eau et le phosphore en présence des termites qu'en leur absence. Par ailleurs, des travaux réalisés par Wan & Wong (2004) ont montré que le P organique est rapidement transformé en P assimilable par la plante quand les sols sont exposés aux vers de terre *Pheretima guillelmi* et *Eisenia fetida*. En effet, l'intestin des vers de terre est capable de sécréter et de stimuler l'activité des phosphatases qui assurent à leur tour une rapide libération du phosphore minéral dans les turricules (Chapius-Lardy *et al.*, 1998; Vinotha *et al.*, 2000; Wan & Wong, 2004 ; Ernst *et al.*, 2009b). Loranger-Merciris *et al.* (2012) ont également montré que le phosphore assimilable est environ deux fois plus disponible dans les turricules de *Pontoscolex corethrurus* que dans les sols non inoculés, et que la nutrition phosphorique de la plante était mieux assurée en présence des vers de terre.

L'absence d'impact des vers sur la nutrition azotée du maïs est probablement attribuable à l'immobilisation de ce macro-élément dans les turricules compacts produits par *M. omodeoi*.

En effet, la compétition interspécifique ayant entraîné la mort des individus *d'H. africanus*, ceux-ci n'ont pu exercer leur action décompactante afin de rendre accessible aux racines l'azote emprisonné dans les turricules compacts produits par le ver *M. omodeoi*.

IV.6.8. Conclusion partielle

La présent étude a montré (i) le rôle déterminant joué par les vers de terre dans la théorie de la GIFS à travers l'amélioration des services écosystémiques et la capacité des plantes à utiliser de manière efficiente l'eau et les fertilisants chimiques, et (ii) la capacité des vers à être utilisés comme des composantes biologiques viables dans le cadre de la GIFS. Les résultats sont accordances avec l'hypothèse préalablement émise qui stipule que l'amélioration de la croissance du maïs et l'augmentation de sa production sont dues aux interactions entre les vers de terre et les intrants inorganiques. Toutefois, la production massive de vers de terre nécessaires à la réalisation d'un tel système de culture et l'appropriation du système par les agriculteurs demeurent les principaux défis à relever.

CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVES

La présente étude avait pour objectif général d'élaborer un système de suivi de la qualité des sols en tenant compte des peuplements de vers de terre et d'évaluer le rôle de ces organismes dans la provision des services écosystémiques des agrosystèmes afin d'améliorer la productivité des systèmes agricoles. Pour atteindre cet objectif, nous avons dégagé trois principaux axes dont les réponses constituent l'essentiel de ce travail.

Le premier objectif de ce travail était d'identifier des groupes de réponse au sein des peuplements de vers de terre face à la modification des paramètres édaphiques. A cet effet, les résultats ont montré que la conversion des forêts en milieux anthropisés modifie profondément les propriétés morphologiques, physiques, chimiques et la matière organique du sol. La disparition de couverture végétale, la perte de matière organique, la moindre capacité d'échange cationique et l'effet dévastateur du labour sur la structure physique du sol sont entre autres les caractéristiques les plus représentatives des sols cultivés. L'abondance et la diversité des vers de terre dans ces milieux sont considérablement réduites. Les peuplements des sols cultivés sont principalement dominés par les espèces endogées comme *Stuhlmannia zielae*, *Millsonia omodeoi* et *Hyperiodrilus africanus*. Les organismes épigés ont presque totalement été éliminés. Par contre, les milieux moins anthropisés (forêts, jachères) possèdent des peuplements de vers riches et abondants dominés principalement par des espèces épigées sensibles à la diminution de la couverture végétale. Les analyses de co-inertie entre les peuplements de vers et les propriétés édaphiques confirment que les conditions morphologiques, physiques, chimiques et la matière organique du sol expliquent bien la distribution des vers de terre. Un changement drastique des conditions environnementales telles que la diminution de la litière, de la matière organique, de l'humidité du sol, a un effet dépressif sur les peuplements de vers. En raison du caractère intégrateur de ces organismes, ils revêtent mieux au niveau spécifique un pouvoir d'indicateur de la qualité des écosystèmes à l'image des espèces *Millsonia nilesi*, *Dichogaster saliens*, *D. eburnea*, *D. mamillata* et *Stuhlmannia palustris* révélées indicatrices uniquement du groupe défini par les forêts. Ainsi comme utilité pour l'homme, les vers de terre peuvent être utilisés pour suivre l'état de dégradation des écosystèmes forestiers.

Le deuxième objectif a porté sur l'intégration des peuplements de vers dans l'élaboration de l'indice général de la qualité des sols (IGQS). La formulation de l'IGQS varie d'un site d'étude à un autre ; ceci montre que cet indicateur est spécifique à chaque site. Toutefois la méthodologie d'élaboration reste la même quelque soit le site d'étude. L'IGQS attribue des valeurs de bonne qualité ($0,7 \leq \text{IGQS} \leq 1$) aux sols des parcelles FS(2), FP(3), J5(1), J5(3), J2(1), Ca20(2), Ca10(2) et TK8(3), tandis que les parcelles de CV(1), CV(2),

CV(3), Ca5(1), Ca5(2), Ca5(3), Ca10(3), Ca20(3), TK14(3), J2(2) et J2(3) sont de mauvaise qualité ($0,1 \leq \text{IGQS} < 0,55$). La présente étude a ainsi révélé que les vers de terre peuvent être des indicateurs de la qualité du sol car leur abondance est positivement corrélée à l'indicateur IGQS (particulièrement dans les sites Petit Bouaké et Djè Koffikro).

Enfin, le dernier objectif consistait à étudier les services écosystémiques rendus par les vers de terre à travers des expérimentations en conditions semi-naturelles. A cet effet, les expérimentations ont révélé l'aptitude des vers de terre à effet fonctionnels contrastés à augmenter les rendements du maïs : +171,2% pour la biomasse épigée ; +266,9% pour la production de grains et +190% pour la production racinaire. Ces résultats révèlent ainsi le rôle des vers à être considérés comme une importante composante biologique dans le cadre de la gestion intégrée de la fertilité des sols. Les activités d'ingénierie des vers de terre sont responsables de cette augmentation de la production. Ces organismes améliorent les propriétés hydrauliques et régulent la structure du sol. L'espèce *H. africanus* est beaucoup plus active dans l'augmentation du taux d'infiltration de l'eau ($4,98 \pm 0,39 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$) tandis que *M. omodeoi* confère une importante stabilité à la structure du sol à travers la production de turricules compacts et la hausse du diamètre moyenne pondéral du sol ($1,87 \pm 0,45 \text{ mm}$ vs $2,09 \pm 0,49 \text{ mm}$, respectivement dans les couches 0-10 et 10-20 cm). Cependant, nos résultats indiquent que les vers n'ont pu augmenter les stocks de carbone et d'azote total dans leurs turricules au bout de 3 mois. Ainsi les vers de terres peuvent contribuer efficacement à faire augmenter les récoltes des cultures vivrières, notamment le maïs, en (i) régulant la structure du sol, (ii) augmentant la vitesse d'infiltration de l'eau du sol ainsi que son utilisation efficace par les racines de la culture de maïs, et (iii) en augmentant l'utilisation efficace du phosphore par la culture du maïs.

Les résultats de la présente étude ouvrent de nouvelles voies de recherches quant au rôle des vers de terre dans le fonctionnement des agrosystèmes et dans le développement d'une agriculture durable.

Cette étude a montré qu'en général, les sols des zones forestières de la Côte d'Ivoire, plus particulièrement ceux issus de l'ancienne boucle de cacao de la région d'Oumé sont dégradés. Il convient de concevoir un dispositif méthodologique à base des populations de vers de terre à l'image de l'indicateur IGQS pour évaluer l'état de dégradation des sols dans l'ensemble des anciennes boucles de cacao.

L'expérimentation tendant à mettre en évidence le rôle des vers de terre dans le stockage du carbone dans les turricules n'a pas donné les résultats escomptés à cause certainement du temps relativement court. Il est souhaitable à la lumière de ce résultat et compte tenu du

potentiel de séquestration du carbone dans les turricules de vers de terre, qu'une étude similaire sur un pas de temps d'un an et prenant en compte toutes les saisons, soit entreprise. L'effet positif des vers de terre sur la croissance et la production d'une culture de maïs en mésocosmes donne des idées quant à une éventuelle reprise de cette étude dans les conditions paysannes, malgré les contraintes évidentes d'acceptation de la technologie par les paysans dues aux réticences sociales (manipulation des vers de terre) et à son coût financier. L'agriculture biologique tant pronée de nos jours trouve dans cette expérience, un champ d'expérimentation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andrén, O., Kätterer, T., Hyvönen, R., 2001. Projecting soil fauna influence on long-term soil carbon balances from faunal exclusion experiments. *Applied Soil Ecology*. 18, 177-186.
- Andrews, S.S., Carroll, C.R., 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecology Applied*. 11, 1573–1585.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 1945-1962.
- Aparicio, V., Costa, J.L., 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research*. 96, 155–165.
- Assié, K.H., Angui, K.T.P., Tamia, A.J., 2008. Effet de la mise en culture et des contraintes naturelles sur quelques propriétés physiques ferrallitiques au Centre-Ouest de la Côte d’Ivoire : Conséquences sur la dégradation des sols. *European Journal of Scientific Research*. 23, (1) 149-166.
- Aubréville, A., Flore forestière de la Côte d’Ivoire. 2^{ème} édition. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne, 3 vol., 372 p., 342 p., 334 p.
- Avenard, J.M., Eldin, M., Girard, G., Sircoulon, J., Touchebeuf, P., Guillaumet, J.L., Adjanohoun, E., Perraud, A., 1971. Le milieu naturel de la Côte d’Ivoire. Mémoire ORSTOM, volume 2, 390p.
- Balac, R., 1999. Les économies pionnières prédatrices du milieu forestier : le cas de l’économie de plantation en Côte d’Ivoire. In : S. Bahuchet, D. Bley, H. Pagezy, N. Vernazza-Licht. L’homme et la forêt tropicale, pp. 429-437.
- Barbier, E., 2007. Valuing ecosystem services. *Economic Policy*. 22(49), 177–229.
- Barrios, E., Delve, R.J., Bejunda, M., Mowo, J., Agunda, J., Ramisch, J., Trejo, M.T., Thomas, R.J., 2006. Indicators of soil quality: a south–south development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*. 135, 248–259
- Beare, M.H., Coleman, D.C., Crossley, D.A., Hendrix, P.F. & Odum, E.P., 1995. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. In: The significance and regulation of soil biodiversity, Eds. Collins, H. P., Robertson, G.P. & Klug, M.J., Kluwer Academic Publishers, pp 5-22.
- Bhadauria, T., and Saxena, K.G., 2010. Role of earthworms in soil fertility maintenance through the production of biogenic structures. *Applied and Environmental Soil Science*. Volume 2010, 7pp, doi:10.1155/2010/816073.

- Bhushan, L., Sharma, P.K., 2005. Long-term effects of lantana residue additions on water retention and transmission properties of a medium-textured soil under rice–wheat cropping in northwest India. *Soil Use Management* 21, 32–37. DOI: 10.1079/SUM2005289.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Review Plant Sciences*. 23, 481–504.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Brown, G., Decaens, T., Duboisset, A., Lavelle, P., Mariani, L., Roose, E., 2004. Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 303–315.
- Blanchart, E., Lavelle, P., Braudeau, E., LeBissonnais, Y., Valentin, C., 1997. Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d’Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry*. 29, 431–439.
- Blouin, M., Barot, S., Lavelle, P., 2006. Earthworms (*Millsonia anomala*, Megascolecidae) do not increase rice growth through enhanced nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 2063-2068.
- Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., Cluzeau, D., Brun, J.J., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil science*. 64, 161-182.
- Boa, D., 1990. Caractéristiques morphologiques des gravillons ferrugineux sur le bassin versant de BoroBorotou. *Agronomie Africaine*. 2(2), 83-94.
- Bossuyt, H., Six, J., Hendrix, P.F., 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology & Biochemistry*. 37, 251–258.
- Bottinelli, N., Henry-des-Tureaux, T., hallaire, V., Mathieu, J., Benard, Y. 2010. Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions. *Geoderma*. 156, 43-47.
- Bouché, M.B., 1972. Lombriciens de France. Ecologie et systématique. INRA Publication, Paris ; 671p.
- Bouché, M.B., 1977. Stratégies lombriciennes. *In: Lohm, U. et Persson, T. (eds), Soil organism as components of ecosystems. Biol. Bull. (Stockolm)*, pp. 122-132.
- Breure, A.M., Mulder, C., Rutgers, M., Schouten, T., De Zwart, D., Bloem, J., 2004. A biological indicator for soil quality. *In: Proceedings from an OECD Expert Meeting Rome, Italy, March 2003: Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis*, pp. 485–494.

- Brou, Y.T., Oszwald, J., Bigot, S., Servat, E. 2005. Risques de deforestation dans le domaine permanent de l'état en Côte d'Ivoire : Quel avenir pour ces derniers massifs forestiers ? *Télédétection* 1-2-3, 263-275.
- Brown, G.G., Edwards, C.A., Brussaard, L., 2004. How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms. In: Edwards, C.A. (Ed.), *Earthworm Ecology*. Pp 13-49.
- Brunet, D., Barthèse, B.G., Chotte, J.L., Feller, C., 2007. Determination of carbon and nitrogen content in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoderma*. 139: 106-117.
- Brussaard, L., de Ruiter, P.C., Brown, G.G., 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 121, 233-244.
- Buckerfield, J.C., Lee, K.E., Davoren, C.W., and Hannay, J.N., 1997. Earthworms as indicators of sustainable production in dryland cropping in southern Australia. *Soil Biology and Biochemistry*. 29 (3,4), 547-554.
- Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchand, P., Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., 2009. Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observations and results from a semi-field-experiment. *Soil Biology and Biochemistry*. 41, 711-717.
- Castoldi, N., Bechini, L., 2010. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 32, 59-72.
- Cécillon, L., Cassagne, N., Czarnes, S., Gros, R., Vennetier, M., Brun, J.J., 2009. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. *Science of the Total Environment*. 407: 1200-1205.
- Chapius-Lardy, L., Brossard, M., Lavelle, P., Schouller, E., 1998. Phosphorus transformations in a ferralsol through ingestion by *Pontoscolex corethrurus*, a geophageous earthworm. *European Journal of Soil Biology*. 34, 61-67.
- Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research*. 57, 179-191.
- Chatelain, C., Dao, H., Gautier, L., Spichiger, R., 2004. Forest cover change in Côte d'Ivoire and Upper Guinea. In: Poorter, L., Bonger, F., Kouamé, F.N., Hawthorne, W.D. (eds). *Biodiversity of West Africa forest. An Ecological Atlas of Woody Plant Species*. CABI, Wallingford, 15 – 31.

- Chao, A., 2005. Species richness estimation. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Second Edition, Vol. 12, 7907-7916 (N. Balakrishnan, C. B. Read and B. Vidakovic, Editors), Wiley, New York.
- Cluzeau, D., Blanchart, E., Peres, G., Ablain, F., Cuendet, G., Fayolle, L. et Lavelle, P., 2005. Faune du sol et Lombriciens dans les sols tempérés agricoles. In: Girard, M.-C., Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J. et Morel, J.-L. (eds), *Sols et environnement 2^e cycle*. Cours, exercices et études de cas. Paris, pp. 386-407.
- Colwell, R.K., 2000. Statistical estimate of species richness and shared from sample. Version 6.01b. <http://viceroy.eeb.ucon.edu/estimate>.
- Cook, M.E., and Swait, A.A.J., 1975. Effects of some fungicide treatments on earthworm populations and leaf removal in apple orchards. *Journal of Horticulture Sciences*. 50, 495-499.
- CORPEN, 2003. "Des indicateurs pour des actions locales de maîtrise des pollutions de l'eau d'origine agricole : éléments méthodologiques, application aux produits phytosanitaires." Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et des Affaires Rurales (MAPAR), Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD), Paris. 136p.
- Csuzdi, C., Tondoh, E.J., 2007. New and little-known earthworm species from the Ivory Coast (Oligochaeta: acanthodrilidae: Benhamiinia-Eudrilidae). *Journal of Natural History*. 41, 2551-2567.
- Curry, J.P., 2004. Factors affecting earthworms abundance in soil. In: Edwards C.A. (Ed), *Earthworm Ecology*. CRC Press, Boca Raton, 94-114.
- Dao, H., 1999. Connaissances de l'environnement et systèmes d'information géographiques: le cas de la déforestation en Côte d'Ivoire. Thèse de l'Université de Genève, Mention Biologie, 370 p.
- Darwin, C., 1881. The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits. Murray, London, 298 pp.
- Decaëns, T., Bureau, F., and Margerie, P., 2003. Earthworm communities in a wet agriculture landscape of the Seine Valley (Upper Normandy, France). *Pedobiologia* 47: 479-489.
- Decaëns, T., Margerie, P., Aubert, M., Hedde, M., et Bureau, F., 2008. Assembly rules within earthworm communities in North-Western France –A regional analysis. *Applied Soil Ecology*. 39, 321-335.
- Derouard, L., Tondoh, J., Vilcosqui, L., Lavelle, P., 1996. Effects Of earthworm introduction on soil processes and plant growth. *Soil Biology and Biochemistry*. 29, 542–545.

- De Rouw, A., Huon, S., Soullileuth, B., Jouquet, P., Pierret, A., Ribolzi, O., Valentin, C., Bourdon, E., Chantharath, B., 2010. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). *Agriculture Ecosystems and Environment* 136, 148–161.
- Dharmakeerthi, R.S., Kay, B.D., Beauchamp, E.G., 2004. Effect of soil disturbance on N availability across a variable landscape in southern in Ontario. *Soil and Tillage Research*. 78, 101-112.
- Dlamini, T.C., and Haynes, R.J., 2004. Influence of agricultural land use on the size and composition of earthworm communities in northern Kwazulu-Natal, South Africa. *Applied Soil Ecology* 27: 77-88.
- Doblas-Miranda, E., Sanchez-Pinero, F., Gonzales-Megias, A., 2009. Different structuring factors but connected dynamics shape litter and belowground soil macrofaunal food webs. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 2543–2550.
- Don, A., Steinberg, B., Schöning, I., Pritsch, K., Joschko, M., Gleixner, G., Schulze, E.D., 2008. Organic carbon sequestration in earthworm burrows. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1803–1812.
- Doran, J.W., 2002. Soil health and global sustainability : translating science into practice. *Agriculture Ecosystems and Environment* . 88, 119–127.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality. In : Doran et al., (eds). Defining soil quality for a sustainable environment. Chapter 4, 1st ed. *Soil Science Society America*. Pub. N° 35, Madison, WI, 3-21.
- Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In: Biological Indicators of Soil Health (eds. C.E. Pankhurst, B.M. Doube & V.V.S.R. Gupta), pp. 1-28. CAB International, Wallingford, UK.
- Duchaufour, P., 1997. Abrégé de pédologie-sol, végétation, environnement. Masson (eds). 291 p.
- Dufrêne, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*. 67, 345–366.
- Dumanski, J., Pieri, C., 2000. Land quality indicators: research plan. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 81, 93–102.
- Edwards, C. A. et Bohlen, P. J., 1996. Biology and Ecology of Earthworms 3rd ed. Chapman and Hall, London, 426 pp.
- Eijsackers, H., 1982. Soil fauna and soil microflora as possible indicators of soil pollution. *Environmental Monitoring Assessment*. 3:307-316.

- Eijsackers, H., 2004. Leading concepts towards vital soil. *In: Vital Soil: Function, Value, and Properties* (eds. P. Doelman & H. Eijsackers). *Developments in Soil Science*. 29:1-20.
- Ellis, S., Mellor, A., 1995. *Soils and Environment*. Routledge (eds). 364 pp.
- Eltaif, N.I., and Gharaibeh, M.A., 2009. Aggregation of undisturbed soil mesocosms inoculated by earthworms after different cultivation-tillage systems. *Soil and Tillage Research*. 106, 104-106.
- Eriksen-Hamel, N.S., Speratti, A.B., Whalen, J.K., Legere, A., Madramootoo, C.A., 2009. Earthworm populations and growth rates related to long-term crop residue and tillage management. *Soil and Tillage Research*. 104, 311–316.
- Eriksen-Hamel, N.S., Whalen, K.J., 2007. Impacts of earthworms on soil nutrients and plant growth in soybean and maize agroecosystems. 2007. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 120, 442-448.
- Erkossa, T., Itanna, F., and Stahr, K., 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Australian Journal of Soil Research*. 45: 129-137.
- Ernst, G., Felten, D., Vohland, M., Emmmerling, C., 2009. Impact of ecologically different earthworm species on soil water characteristics. *European Journal of Soil Biology*. 45, 207-213.
- Ernst, G., Henseler, I., Felten, D., Emmerling, C., 2009. Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1548–1554.
- Ferraro, D.O., Ghersa, C.M., Sznaider, G.A., 2003. Evaluation of environmental impact indicators using fuzzy logic to assess the mixed cropping systems of the Inland Pampa, Argentina. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 96, 1–18.
- Fonte, S.J., Kong, A.Y.Y., Chris van Kessel, Hendrix, P.F., Six, J., 2007. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management. *Soil Biology and Biochemistry*. 39, 1014–1022.
- Fonte, S.J., Winsome, T., et Six J. 2009. Earthworm populations in relation to soil organic matter dynamics and management in California tomato cropping systems. *Applied Soil Ecology*. 41, 206-214
- Francis, G.S., Fraser, P.M., 1998. The effects of three earthworms species on soil Macroporosity and hydraulic conductivity. *Applied Soil Ecology*. 10, 11-19.
- Geissen, V., Pena-Pena, K., Huerta, E., 2009. Effect of different land-use on soil chemical properties, decomposition rate and earthworms communities in tropical Mexico. *Pedobiologia*. 53, 75-86.

- Gilot-Vellenave, C., Lavelle, P., Ganry, F., 1996. Effects of a tropical geophageous earthworm, *Millsonia anomala*, on some soil characteristics, on maize-residue decomposition and on maize production in Ivory Coast. *Applied Soil Ecology*. 4, 201-211.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., Rubio, J., 2004. Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires. *Geoderma*. 118, 17–38.
- Gobat, J.M., Aragno, M. and Matthey, W., 2003. The living soil: basic pedology-soil biology (2nd edition). Chapman and Hall, London, 569p.
- Golchin, A., Asgari, H., 2008. Land use effect on soil quality indicators in north-eastern Iran. *Australian Journal of Soil Research*. 46, 27-36.
- Gray, J. S., Pearson, T. H., 1982. Objective selection of sensitive species indicative of pollution induced change in benthic communities. *Comparative methodology. Marine Ecology Progress Series*, 9, 111-119.
- Guéi, A.M., Koné, A.W., Tondoh, E.J., 2009. Utilisation des légumineuses pour la restauration des peuplements de macro-invertébrés des sols en zone de forêt semi-decidue. Rapport d'activité du projet CSM-BGBD, phase II. 23p.
- Hamilton, W. E. et Sillman, D. Y., 1989. Influence of earthworm middens on the distribution of soil microarthropods. *Biology Fertility and Soils*. 8, 279-284.
- Harmand, J.M., & Nutti, C.F., 1998. Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. In *Agriculture et développement* n° 18 – Juin 1998.
- Hawthorne, W.D., Jongkind, C., 2006. Woody plants of western african forests. A guide to the forest trees, shrubs and lianes from Senegal to Ghana. Kew Publishing, Royal Botanic Gardens, Kew, UK, 1023 p.
- Helling, B., Larink, O., 1998. Contribution of earthworms to nitrogen turnover in agricultural soil treated with different mineral N-fertilizers. *Applied Soil Ecology*. 9, 319-325.
- Henle, K., Alard, D., Clitherow, J., Cobb, P., Firbank, L., Kull, T., McCracken, D., Moritz, R.F.A., Niemela, J., Rebane, M., Wascher, D., Watt, A., Young, J., 2008. Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe-a review. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 124, 60–71.
- Hseu, Z.Y., Chen, Z.S., Tsai, C.C., 1999. Selected indicators and conceptual framework for assessment methods of soil quality in arable soils of Taiwan. *Soil Environment*. 2, 77-88.

- Huerta, E., Rodriguez-Olan, J., Evia-Castillo, I., Montejo-Meneses, E., De la Cruz-Mondragon, M., Garcia-Hernandez, R., Uribe, S., 2007. Earthworms and soil properties in Tabasco, Mexico. *European Journal of Soil Biology*. 43, S190-S195.
- Hussain, I., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen, D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Research*. 50, 237–249.
- Hutchinson, J., Dalziel, J.M., 1954-1972. Flora of West tropical Africa. (éd 2 par Keay, R.W.J., Hepper, F.N.), Crown Agent, London, 3 Vol., 828 p., 544 p., 574 p.
- Hong, H.N., Rumpfen, C., des Tureau, T.H., Bardoux, G., Billou, D., Duc, T.T., Jouquet, P., 2011. How do earthworms influence organic matter quantity and quality in tropical soils ? *Soil Biology and Biochemistry*. 43, 223-230.
- INS, 1998. Recensement Générale de la Population et de l’Habitat. Vol III : Données socio-démographiques des localités. Tome 1 : Résultats définitifs par localité. Région du Fromager. Abidjan, 29 p.
- Jégou, D., Brunotte, J., Rogasik, H., Capowicz, Y., Diestel, H., Schrader, S. et Cluzeau, D., 2002. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology*. 38, 329-336.
- Jiménez, J.J., Decaëns, T., 2004. The impact of soil organisms on soil functioning under neotropical pastures: a case study of a tropical anecic earthworm species. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 103, 329-342.
- Jones, C.G., Lawton, J.H. and Shachak, M., 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*. 69, 373-386.
- Jouquet, P., Bottinelli, N., Podwojewski, P., Hallaire, V., Duc, T.T., 2008. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*. 146, 231-238.
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlof, J., Lavelle, P., Lepage, M., 2006. Soil invertebrates as ecosystem engineers : intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*. 32, 153–164.
- Kemper, W.D., and Rosenau, RC., 1986. Aggregate stability and size distribution. 425–442. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. *Soil Science Society of America*. Book Ser. 5. Madison, WI.
- Kibberwhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 368, 685-701.

- Koné, W.A., 2009. Qualité des sols en zone de savane humide de Côte d'Ivoire : Utilisation des légumineuses herbacées comme alternative pour une valorisation des terres marginales et une agriculture durable. Thèse unique de Doctorat, n° 46, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 194 p.
- Koné A.W., Tondoh E.J., Angui, P.T.K., Bernhard-Reversat F., Loranger-Merciris G., Brunet D., Brédoumi, S.T.K., 2008. Is soil quality improvement by legume cover crops a function of the initial soil chemical characteristics? *Nutrients Cycling Agroecosystems*. DOI 10.1007/s10705-008-9172-4.
- Kosmas, C., Danalatos, N.G., Gerontidis, S.T., 2000. The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions. *Catena*. 40, 3–17.
- Kra, D.K., Doumbia, M., Klimaszewski, J., Kwadjo, K.E., 2010. Distribution des scarabaeidae (Coléoptères) le long d'un gradient d'utilisation des terres (Oumé-Côte d'Ivoire). *Journal of Animal & Plant Sciences*. 6(1), 571-578.
- Lagomarsino, A., Moscatelli, M.C., Tizio, A. Di, Mancinelli, R., Grego S., and Marinari, S., 2009. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment. *Ecological Indicators*. 9, 518 – 527.
- Lal, R., 1997. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304, 1623-1627.
- Laossi, K.-R., Ginot, A., Noguera, D.C., Blouin, M., Barot, S., 2009. Earthworm effects on plant growth do not necessarily decrease with soil fertility. *Plant and Soil*. 328, 109-118.
- Larsen, T.H., Williams, N.M., Kremen, C., 2005. Extinction order and altered community structure rapidly disrupt ecosystem functioning. *Ecology Letters*. 8, 538–547.
- Larson, W.E., Pierce, F.J., 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *In: Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World 2*: 175-203.
- Lavelle, P., 1978. Les vers de terre de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire) : Peuplements, Populations et Fonctions dans l'écosystème. Publication du Laboratoire Zoologique, ENS, n°12. 301p.
- Lavelle, P., 1981. Stratégies de reproduction chez les vers de terre. *Acta Oecologica*. 2, 117-133.
- Lavelle, P., Barois, I., Blanchart, E., Brown, G., Brussaard, L., Decaëns, T., Fragoso, C., Jiménez, J. J., Ka Kajondo, K., De los Angeles Martinez, M., Moreno, A., Pashanasi,

- B., Senapati, B. et Villenave, C., 1998. Les vers de terre, une ressource dans les agrosystèmes tropicaux. *Nature et Ressources*. 34, 26-41.
- Lavelle, P., Bibnell, D., Lepage, M., Wolter, V., Roger, P., Inerson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*. 33(4), 159-193.
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, F., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*. 42(1), 3–15.
- Lavelle, P., Spain, A., 2001. Soil ecology, 1st edition Kluwer, Amsterdam. 654p.
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.P., Trommetter M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France). 116 p.
- Lévêque, C., 1997. Biodiversity and conservation: the freshwater fish of tropical Africa. Cambridge University Press, 432p.
- Lobry de Bruyn, L.A., 1997. The status of soil macrofauna as indicators of soil health to monitor the sustainability of Australian agricultural soils. *Ecological Economics*. 23, 167-178.
- Logsdon, S.D., Karlen, D.L., 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil & Tillage Research*. 78, 143-149.
- Loranger-Merciris, G., Cabidoche, Y.M., Deloné, B., Quénéhervé, P., Ozier-Lafontaine, H., 2012. How earthworm activities affect banana plant response to nematodes parasitism. *Applied Soil Ecology*. 52, 1-8.
- Loranger-Merciris, G., Laossi, K-R., Bernhard-Reversat, F., 2008. Soil aggregation in laboratory experiment: Interaction between earthworms, woodlice and litter palatability. *Pedobiologia*. 51, 439-443.
- Manlay, R.J., Masse, D., Chotte, J.L., Feller, C., Kairé, M., Fardoux, J. Pontanier ,R., 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agroecosystems of a West African savanna. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 88, 233-244.
- Marashi, A.R.A., Scullion, J., 2003. Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils. *Biology Fertility and Soils*. 37, 375–380.
- Marhan, S., Scheu, S., 2005. The influence of mineral and organic fertilizers on the growth of the endogeic earthworm *Octolasion tyrtaeum* (Savigny). *Pedobiologia*. 49, 239-249.

- Mariscal, I., Peregrina, F., Terefe, T., Gonzalez, P., Espejo, R., 2007. Evolution of some physical properties related to soil quality in the degraded ecosystems of rana formation from SW Spain. *Sciences of the Total Environment*. 378, 130-132.
- Martin, D., Lal, T., Sachdev, C.B., Sharma, J.P., 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and use condition Garhwal hills of the Indian Hymalayan mountains. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 138, 64-73.
- Marzaioli, R., D'Ascoli, R., De Pascale, RA., Rutigliano, F.A., 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*. 44, 205-212.
- Mathieu, J., Grimaldi, M., Jouquet, P., Rouland, C., Lavelle, P., Desjardins, T., Rossi, J.P., 2009. Spatial patterns of grasses influence soil macrofauna biodiversity in amazonian pastu res. *Soil Biology and Biochemistry*. 41, 586-593.
- Mathieu, J., Rossi, J.P., Grimaldi, M., Mora, P., Lavelle, P., Rouland, C., 2005. A multi-scale study of soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. *Biology and Fertility of Soils*. 40, 300–305.
- Mathieu, J., Rossi, J.P, Mora, P., Lavelle, P., Martins, P.F.D.S., Rouland, C., Grimaldi, M., 2005. Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in Eastern Amazonia, Brazil. *Conservation Biology*.19, 1598–1605.
- Mausbach, M.S., Tugel, A., 1997. Soil quality: A multitude of approaches. Kearney Foundation Symposium. California Soil Quality: from critical research to sustainable management. Berkeley, California, March 25.
- Mazaud, D and Bouché, B., 1980. Introduction en surpopulation et migrations de Lombriciens marques. In *Soil Biology as Related to Land Use Practises*. Ed. D Dindal : 687-701. EPA, Washington D.C.
- Mboukou-Kimbatsa, I., Bernhard-Reversat, F., Lometo, J.J, Nga, J., Lavelle, P., 2007. Understory vegetation soil structure and soil invertebrates in Congolese eucalypt plantations, with special reference to the invasive plant *Chromolaena odorata* and earthworm populations. *European Journal of soil Biology*. 43, 48-56.
- McIntyre, S., Lavorel, S., 2007. A conceptual model of land use effects on the structure and function of herbaceous vegetation. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 119, 11–21.
- Meier, U., 2001. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées. BBCH Monographie, 2^e éd. 166p

- Millenium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and human well-being, Synthesis, <http://millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (consulté en août 2009), 155 pp.
- Monnier, Y., 1983. Carte de la végétation de la Côte d'Ivoire. *In* Vennetier, P. et Laclaver, G., (eds) : Atlas de Côte-d'Ivoire. 2^e éd. Jeune Afrique, Paris, 72p.
- Morel, R., 1996. Les sols cultivés. Techniques et documentation. Lavoisier ed. 378p.
- Morvan, X., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Bellamy, P.H., Stenphens, M., Kibblewhite, M.G., 2008. Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sciences of the Total Environment*. 391, 1-12.
- Muys, B and Granval, P., 1997. Earthworms as bio-indicators of forest site quality. *Soil Biology and Biochemistry*. 29, 323-328.
- Nahmani, J., Lavelle, P., Rossi, J.P., 2006. Does changing the taxonomical resolution alter the value of soil macroinvertebrates as bioindicators of metal pollution? *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 385-396.
- N'Dri, J.K., André, H.M., 2011. Soil mite densities from central Ivory Coast. *Journal of Animal & Plant Sciences*. 10(2), 1283-1299.
- Nortcliff, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 88, 161–168.
- Norgrove, L., Csuzdi, C., Forzi, F., Canet, M., Gounes, J., 2009. Shifts in soil faunal community structure in shaded cacao agroforests and consequences for ecosystem function in Central Africa. *Tropical Ecology*. 50 (1), 71-78.
- Obalum, S.E., Obi, M.E., 2010. Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practises and cropping systems. *Soil and Tillage Research*. 108, 30-36.
- Ouédrago, E., Mando, A., Brussaard, L., 2006. Soil macrofauna affect crop nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. *European Journal of Soil Biology*. 42, S275-S277.
- Paoletti, M.G., Favretto, M.R., Stinner, B.R., Purrington, F.F., Bater, J.E., (1991) Invertebrates as bioindicators of soil use. *Agriculture Ecosystems and Environment* .34, 341-362.
- Parr, J.F., Papendick, S.B., Hornick, S.B., Meyer, R.E., 1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. 7, 5-11.

- Pashanasi, B., Lavelle, P., Alegre J., Charpentier, F., 1996. Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on soil chemical characteristics and plant growth in a low-input tropical agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*. 28, 801-810.
- Paul, S., Martinson, G.O., Veldkamp, E., 2008. Sample pretreatment affects the distribution of organic carbon in aggregates of tropical grassland soils. *Soil Science Society of America*. 72, 500-506.
- Picard, N., 2006. Méthode d'inventaire forestier. Projet de développement rural participatif dans le moyen Atlas central (projet Khénifra), CIRAD, 43p
- Pielou, P.C., 1977. *Mathematical ecology*. Wiley, New York. 159 p.
- Perel, T.S., 1977. Differences in lumbricid organization connected with ecological properties. In: Lohm, U. et Persson, T. (eds), *Soil organisms as components of ecosystems*. Ecology Bulletin, Stockholm, 56-63.
- Popp, V.V., and Postolache, T., 1987. Giant earthworms build vermic mountain Rendzinas. In: Bonvicini Plagiai, A., Omodeo, P., (ed) *On earthworms*, Mucchi, Modena, 141-150.
- Prober, S.M., Smith, F.P., 2009. Enhancing biodiversity persistence in intensively used agricultural landscapes: A synthesis of 30 years of research in the Western Australian wheatbelt. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 132, 173-191.
- Pulleman, M.M., Six, J., Uyl, A., Marinissen, J.C.Y., Jongmans, A.G., 2005. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Applied Soil Ecology*. 29, 1-15.
- Qui, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*. 149: 325-334.
- Reeves, D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research*. 43, 131-167.
- Richards, S., Hewson, K., Moller, H., Wharton, D., Campbell, H., Benge, J. and Manhire, J., 2007. Soil biota as indicators of soil quality in organic and integrated management kiwifruit orchards in New Zealand. *Acta Horticulturae*. 52, 627-632.
- Rombke, J., Jansch, S. and Didden, W. 2005. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology Environment Safety*. 62, 249-265.
- Rosas-Medina, M.A., de Leon-Gonzalez, F., Flores-Macias, A., Payan-Zelaya, F., Borderas-Tordesillas, F., Gutierrez-Rodriguez, F., Frago-Gonzalez, C., 2010. Effect of tillage,

- sampling date and soil depth on earthworm population on maize monoculture with continuous stover restitutions. *Soil & Tillage Research*. 108, 37–42.
- Rossi, J.P., 2003. The spatiotemporal pattern of a tropical earthworm species assemblage and its relationship with soil structure. *Pedobiologia*. 47, 497-503.
- Rossi, J.P., Blanchart, E., 2005. Seasonal and land-use induced variations of soil macrofauna composition in Western Ghats, southern India. *Soil Biology and Biochemistry*. 37, 1093-1104.
- Rossi, J.P., Celini, L., Mora, P., Mathieu, J., Lapied, E., Nahmani, J., Ponge, J.F., Lavelle, P., 2010. Decreasing fallow duration in tropical slash-and-burn agriculture alters soil Macro-invertebrate diversity: A case study in southern French Guiana. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 135, 148-154.
- Ruiz, N., Jérôme, M., Léonide, C., Christine, R., Gérard, H., Etienne. I., Patrick, L., 2011. IBQS : A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrates communities. *Soil Biology and Biochemistry*. 43, 2032-2045.
- Sarr, M., Agbogba, C., Russell-Smith, A., Masse, D., 2001. Effects of soil faunal activity and woody shrubs on water infiltration rates in a semi-arid fallow of Senegal. *Applied Soil Ecology*. 16, 283-290.
- Scheu, S., 2003. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia*. 47, 846–856.
- Sey, B., 2010. Caractérisation de la végétation en zone de forêt semi-décidue. Rapport d'activité du projet CSM-BGBD, phase II. 60p.
- Shukla, M.K., Lal, R., Ebinger, M., 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*. 87, 194-204.
- Simonsen, J., Posner, J., Rosemeyer, M., Baldock, J., 2010. Endogeic and anecic earthworm abundance in six Midwestern cropping systems. *Applied Soil Ecology*. 44, 147-155.
- Slaats, J.J.P., van der Heiden, W.M., Stockmann, C.M., Wessel, M., Janssen, B.H., 1996. Growth of the *Chromolaena odorata* fallow vegetation in semi-permanent food crop production systems in south-west Cote d'Ivoire. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 44, 179–192.
- Spain, A.V., Lavelle, P., Mariotti, A., 1992. Stimulation of plant growth by tropical earthworms. *Soil Biology and Biochemistry*. 102, 1629-1633.
- Swift, M.J., Izac, A.M.N., van Noordwijk, M., 2004. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes — are we asking the right questions? *Agriculture Ecosystems & Environment*. 104, 113–134.

- Thioulouse, J., Chessel, D., Dolédec, S., Olivier, J.M., 1997. ADE-4 : a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing*. 7, 75-83.
- Thomas, F., Folgarait, P., Lavelle, P., Rossi, J.P., 2004. Soil macrofaunal communities along an abandoned rice field chronosequence in Northern Argentina. *Applied Soil Ecology*. 27, 23-29.
- To, J., and Kay, B.D., 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*. 126, 261–276.
- Tondoh, E.J., 1998. Démographie et fonctionnement des populations de vers de terre *Hyperiodrilus africanus* (Eudrilidae) dans une savane protégée du feu en moyenne Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat Unique, Université Paris 6, 209p.
- Tondoh, E.J., 1998. Effect of coffee residues on reproduction of *Hyperiodrilus africanus* (Oligochaeta, Eudrilidae) in Ivory Coast. *Biology and Fertility of Soils*. 26, 336-340.
- 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 and Conservation*. 20, 169-184.
- Tondoh, E.J., Lavelle, P., 1997. Effect of two organic residues on growth and cocoon production of the earthworm *Hyperiodrilus africanus* (Eudrilidae). *European Journal of Soil Biology*. 33, 13-18.
- Tondoh, E.J., Koné, A.W., N'Dri, J.K., Tamene, L., Brunet, D., 2013. Changes in soil quality after subsequent establishment of *Chromolaena odorata* fallows in humid savannahs, Ivory Coast. *Catena*. 101, 99-107.
- Tondoh, E.J., Lavelle, P., 2005. Population dynamics of *Hyperiodrilus africanus* (Oligochaeta, Eudrilidae) in Ivory Coast. *Journal of Tropical Ecology*. 21, 1-8.
- Tondoh, E.J., Monin, M.L., Tiho S., Csuzdi C., 2007. Can earthworms be used as bio-indicators of land-use perturbations in semi-deciduous forest? *Biology and Fertility of Soils*. 43, 584-592.
- Topoliantz, S., Ponge, J.F., Viaux, P., 2000. Earthworm and enchytraeid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant Soil*. 225, 39–51.
- Tra Bi, C.S., Konaté, S., Tano, Y., 2010. Diversité et abondance des termites (Insecta : Isoptera) dans un gradient d'âge de paillis de cabosse. *Journal of Animal & Plant Sciences*. 6(3), 685-699.

- Turbé, A., De Toni, A., Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz, N., Van der Putten, W.H., Labouze, E., and Mudgal, S., 2010. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment), 250p.
- Uvarov, A.V., 2009. Inter- and intraspecific interactions in lumbricid earthworms: their role for earthworm performance and ecosystem functioning. *Pedobiologia*. 53, 1-27.
- Van der Putten, W.H., 2003. Plant defense belowground and spatiotemporal processes in natural vegetation. *Ecology*. 84(9), 2269-2280.
- Van Eekeren, N., Bommelé, L., Bloem, J., Schouten, T., Rutgers, M., De Goede, R., Reheul, D., Brussaard, L., 2008. Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology*. 40, 432-446.
- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga, N., 2010. Integrated soil fertility management. Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture*. 39, 17-24.
- Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2006. Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan; Africa. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 116, 34-46.
- Vélasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007a. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*. 39, 3066-3080.
- Vélasquez, E., Lavelle, P., Barrios, E., Joffre, R., Reversat, F., 2005. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biology and Biochemistry*. 37, 889-898.
- Velasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Martin, M., Rendeiro, A.C., Barrios, E., Lavelle, P., 2007b. This ped is my ped : Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. *Pedobiologia*. 51, 75-87.
- Vinota, S.P., Parthasarathi, K., and Ranganathan, L.S., 2000. Enhanced phosphatase activity in earthworm casts is more of microbial origin. *Current Sciences*. 79, 1158-1159.
- Wainger, L.A., King, D.M., Mack, R.N., Price, E.W., Maslin, T., 2010. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions? *Ecological Economics*. 69, 978-987.

- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 34, 29-38.
- Wan, J.H.C., and Wong, M.H., 2004. Effects of earthworm activity and P-solubilizing bacteria on P-availability in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences*. 167, 209-213.
- Wardle, D.A.; Bardgett, R.D.; Klironomos, J.N.; Setälä, H.; Van der Putten, W.H.; Wall, D.H., 2004. Ecological Linkage Between Aboveground and Belowground Biota. *Science*. 304, 1629 – 1633.
- Xueyong, P., Ning, W., Qing, L., Weikai, B., 2009. The relation among soil microorganism, enzyme activity and soil nutrients under subalpine coniferous forest in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*. 29, 286-292.
- Yachi, S., Loreau, M., 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proceedings of National Academy Science*. 96, 1463-1468.
- Yao, K.T., 2008. Typologie des systèmes d'utilisation des sols dans la périphérie de la forêt de Téné (Oumé): Diagnostic pour une gestion durable. Mémoire de DUT, Université de Bouaké, URES de Korhogo. 21p.
- Zirbes, L., Collin, C., Dufey, J., Tu, P.K., Duyet, N., Francis, F., Lebailly, P., Haubruge, E., Brostaux, Y., 2009. Mise en relation de la diversité des vers de terre et des caractéristiques du sol de Thua Thien hue (Centre Vietnam). *Tropical Conservation Science*. 2(3), 282-298.
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., Gomez, I., 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biology and Biochemistry*. 40, 2079-2087.
- Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., Mayoral, A.M., Morales, J., Mataix-Beneyto, J., Gomez, I., 2007. Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain. *Geoderma*. 142, 334-341.

ANNEXES

ANNEXE 1

Liste d'espèces végétales récéncées dans les différents types d'usage des sols des 3 sites d'étude

Le signe + indique la présence des différentes espèces dans les types d'usage des sols

Familles	Espèces	"Site Pétit Bouaké"							"Site Djè Koffikro"							"Site N'Kroiédjô"										
		FS	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV	FS	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV	FP	TK14	TK8	Ca20	Ca10	Ca5	J5	J2	CV		
Papilionaceae	<i>Abrus precatorius</i>			+				+	+					+		+									+	
Malvaceae	<i>Abutilon mauritianum</i>																							+	+	
Mimosaceae	<i>Acacia kamerunensis</i>	+				+			+			+	+			+	+	+						+	+	
Euphorbiaceae	<i>Acalypha sp</i>												+													
Malpighiaceae	<i>Acridocarpus smeathmanii</i>															+										
Poaceae	<i>Acroceras gabunense</i>			+																				+	+	+
Zingiberaceae	<i>Aframomum septrum</i>																								+	
Connaraceae	<i>Agelaea pentagyna</i>	+														+		+							+	
Asteraceae	<i>Ageratum conyzoides</i>					+					+	+														
Rubiaceae	<i>Aidia genipiflora</i>	+																							+	
Apocynaceae	<i>Alafia barteri</i>	+												+											+	
Mimosaceae	<i>Albizia adhiantiflora</i>	+		+				+				+	+	+				+	+	+				+		
Mimosaceae	<i>Albizia lebeck</i>					+								+										+	+	
Mimosaceae	<i>Albizia zygia</i>	+			+	+					+			+	+			+	+	+				+	+	+
Euphorbiaceae	<i>Alchornea cordifolia</i>						+	+		+	+			+	+			+		+	+			+	+	+
Sapindaceae	<i>Allophyllus africanus</i>	+																+		+						
Sapindaceae	<i>Allophyllus spicatus</i>	+		+			+																			
Apocynaceae	<i>Alstonia boonei</i>																								+	
Amaranthaceae	<i>Alternanthera pungens</i>			+																					+	
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale</i>																								+	
Bromeliaceae	<i>Ananas comosus</i>	+	+									+	+	+					+				+	+	+	
Araceae	<i>Anchomanes difformis</i>		+							+			+	+	+	+				+				+	+	

Asteraceae	<i>Chromolaena odorata</i>	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+	+
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum albidum</i>														+							
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum giganteum</i>							+							+							
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum perpulchrum</i>														+							
Sapindaceae	<i>Chytranthus carneus</i>															+						
Menispermaceae	<i>Cissanperos ovariensis</i>		+			+	+		+	+	+											
Rutaceae	<i>Citrus sinensis</i>							+	+	+			+	+	+							
Verbenaceae	<i>Clerodendrum umbellatum</i>	+	+	+	+			+	+	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+
Verbenaceae	<i>Clerodendrum verticillatum</i>												+							+		
Verbenaceae	<i>Clerodendrum volubile</i>	+	+			+		+	+	+				+	+				+	+	+	+
Connaraceae	<i>Cnestis corniculata</i>	+						+					+									+
Connaraceae	<i>Cnestis ferruginea</i>		+	+	+			+	+	+			+	+	+		+	+	+	+	+	+
Rubiaceae	<i>Coffea canefora</i>							+		+					+							
Rubiaceae	<i>Coffea liberica</i>								+													
Sterculiaceae	<i>Cola caricaefolia</i>	+				+	+	+				+	+	+			+		+			+
Sterculiaceae	<i>Cola gigantea var glabescens</i>	+				+	+	+				+	+		+	+	+	+		+		
Sterculiaceae	<i>Cola reticulata</i>		+					+							+							
Combretaceae	<i>Combretum hispidum</i>							+	+	+			+	+			+	+				
Combretaceae	<i>Combretum mucronatum</i>								+	+	+	+	+									
Combretaceae	<i>Combretum paniculatum</i>		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+
Combretaceae	<i>Combretum racemosum</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+
Commelinaceae	<i>Commelina diffusa</i>		+			+	+	+	+	+	+	+	+				+					+
Commelinaceae	<i>Commelina erecta</i>								+	+												
Connaraceae	<i>Connarus africanus</i>															+						
Rubiaceae	<i>Corynanthe pachyceras</i>	+				+																
Euphorbiaceae	<i>Croton hirtus</i>	+				+					+						+			+	+	+
Araceae	<i>Culcasia saxatilis</i>														+							
Araceae	<i>Culcasia liberica</i>																					+
Amaranthaceae	<i>Cyathula prostrata</i>		+	+	+			+	+	+	+	+					+		+			+
Papilionaceae	<i>Dalbergia albiflora</i>														+			+				+

ANNEXE 2

Photos de quelques espèces échantillonnées (Guéi, 2008)



Dichogaster mamillata



Dichogaster papillosa



Dichogaster lamottei



Millsonia nilesi



Agastrodrilus multivesiculatus



Agastrodrilus opisthogynus

ANNEXE 3

Résultats du calcul des valeurs indicatrices des espèces de vers de terre. Nous nous sommes arrêtés au niveau de partition 4

Level	Species	IV	Group	Node	Mean	Std	t	
1	<i>M. lamtoiana</i>	47.83	1		47.83	0	0	NS
1	<i>M. omodeoi</i>	78.26	1		78.26	0	0	NS
1	<i>Millsonia nilesi</i>	26.09	1		26.09	0	0	NS
1	<i>D. baeri</i>	100	1		100	0	0	NS
1	<i>D. terraenigrae</i>	91.3	1		91.3	0	0	NS
1	<i>D. saliens</i>	82.61	1		82.61	0	0	NS
1	<i>D. erhrhardti</i>	86.96	1		86.96	0	0	NS
1	<i>D. lamottei</i>	13.04	1		13.04	0	0	NS
1	<i>D. papillosa</i>	78.26	1		78.26	0	0	NS
1	<i>D. eburnea</i>	82.61	1		82.61	0	0	NS
1	<i>D. mamillata</i>	30.43	1		30.43	0	0	NS
1	<i>Dichogaster sp.</i>	43.48	1		43.48	0	0	NS
1	<i>Dichogaster affinis</i>	26.09	1		26.09	0	0	NS
1	<i>Gordiodrilus paski</i>	56.52	1		56.52	0	0	NS
1	<i>H. africanus</i>	65.22	1		65.22	0	0	NS
1	<i>S. compositus</i>	26.09	1		26.09	0	0	NS
1	<i>S. zielae</i>	95.65	1		95.65	0	0	NS
1	<i>S. palustris</i>	43.48	1		43.48	0	0	NS
1	<i>A. multivesiculatus</i>	56.52	1		56.52	0	0	NS
1	<i>A. opisthogynus</i>	4.35	1		4.35	0	0	NS
2	<i>M. lamtoiana</i>	22.52	2	1	40.77	13.61	-1.34	NS
2	<i>M. omodeoi</i>	74.33	1	1	55.8	12.9	1.437	NS
2	<i>Millsonia nilesi</i>	62.26	2	1	28.42	13.17	2.57	**
2	<i>D. baeri</i>	71.62	2	1	64.72	8.64	0.799	NS
2	<i>D. terraenigrae</i>	69.96	2	1	63.04	11.46	0.604	NS
2	<i>D. saliens</i>	81.52	2	1	57.15	11.11	2.193	**
2	<i>D. erhrhardti</i>	74.15	2	1	59.14	11.51	1.304	NS
2	<i>D. lamottei</i>	30.3	2	1	19.17	8.71	1.278	NS
2	<i>D. papillosa</i>	54.53	1	1	58	13.3	-0.261	NS
2	<i>D. eburnea</i>	89.94	2	1	59.54	11.45	2.656	**
2	<i>D. mamillata</i>	96.07	2	1	30.54	12.35	5.305	**
2	<i>Dichogaster sp.</i>	21.32	1	1	39.35	12.73	-1.416	NS
2	<i>Dichogaster affinis</i>	56.14	2	1	28.11	12.18	2.301	??
2	<i>Gordiodrilus paski</i>	65	1	1	47.02	13.87	1.297	NS
2	<i>H. africanus</i>	75	1	1	50.9	13.24	1.821	??
2	<i>S. compositus</i>	51.28	2	1	28.55	12.11	1.877	??
2	<i>S. zielae</i>	78.25	2	1	62.95	11.43	1.339	NS
2	<i>S. palustris</i>	90.07	2	1	39.6	13.72	3.677	**
2	<i>A. multivesiculatus</i>	49.92	1	1	45.41	13.22	0.341	NS
2	<i>A. opisthogynus</i>	5	1	1	9.02	9.9	-0.406	NS
3	<i>M. lamtoiana</i>	16.82	2	1	32.79	11.46	-1.394	NS

3	<i>M. omodeoi</i>	56.14	2	1	41.8	9.74	1.472	NS
3	<i>Millsonia nilesi</i>	58.62	3		26.14	13.64	2.381	**
3	<i>D. baeri</i>	55.08	3		46.79	6.74	1.229	NS
3	<i>D. terraenigrae</i>	52.86	3		50.01	10.22	0.279	NS
3	<i>D. saliens</i>	69.1	3		43.38	9.59	2.682	**
3	<i>D. erhrhardti</i>	57.24	3		43.83	8.73	1.536	NS
3	<i>D. lamottei</i>	27.27	3		18.8	9.97	0.85	NS
3	<i>D. papillosa</i>	33.07	1	1	45.32	11.07	-1.107	NS
3	<i>D. eburnea</i>	81.58	3		45.66	10.39	3.457	**
3	<i>D. mamillata</i>	93.08	3		29.81	13.17	4.805	**
3	<i>Dichogaster sp.</i>	13.98	1	1	32.05	11.87	-1.522	NS
3	<i>Dichogaster affinis</i>	47.83	3		24.78	11.26	2.047	??
3	<i>Gordiodrilus paski</i>	54.5	2	1	38.43	12.58	1.277	NS
3	<i>H. africanus</i>	62.22	2	1	40.84	11.93	1.792	??
3	<i>S. compositus</i>	42.04	3		24.62	11.57	1.505	NS
3	<i>S. zielae</i>	63.98	3		47.71	8.53	1.906	??
3	<i>S. palustris</i>	81.25	3		32.87	12.76	3.79	**
3	<i>A. multivesiculatus</i>	33.03	2	1	36.21	11.66	-0.273	NS
3	<i>A. opisthogynus</i>	11.11	2	1	13.39	8.18	-0.279	NS
4	<i>M. lamtoiana</i>	41.64	4	2	31.05	11.2	0.945	NS
4	<i>M. omodeoi</i>	44.5	4	2	36.62	9.18	0.858	NS
4	<i>Millsonia nilesi</i>	54.21	3		26.91	14.64	1.865	??
4	<i>D. baeri</i>	42	4	2	39.56	6.48	0.376	NS
4	<i>D. terraenigrae</i>	51.44	4	2	45.06	10.9	0.585	NS
4	<i>D. saliens</i>	62.98	3		37.96	8.64	2.896	**
4	<i>D. erhrhardti</i>	39.08	4	2	38.32	8.22	0.093	NS
4	<i>D. lamottei</i>	22.22	3		21.24	11.15	0.088	NS
4	<i>D. papillosa</i>	42.56	2	2	41.51	11.53	0.09	NS
4	<i>D. eburnea</i>	73.02	3		40.78	9.45	3.412	**
4	<i>D. mamillata</i>	93.08	3		30.95	14.45	4.298	**
4	<i>Dichogaster sp.</i>	24.55	2	2	31.39	12.23	-0.559	NS
4	<i>Dichogaster affinis</i>	35.99	3		26.61	12.94	0.726	NS
4	<i>Gordiodrilus paski</i>	42.65	2	2	36.48	12.65	0.488	NS
4	<i>H. africanus</i>	41.67	2	2	37.71	11.88	0.333	NS
4	<i>S. compositus</i>	39.29	3		25.27	13.16	1.065	NS
4	<i>S. zielae</i>	52.6	3		40.81	8.65	1.362	NS
4	<i>S. palustris</i>	66.43	3		32.4	13.29	2.561	**
4	<i>A. multivesiculatus</i>	42.09	2	2	33.24	11.97	0.74	NS
4	<i>A. opisthogynus</i>	33.33	4	2	18.15	10.12	1.501	NS

ANNEXE 4

Résultats du calcul des valeurs indicatrices des genres de vers de terre. Nous nous sommes arrêtés au niveau de partition 4

Level	Genus	IV	Group	Node	Mean	Std	t	
1	<i>Millsonia</i>	95.65	1		95.65	0	0	NS
1	<i>Dichogaster</i>	100	1		100	0	0	NS
1	<i>Hyperiodrilus</i>	65.22	1		65.22	0	0	NS
1	<i>Scolecillus</i>	26.09	1		26.09	0	0	NS
1	<i>Sthulmannia</i>	95.65	1		95.65	0	0	NS
1	<i>Agastrodrilus</i>	60.87	1		60.87	0	0	NS
2	<i>Millsonia</i>	63.77	1	1	62.39	11.49	0.12	NS
2	<i>Dichogaster</i>	73.55	2	1	59.78	5.95	2.315	**
2	<i>Hyperiodrilus</i>	75	1	1	50.9	13.24	1.821	??
2	<i>Scolecillus</i>	51.28	2	1	28.55	12.11	1.877	??
2	<i>Sthulmannia</i>	78.67	2	1	62.8	11.29	1.407	NS
2	<i>Agastrodrilus</i>	54.34	1	1	47.45	13.23	0.521	NS
3	<i>Millsonia</i>	47.95	2	1	45.45	7.58	0.33	NS
3	<i>Dichogaster</i>	57.35	3		42.53	4.72	3.139	**
3	<i>Hyperiodrilus</i>	62.22	2	1	40.84	11.93	1.792	??
3	<i>Scolecillus</i>	42.04	3		24.62	11.57	1.506	NS
3	<i>Sthulmannia</i>	64.54	3		47.59	8.45	2.005	NS
3	<i>Agastrodrilus</i>	40.41	2	1	37.87	11.58	0.22	NS
4	<i>Millsonia</i>	41.33	4	2	38.43	7.07	0.41	NS
4	<i>Dichogaster</i>	41.75	3		35.01	4.62	1.457	NS
4	<i>Hyperiodrilus</i>	41.67	2	2	37.71	11.88	0.333	NS
4	<i>Scolecillus</i>	39.29	3		25.27	13.16	1.066	NS
4	<i>Sthulmannia</i>	53.05	3		40.68	8.57	1.443	NS
4	<i>Agastrodrilus</i>	39.46	2	2	34.57	11.6	0.421	NS