

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par le
**Centre international d'études supérieures
en sciences agronomiques**
Montpellier/France

&

L'Université d'Abomey-Calavi
Abomey-Calavi/Bénin

Préparée au sein de l'école doctorale SIBAGHE
Et de l'unité de recherche UMR-Eco&Sols

Spécialité : Ecosystèmes et sciences agronomiques

Présentée par **Hervé N.S. AHOLOUKPE**

TITRE DE LA THESE : Matière organique du sol et développement du palmier à huile sous différents modes de gestion des feuilles d'élagage. Cas des palmeraies villageoises du département du Plateau au Bénin.

Soutenue le 16 décembre 2013 devant le jury composé de

M. Adam AHANCHEDE,	Prof Titulaire, Univ. Abomey-Calavi/Bénin	Président
M. Jacques RANGER,	DR, HDR, INRA-Nancy/France	Rapporteur
M Anastase AZONTONDE,	Mtre Rech au CAMES, INRAB/Bénin	Rapporteur
M. Christophe JOURDAN,	Chrg Rech, Cirad-Eco&Sols/France	Examineur
M. Romain L. GLELE,	Mtre Conf au CAMES, Univ. Abomey-Calavi/Bénin	Examineur
M. Jean-Luc CHOTTE,	DR, HDR, Eco&Sols/France	Directeur
M. Guillaume L. AMADJI,	Mtre Conf au CAMES, Univ. Abomey-Calavi/Bénin	Directeur
M. Didier BLAVET,	Chrg Rech, IRD-Eco&Sols/France, Co-directeur	Examineur

Dédicace

Les nombreux textes écrits par les agronomes et les pédologues sur le "système sol - plante", m'inspirent la pensée ci-après :

*Nous habitons sur la terre et
nous vivons du sol !*

JH

Je dédie ce travail à tous les scientifiques passionnés des sciences du sol et de l'agronomie des plantes.

Que les résultats servent de source d'inspiration pour des problématiques de recherche sur l'intensification agro-écologique des cultures en relation avec les différentes fonctions de leur support : Le sol.

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse est le fruit des appuis techniques et financiers de plusieurs institutions. Il s'agit du Ministère des Affaires Etrangères et de la Coopération Française à travers le Service de Coopération et d'Actions Culturelles (SCAC) de l'Ambassade de France près du Bénin, du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), de la Société **PalmElit** filiale du Cirad, de l'Unité Mixte de Recherche "Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et Agro-Ecosystèmes" (UMR **Eco&Sols**), de la Direction Générale de l'Institut National de Recherches Agricoles de Bénin (INRAB), du Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP) de l'INRAB et de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (FSA/UAC). **Je voudrais remercier les responsables de ces institutions pour leur soutien et leur disponibilité dans la réalisation de cette thèse.**

Je remercie particulièrement Madame Mathilde Heurtaux, Ex-Responsable Scientifique du SCAC pour sa contribution à l'obtention du financement pour ma formation en Master 2 à l'Université des Sciences de Montpellier II. Ce Master 2 a lancé le début de ma formation du troisième cycle couronnée aujourd'hui par le diplôme de Doctorat.

En trois années d'une expérience scientifique extraordinaire entre le Bénin et la France, j'ai eu le privilège de rencontrer de merveilleuses personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour contribuer à l'aboutissement de cette thèse. C'est le moment pour moi de leur dire toute ma gratitude pour tous ces bons instants de réflexions scientifiques et de convivialité.

Je voudrais tout d'abord remercier mes deux Directeurs de thèse **Dr. Jean-Luc CHOTTE** (Directeur de Recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), et Directeur de l'UMR Eco&Sols de Montpellier) et **Prof. Guillaume AMADJI** (Maître de Conférences au CAMES, Vice Doyen de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin) pour m'avoir encadré tout au long de cette thèse.

- **Dr. Jean-Luc Chotte**, en juin 2009, à la fin de mon Master 2, où vous aviez accepté de m'encadrer pour une thèse de doctorat, vous aviez marqué ma carrière de chercheur d'une empreinte indélébile. Durant ces trois années, malgré vos multiples occupations, vous avez fait preuve d'une attention particulière et d'un grand sens de responsabilité qui forcent mon admiration. Cher Jean-Luc, je me souviens des séances de travail

qu'on tenait dans votre bureau au début de cette thèse, où vous aviez plusieurs fois insisté sur les questions scientifiques de la thèse. **Vos hautes expériences scientifiques et managériales ont fortement contribué à l'aboutissement de ce travail. Recevez mes sincères remerciements.**

- **Prof. Guillaume Amadji**, j'ai envie de vous appeler «Papa», et vous savez bien pourquoi. Tel un père qui apprend à son garçon à faire les premiers pas de la marche, vous m'avez initié aux premiers pas en Science du Sol. Cher Professeur, en 1998 (deuxième année d'agronomie) où je m'étais approché de vous, j'étais déjà convaincu de ma passion pour ce vaste domaine de la science du sol. Et vous avez accepté depuis 15 ans de contribuer à ma formation. **A travers cette thèse, je vous témoigne toute ma reconnaissance et vous remercie d'avoir été toujours là pour m'orienter et me soutenir. Merci pour tout Professeur.**

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements à **Didier Blavet**, mon "daily supervisor", pour son engagement, sa disponibilité et son grand sens de responsabilité dans toutes les étapes de la thèse. Cher Didier, voici le moment que je redoutais le plus. Car vu la qualité de l'encadrement dont j'ai bénéficié de toi, je me suis toujours demandé quels mots ou quelle phrase j'allais formuler pour te témoigner ma reconnaissance. Je remplirais des pages si je devais rappeler tous ces moments que j'ai passés à tes côtés en bénéficiant beaucoup et beaucoup de tes expériences. **La main sur le cœur, je te dis simplement "Grand Merci" Didier.**

Mes remerciements vont également à l'endroit de **Bernard Dubos**, que je ne remercierai jamais assez. Cher Bernard, vous êtes le géniteur principal du sujet de la thèse. Mais au-delà, vous avez prouvé un engagement et une grande responsabilité à tous les niveaux. Sans vous, beaucoup de choses auraient pu nous échapper sur le plan technique, scientifique et financier. Votre pragmatisme a permis d'obtenir chaque fois des financements complémentaires pour le fonctionnement du projet de thèse et surtout pour la mobilité du doctorant et des encadrants. Je me souviens enfin de votre grande rigueur dans la présentation et la discussion des résultats. Vous avez été parfois très dur pour une fin heureuse de cette aventure de 3 ans. **Merci pour tout Bernard.**

Je ne saurais me passer de dire toute ma reconnaissance à **Bruno Nouy, Tristan Durand-Gasselin, Isaac Adjé et Léifi Nodichao** qui ont beaucoup oeuvré pour des appuis matériels et financiers des travaux de la thèse.

Cette thèse de Cotutelle entre les Universités de la France et du Bénin a bénéficié d'un encadrement double comme le stipulent les textes d'une thèse en cotutelle. J'adresse donc toute ma reconnaissance à tous les membres des deux comités de pilotage de la thèse. Il s'agit pour la France de : **Jean-Luc Chotte, Didier Blavet, Bernard Dubos, Christophe Jourdan, Philippe Deleporte, Albert Flori et Catherine Roumet**. Il s'agit pour le Bénin de : **Guillaume Amadji, Glèlè Kakaï Romain, Vissoh Pierre et Léfi Nodichao**. **Merci à tous pour les échanges et contribution à l'amélioration des travaux.**

Je remercie les rapporteurs pour le temps qu'ils ont passé à lire mon manuscrit dans le détail pour évaluer mon travail et pour leurs commentaires très développés et pertinents. Je remercie également tous les membres du jury pour toutes leurs remarques qui ont fait naître une série de discussions intéressantes me permettant de prendre du recul par rapport à mon sujet.

Je remercie particulièrement Albert Flori, Phillippe Deleporte, Romain Glèlè Kakaï, et Valère Salako pour toutes leurs contributions respectives en ce qui concerne les analyses statistiques lors du traitement des données.

Aussi voudrais-je remercier tout le personnel de l'UMR Eco&Sols de Montpellier, en particulier Bernard Barthes, Martial Bernoux, Eric Blanchart, Philippe Hinsinger, Jean-Michel Harmand, Michel Brossard, Michael Clairotte, Tiphaine Chevallier, Benoît Jaillard, Claude Plassard, Philippe Deleporte, Gérard Souche, Jean-Louis Aznar, Didier Arnal, Joëlle Toucet-Louri, Manon Villeneuve, Agnès Martin, Farid Meddaci, Hélène Guillemain, Michelle Tigny, Corine Allègre, etc. **Durant tous mes séjours à Montpellier j'ai eu la chance de découvrir ces personnes qui m'ont toujours soutenu et assisté dans toutes les étapes. Merci pour ces bons moments de collaboration et d'échanges.**

J'adresse mes sincères remerciements aux autres collègues en Post-doc, en thèse ou en master à Eco&Sols pour la très bonne ambiance d'échange et de collaboration. C'est le lieu de remercier les anciens que j'ai eu la chance de croiser (Elodie, Patrice, Zeesham, Clémence, Ernest, Marek...), et les nouveaux (Lionel, Habibou, Adum, Kitima, Rémi, Adeline, Charaf) qui m'ont toujours soutenu.

Je dis un grand merci à tout le personnel de l'UR34 du Cirad et de PalmElit, en particulier **Eric Gohet, Aude Verwilghen, Ivy Galouye, Véronique Lesage, Benoît Cochard, Sylvie Riou, Philippe Amblard et Yasmine Bouamra**, pour leur contribution à la réalisation des travaux.

Je voudrais manifester ma profonde gratitude à **Madame Martine Barraud**, Assistante Administrative de l'Ecole Doctorale Supagro/SIBAGHE, pour son attention particulière et son soutien pour l'aboutissement des procédures administratives de cette thèse en cotutelle.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit du couple Viviane et David Cros. Leur soutien dans des moments de stress a été d'une grande utilité au cours des derniers mois de la fin de thèse. Viviane et David, merci pour tout. Je vous porte dans mon cœur.

J'adresse toute ma gratitude aux étudiants du Laboratoire des Sciences du Sol de la FSA Richard Hodomihou, Salam Abou-Zounon, Rodrigue Daassi et Issiakou Alladé pour toute leur assistance lors des analyses au laboratoire.

Que le personnel du secrétariat administratif de l'Ecole doctorale de la FSA/Université d'Abomey-Calavi, reçoive à travers ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude.

Cette thèse a reçu le soutien effectif de tout le personnel du Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes de Pobè (CRAPP-Pobè). **Je voudrais particulièrement remercier le Directeur du Centre, Dr. Léfi Nodichao, les Chefs-Divisions et Chefs-Services (M. Omorè Alphonse, M. Alassane Coffi, M. Dassou Séraphin, M. Cakpo Félix, M. Soumonla Fataou et M. Samba Fabien) pour tout leur soutien.**

J'adresse ma reconnaissance au personnel administratif du CRAPP, en particulier le personnel du secrétariat, du service de la comptabilité et du service de gestion du personnel pour m'avoir chaque fois aidé à sortir des méandres administratifs.

Je ne saurais oublier la détermination du personnel d'appui technique de la Division Agronomie du CRAPP. Je veux remercier particulièrement Paul Houndonougbo, Gabriel Soglohoun, Victor Adjovi et feu Taïwo Ogoundélé pour tout le sacrifice consenti lors de la phase de collecte des données. **Vous avez été d'un appui considérable et avez permis de tenir dans le calendrier de collecte des données. Je vous en remercie sincèrement.**

Je remercie également le personnel de la sous-section "Atelier" du CRAPP, en particulier les chauffeurs et le responsable de la sous-section pour leur disponibilité.

J'ai une pensée particulière aux autres collègues et amis du CRAPP pour leurs divers soutiens. Il s'agit de : Essègbèmon Akpo, Hubert Domonhèdo, Emile Agbangba, Olivier Dassou, Ronaldine Ahouanmangnangaou, Toussaint Mikpon, Sodji Barnabé, Yves Cakpo, Michel Cazemajor.

A mon doyen, ami et grand-frère Dr. Amoussa Hounkpatin Waliou B., j'adresse mes remerciements sincères et fraternels pour tout son soutien depuis mes études de Master 2 jusqu'à la fin de cette thèse.

Je dis un grand merci à Samba Fabien, Adrien Montcho, Kossou Gilles et Augustin Aoudji qui ont toujours répondu présents à mes nombreuses sollicitations, surtout lors de mes séjours à Montpellier.

J'ai une pensée spéciale pour toute ma famille, et pour mes beaux parents. Leurs prières et leurs encouragements incessants ont été d'un grand soutien pour moi. Je rends un hommage particulier à :

- mon père et ma mère dont les coups de fils pour s'enquérir de mes nouvelles et prier pour l'avancement des travaux de laboratoire à Montpellier et de terrain à Pobè, m'ont toujours réconforté.
- mon oncle et tuteur **BEDIE Ferdinand** et son épouse, dont le souhait a toujours été de me voir un jour titulaire du diplôme de Docteur en Agronomie. Merci pour votre soutien.
- ma belle-mère, Elisabeth Sossoukpè, dont l'assistance aux côtés de mon épouse et de mes enfants a été déterminante dans l'aboutissement de ce travail.

Que ma famille trouve dans l'aboutissement de ce travail une très grande satisfaction pour tous les nombreux sacrifices qu'elle a consentis durant ces longues années.

Que toutes les personnes que je n'ai pas pu citer dans cette rubrique de remerciement trouvent à travers ces lignes l'expression de toute ma reconnaissance pour leurs soutiens quotidiens et continus qui m'ont permis de conduire à terme cette thèse.

Rolande, tu devais certainement te demander quand aurais-tu ton nom dans ce manuscrit. Et bien voilà ; j'ai gardé le meilleur pour la fin ! Cette thèse ne pouvait aboutir sans ton soutien, ta patience et tant de sacrifices que tu as consentis à supporter seule les caprices de nos enfants. Tu as été omniprésente, toujours à l'écoute, m'épaulant, me donnant du courage, me rassurant alors que je doutais parfois de mes compétences. Tu as souvent été triste et tu as parfois coulé les larmes en me voyant partir pour des mois à Montpellier. Mais tu as toujours gardé espoir que la fin sera pour bientôt. Eh oui, très chère aimée Rolande, me voilà à la fin de cette thèse ! Elle tourne la page de ma vie étudiante et nous promet dans un futur très proche, de meilleurs moments avec nos enfants. Merci pour ton soutien et tous ces moments de sacrifices.

Enfin, j'ai une pensée forte et pleine d'émotion pour mes enfants Oriane, Gloris et Nathanael. Leur patience et leur grande affection ont été pour moi une source de motivation. **Que ce travail soit pour vous un exemple à dépasser.**

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	ii
Sommaire.....	viii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures.....	xi
Liste des annexes.....	xv
Résumé	xvi
Abstract.....	xix
Introduction générale.....	1
Première partie : Etat de l'art et orientation de la recherche	8
Deuxième partie : Diagnostic agro-pédologique des palmeraies villageoises : Approche régionale exploratoire	45
Troisième partie : Effet du mode de gestion des feuilles d'élagage sur les compartiments aériens et souterrains des palmeraies : Approche inter et intra parcellaire	98
Quatrième partie : Discussion et Conclusion générales.....	217
Références bibliographiques	232
Biographie de l'auteur.....	258
Table des matières	260
Annexes	263

Liste des tableaux

Tableau de synthèse de l'évolution des paramètres physico-bio-chimiques du sol et de la plante en fonction d'une restitution totale ou non des feuilles en palmeraies adultes	xxii
Tableau 3.1. Types de sols, leur superficie (S) et pourcentage (%S) dans le département du Plateau	54
Tableau 3.2. Principales phases de développement des palmeraies et leurs caractéristiques selon la perception paysanne.....	57
Tableau 3.3. Types de palmeraies selon le passé culturel	57
Tableau 3.4. Doses de fumures recommandées par le CRAPP de Pobè sur le palmier à huile et celles appliquées par les paysans	59
Tableau 3.5. Modes de restitution des feuilles d'élagage des palmiers	60
Tableau 3.6. Caractéristiques des palmeraies sur terre de barre	62
Tableau 3.7 : Quelques caractéristiques des groupes palmeraies sur terre de barre	63
Tableau 4.1 : Nombre de parcelles par classe d'âge	77
Tableau 4.2. Stocks de carbone ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) pour $200 \text{ kg sol} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\sim 0\text{-}20 \text{ cm}$) de masse de terre équivalente dans la chronoséquence de palmeraies par position en fonction du mode de gestion des feuilles.	89
Tableau 4.3. Valeurs estimées des paramètres de variance des stocks de carbone.....	89
Tableau 5.2.1. Paramètres physico-chimiques du sol sous andain et dans l'interligne des palmeraies adultes en mode de restitution totale des feuilles.....	111
Tableau 5.2.2. Porosité moyenne du sol (%) par profondeur selon la position.	114
Tableau 5.3.1 : Biomasse microbienne ($\text{mgC} \cdot \text{g}^{-1} \text{ sol} \pm \text{erreur standard}$) par mode de gestion des feuilles et par position (andain, interligne) à chaque profondeur du sol.....	127
Tableau 5.3.2 : distribution massique des fractions dans le sol, teneurs en carbone et en azote dans les fractions et dans le sol.	131

Tableau de synthèse des observations de sol faites en palmeraies adultes (13-20 ans).....	139
Table 6.2.1. Characteristics of studied oil palm trees and some collected data	148
Tableau 6.2.2. Results of analysis of variance of mature leaf biomass.....	151
Tableau 6.3.1 : Caractéristiques des palmiers étudiés.....	162
Tableau 6.3.2 : Analyse de l'effet de variables sur l'estimation de la densité par méthode de carottage	166
Tableau 6.3.3 : Analyse de l'effet de variables sur l'estimation de la masse linéique du tronc du palmier à huile.....	168
Tableau 6.4.1. Emission annuelle de feuilles et fleurs femelles par palmier et masse sèche moyenne d'une feuille adulte et d'un régime du palmier.....	182
Tableau 6.4.2. Résultats d'analyse de variance de l'effet des origines génétiques des palmiers sur les biomasses étudiées : Test des effets par tranche	183
Tableau 6.4.3. Concentration en éléments minéraux dans différents organes des palmiers pré-adultes et adultes	185
Tableau 6.4.4. Production annuelle de minéralo-masses ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) des palmeraies	187
Tableau 7.1 : Origine génétique des palmiers choisis de façon aléatoire par site et par mode de gestion des feuilles d'élitage.	198
Tableau 7.2. Densité, longueur et surface totales racinaires dans la zone Z3s du Voronoï simplifié selon le mode de gestion des feuilles d'élitage et la position d'observation sur une profondeur de 0-100 cm de sol.....	200
Tableau 7.3. SRL des types de racine par horizon selon la position de la zone Z3s.....	205
Tableau de synthèse des observations de biomasses et minéralo-masses en palmeraies adultes (13-20 ans).....	214

Liste des figures

Figure 1.1. Relations entre MOS et indicateurs de fertilité du sol.	13
Figure 1.2. Les étapes de décomposition des MOS et les acteurs (faune et flore du sol).	14
Figure 1.3 : Origine et dispersion de <i>Elaeis guineensis</i> en Afrique	19
Figure 1.4. Différentes parties de la feuille du palmier à huile.	19
Photo 1.1. Palmier à huile adulte sur pied (10 - 12 ans d'âge)	19
Photo 1.2. Système racinaire d'un palmier de 20 ans observé au champ	29
Photo 1.3. Architecture du système racinaire du palmier à huile. VD et VU équivalent respectivement à VB et VH.....	29
Figure 1.5. Diagramme de Voronoï autour de l'arbre (c) décomposé en 12 triangles rectangles égaux en surface.	32
Figure 1.6. Triangle de Voronoï orienté sur la ligne de plantation entre les arbres (a) et (c). .	33
Figure 2.1. Zone d'étude.....	37
Figure 2.2. Hauteur mensuelle des pluies et évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle enregistrées dans le département du Plateau entre 2000 et 2010.	37
Figure 2.3. Schéma des grandes étapes de la recherche.....	40
Figure 3.1. Localisation géographique de la zone d'étude.	49
Figure 3.2. Les grandes étapes de la collecte des données.....	52
Figure 3.3 : Les différents types de sol dans le département (a), leurs proportions (b), et la proportion des terres de barre parmi les sols ferrallitiques (c).	55
Photo 3.1 : Dispositif de restitution en andain des feuilles dans une palmeraie en station (Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes) au Bénin.	59
Figure 3.4 : Proportion relative des types de producteurs de palmier à huile sélectionné installé sur terres de barre.....	61

Figure 3.5 : Projection des caractéristiques des parcelles des 90 producteurs dans le TSPP sur les axes F1 et F2 de l'analyse factorielle en composantes multiples.....	64
Figure 3.6 : Proportion des types de palmeraies par classe d'âge selon le mode de gestion des feuilles.	66
Figure 4.1 : Zone d'étude et répartition spatiale des palmeraies.	77
Figure 4.2. Stations de prélèvement du sol dans une palmeraie.	80
Photo 4.1. Transect pédologique transversal sur andain et interligne dans une palmeraie adulte.	80
Figure 4.3. Biomasse de feuilles au sol par classe d'âge de palmeraie.	85
Figure 4.4. Taux de couverture du sol par les feuilles.	85
Figure 4.5. Transect pédologique de l'andain vers l'interligne d'une palmeraie adulte RT.....	85
Figure 4.6a. Profil de densité apparente du sol dans les palmeraies de 7 - 12 ans.....	87
Figure 4.6b. Profil de densité apparente du sol dans les palmeraies de 13 - 20 ans.	88
Figure 5.2.1 : La zone d'étude.	103
Figure 5.2.2. Espace de Voronoï autour du palmier étudié (a) et triangle de Voronoï (b)	108
Figure 5.2.3. Stocks de carbone et d'azote pour 650 kg.m ⁻² de MTE (~0-50 cm) dans les positions andain et interligne des palmeraies RT et RN de 7-11 ans et 16-19 ans.	109
Figure 5.2.4. Relation entre teneur en carbone et particules minérales fines; et entre la capacité d'échange cationique et les particules minérales fines.	113
Figure 5.2.5. Evolution de la densité apparente du sol sous andain et dans l'interligne jusqu'à 50 cm de profondeur du sol à 7-11 ans et 16-19 ans.....	114
Figure 5.3.1. Photo d'une palmeraie en mode de restitution totale des feuilles en andain.....	125
Figure 5.3.2. Dispositif de Voronoï de prélèvement du sol. (Jourdan et Rey, 1997 ; Nodichao 2008).....	125

Figure 5.3.3 : Cinétique de respiration du sol pendant 28 jours à 28°C, mesurée à intervalle régulier.	128
Figure 5.3.4. Corrélation de Pearson entre la biomasse microbienne et la respiration cumulée du sol	129
Figure 5.3.5 : Teneur en carbone et en azote totaux dans le sol par position et par profondeur.	132
Figure 5.3.6. Images des fractions organiques et minérales du sol.	133
Figure 6.2.1. Spiral arrangement of fronds in palm tree crown and components of an oil palm frond.	147
Figure 6.2.2. Difference in frond biomass as a function of frond rank.	151
Figure 6.2.3. Estimated versus observed rachis biomass. The 1:1 line is shown.	152
Figure 6.2.4. (a). Linear regression between measured frond dry weight and measured rachis dry weight. (b). Linear regression between measured frond dry weight and the petiole cross section.	153
Figure 6.2.5. (a) Box plots of Eq. (2) residuals as a function of genotypes. DLM and DY indicate Deli x La Mé and Deli x Yangambi genetic origins respectively. Dp indicates pure Deli genetic origin. (b). Box plots of Eq. (2) residuals as a function of age.	154
Figure 6.2.6. Mean dry weight of all mature fronds versus mean dry weight of three	154
Figure 6.3. 1. Schéma du tronc du palmier, tiré de Ng et al. (2003b)	161
Figure 6.3.2. Mesures sur le palmier pour l'estimation de la biomasse du tronc.	164
Figure 6.3.3. Evolution de la densité du tronc (A), de la section (B) en fonction de la hauteur du palmier.	165
Figure 6.3.4 : Régression linéaire entre densité sèche des rondelles du tronc par la méthode de référence (Densité ref) et par la méthode de carottage.	166
Figure 6.3.5. Evolution de la masse linéique du tronc (MLT) en fonction de la hauteur	167

Figure 6.3.6. Régression linéaire entre masse linéique estimée du tronc et masse linéique mesurée.....	168
Figure 6.3.7 : Régression linéaire entre biomasse estimée du tronc et biomasse mesurée	169
Figure 6.4.1. Triangle de répartition des Compositions alléliques calculées par Structure des individus de chaque groupe.....	180
Figure 6.4.2. Evolution des composantes de production de régime en fonction de l'âge des palmeraies villageoises étudiées (points "Observé") et de palmeraies de la station de Pobè (points "Station").....	182
Figure 6.4.3. Biomasse totale produite annuellement ($T \cdot ha^{-1}$) de feuilles et de régimes (poids frais) dans les palmeraies en fonction de la classe d'âge et du mode de gestion des feuilles.	182
Figure 6.4.4. Biomasse moyenne du tronc d'un palmier ($kg \cdot palmier^{-1}$) sur oied dans palmeraies étudiées.	183
Figure 6.4.5. Comparaison des teneurs en N, P et K observées dans les palmeraies étudiées à des valeurs de la station de Pobè et de modèles	186
Figure 7.1. Dispositif de Voronoï d'observation racinaire	199
Figure 7.2. Corrélations de Pearson entre les paramètres de développement racinaire.	201
Figure 7.3. Moyenne des densités racinaires en fonction des génotypes.	202
Figure 7.4. Densité et longueur racinaire de chaque type de racine par horizon selon la position (andain et interligne) de la zone Z3s en mode RT et RN.	203
Figure 7.5. Longueur racinaire de chaque type de racine par horizon selon la position (andain et interligne) de la zone Z3s en mode RT et RN.	204
Figure 7.6. Corrélation de Pearson entre SRL et stock de carbone des différents types de racines.....	206

Liste des annexes

Annexe 1. Résumés des articles publiés et des pré-articles	263
Annexe 2. Indicateurs des modèles de prédiction des paramètres du sol	272
Annexe 3. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone : Chapitre 4	273
Annexe 4-1. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone et d'azote. Chapitre 5.2.	276
Annexe 4-2. Résultats d'analyse de variance des poids des fractions organiques (Pfrac), des teneurs en carbone (Csol) et en azote du sol (Nsol), de la biomasse microbienne et de la respiration du sol. Chapitre 5.3	278
Annexe 5. Résultats d'analyse de variance des paramètres de production de biomasse et de minéralo-masse aérienne. Chapitre 6.4.	280
Annexe 6. Résultats d'analyse de variance des variables de développement racinaire sur l'horizon 0-100 cm. Chapitre 7	293

Résumé

La culture du palmier à huile en milieu villageois prend de plus en plus d'ampleur dans les zones tropicales où elle contribue pour une part importante à l'économie des pays. Au Bénin, les palmeraies villageoises sont en forte expansion dans un climat particulier caractérisé par des déficits hydriques annuels élevés. Les caractéristiques assez particulières de ces palmeraies villageoises, comme l'association des cultures vivrières dans les jeunes palmeraies, l'absence de fertilisation minérale durant tout le cycle de culture et l'exportation de tout ou partie de la biomasse recyclable, nous interrogent sur la durabilité du système de production. L'étude a été conduite dans le département du Plateau au sud-est du Bénin (2°30' - 2°45' E et 6°35' - 7°45' N). Une première étape de diagnostic de typologie des palmeraies a permis de constater que les palmeraies villageoises appartiennent majoritairement à des petits producteurs dont les faibles moyens financiers ne permettent pas de planter de grandes superficies, ni d'appliquer une fertilisation minérale aux palmiers. Les antécédents culturels sont pour la plupart des champs de cultures vivrières. Au jeune âge, les palmeraies sont associées à des cultures vivrières très variées. Les pratiques de restitution des sous produits de transformation, limitées à quelques grands producteurs et les modes de gestion des feuilles d'élague, distinguent les palmeraies villageoises. La gestion des feuilles d'élague commence à 7 ans d'âge des palmeraies et va d'une restitution quasi-totale en andain à une restitution nulle de ces feuilles au sol.

Dans ce contexte, le mode de gestion des feuilles d'élague dans les palmeraies villageoises peut induire des effets différents sur le système sol-plante, et son impact agronomique et environnemental mérite d'être exploré. A cet effet, la typologie des palmeraies a orienté le choix d'une chronoséquence de palmeraies représentant les deux modes contrastés de gestion des feuilles d'élague : la restitution totale en andain (RT) et la restitution nulle (RN). Cette chronoséquence a servi aux études comparatives de l'effet de ces modes sur les compartiments sol et plante du système de production.

Dans le compartiment sol, les stocks de matière organique, les paramètres physico-chimiques, l'activité microbienne et le statut de la matière organique ont été étudiés. Les études au niveau de la plante ont concerné dans un premier temps les paramètres de développement (densité, longueur et surface) des racines primaires, secondaires et fines. Et dans un second temps, les biomasses et minéralo-masses aériennes de la plante. Les études de biomasse aérienne ont nécessité la mise au point de méthodes non destructrices basées sur des équations allométriques d'estimations des biomasses de la feuille et du tronc.

Sur le plan agronomique, un effet significatif du recyclage des feuilles a été observé sur les paramètres de fertilité du sol après 10 ans de restitution des feuilles. Les stocks de matière organique et d'azote sur 0-50 cm ont augmenté respectivement de 70% et 50% sous les andains par rapport aux interlignes sans feuilles. De façon étonnante, la restitution nulle des feuilles n'a pas induit une baisse du stock de matière organique au cours du temps. L'augmentation des stocks de carbone et d'azote après 10 ans de restitution des feuilles n'a amélioré les paramètres du sol que sur les 20 premiers centimètres. Le sol s'est enrichi en matière organique (20gC.kg^{-1}) et en azote ($1,5\text{gN.kg}^{-1}$). La somme des cations échangeables et la CEC ont atteint des valeurs moyennes (7meq.100g^{-1}) deux fois plus élevées que dans les situations de restitution nulle des feuilles. Il en est de même pour les teneurs en calcium ($4,86\text{meq.100g}^{-1}$) et en magnésium (2meq.100g^{-1}). Par contre, les teneurs en potassium ont des valeurs qui sont restées très faibles ($\leq 0,17\text{meq.100g}^{-1}$). Le pH a augmenté de 0,5 unité et le sol est passé de l'état acide ($\text{pH} = 5,5$) à faiblement acide ($\text{pH} = 6$). Le recyclage des feuilles a induit une intensification de l'activité microbienne qui a modifié la qualité de la matière organique du sol. Les teneurs en carbone des fractions fines organiques ($< 20\mu\text{m}$) ont augmenté de 40% à 0-5 cm et de 15% à 20-30 cm, par rapport à la restitution nulle des feuilles.

Ces effets positifs du recyclage ont évidemment profité au développement racinaire des palmiers. Les densités et longueurs racinaires ont été modifiées dans les 20 premiers centimètres du sol. Les racines fines ont été les plus sensibles au recyclage des feuilles. Leur densité a triplé par rapport au mode de restitution nulle, et leur longueur spécifique a baissé, confirmant l'enrichissement du milieu sous andain. Le recyclage des feuilles a créé une couche de litière au-dessus du sol sous andain, où s'est développé un amas important de racines fines et secondaires de densité de 2 kg.m^{-3} et $0,13\text{ kg.m}^{-3}$.

Malgré ces effets sur le sol et le système racinaire, la gestion des feuilles n'a pas eu d'effet significatif sur les biomasses foliaires ni sur l'état nutritionnel des palmiers. Seule la biomasse du tronc a augmenté significativement sous le mode de restitution totale des feuilles.

Les palmeraies ont montré de faibles performances de production et sont déficientes en éléments minéraux. Les productions de régimes (6 t.ha^{-1} dans les palmeraies adultes), et les teneurs des principaux éléments minéraux N ($< 2\%$), et K ($< 0,5\%$) sont en-deçà de l'optimal reconnu pour une palmeraie.

Sur le plan environnemental, et en fonction des modes de gestion des feuilles d'élague, le sol des palmeraies a été évalué en tant que "puits potentiel de carbone" : stockage de carbone dans le sol sur 0-50 cm sous les andains de feuilles et biomasse totale des andains au sol. Les

études ont également montré le rôle de stockage de carbone assuré par le palmier sur pied à travers la biomasse des feuilles, du tronc et des racines. Cette biomasse totale sur pied du palmier est estimée à 88 tonnes de matière sèche à l'hectare. Ces performances sont supérieures à celles d'autres agro-systèmes d'utilisation des terres et de changement d'affectation des terres forestières. Mais elles sont inférieures aux performances des systèmes forestiers.

Au vu des caractéristiques agronomiques des palmeraies villageoises, des perspectives d'amélioration de leurs performances sur le long terme s'imposent à la recherche agricole. Faute d'apports significatifs en N et K, l'état de déficience aggravé pour ces éléments ne peut que perdurer. Ainsi, les perspectives pour corriger cet état doivent associer plusieurs pratiques agricoles dont une fertilisation minimale azotée et potassique, la mise en place d'un système agro-forestier de palmier à huile et de légumineuses arbustives, et le recyclage des feuilles et éventuellement des rafles lorsque cela est possible.

Mot Clés : Matière organique du sol, performances palmeraies villageoises, durabilité, Bénin.

Topic: Soil organic matter and oil palm development under management of pruned fronds: case of smallholders' plantations in the department of Plateau in Benin, western Africa.

Abstract

Smallholder oil palm plantations are taking increasingly importance in tropical areas where the crop contributes significantly to the economy of the countries. In Benin, smallholder oil palm plantations are in expansion in a particular context characterized by high annual water deficits. Smallholder plantations are characterized in particular by the association of food crops with the young palms, the absence of mineral fertilization throughout the growing cycle and the removal of all or part of recyclable biomass. These specific characteristics raise some questions about the sustainability of the production system. The study was conducted in the region of Plateau located in southeast of Benin ($2^{\circ}30' - 2^{\circ} 45' E$ and $6^{\circ}35' - 7^{\circ}45' N$). A first step diagnosis of the plantations' typology showed that small farmers own the major part of plantations. These small farmers have limited financial resources that neither allow them planting large areas nor applying mineral fertilizers. Food crops represent predominantly the previous cropping history of the plantations. The young palm trees are always associated with various food crops. Practices of mill residues recycling, limited to a few large producers, and the management of pruned fronds distinguish the smallholder plantations. Management of pruned fronds starts at 7 years old of the palm plantation. There are various ways of management of pruned fronds, from total recycling (RT) to no recycling at all (RN).

In this context, the management of pruned oil palm fronds in smallholder plantations may induce different effects on the soil-plant system, and its agronomic and environmental impact deserves to be investigated. For this purpose, the typology of plantations allows to choose a chronosequence of palm plantations representing two contrasting ways of managing pruned fronds: RT of fronds piles and RN practices. This chronosequence was used to compare the effect of management of pruned fronds on soil and plant compartments.

In the soil compartment, organic matter stocks, chemical parameters, microbial activity and status of organic matter were studied. The studies at the plant level concerned, firstly, the development parameters (density, length and surface area) of primary, secondary and thin roots; and secondly, the above ground biomass and mineral-mass of the plant. The studies of the aboveground biomass required to develop non-destructive methods based on allometric equations to estimate biomass of frond and trunk.

From an agronomic point of view, the RT practice after 10 years of fronds recycling induced a significant effect on soil fertility parameters. Organic matter and nitrogen stocks at 0-50 cm depth increased by 70% and 50%, respectively, under frond piles compared to inter-rows without fronds. Surprisingly, the RN practice did not induce a decrease of organic matter stock over time. The increase of carbon and nitrogen stocks after 10 years of fronds recycling, improved soil parameters on the first 20 cm depth. The soil was enriched in organic matter (20gC.kg^{-1}) and nitrogen (1.5gN.kg^{-1}). The sum of exchangeable cations and cationic exchange capacity reached average values (7meq.100g^{-1}) two times higher than the cases of no recycling of fronds. Calcium (4.86meq.100g^{-1}) and magnesium (2meq.100g^{-1}) contents took the same trends. In opposite, potassium contents ($\leq 0.17\text{meq.100g}^{-1}$) remained very low. The pH increased to 0.5 units and the soil shifted from acid ($\text{pH}=5.5$) to slightly acid ($\text{pH}=6$) status. Total recycling of fronds induced an increased soil microbial activity which changed the quality of soil organic matter. So, the carbon content of fine organic fractions ($< 20\mu\text{m}$) increased to 40% at 0-5 cm and to 15% at 20-30 cm, compared to the no recycling of pruned fronds.

These positive effects of the RT practice have obviously benefited to palm root development. Root density and root length were modified in the first 20 cm depth of soil. Thin roots were more sensitive to the RT practice. Their density tripled compared to the RN practice, and their specific length decreased, confirming the enrichment of the soil under fronds piles. The RT practice created a litter-layer under the fronds piles, which induced a substantial density of thin and secondary roots of 2kg.m^{-3} and 0.13kg.m^{-3} , respectively.

Despite these effects on the soil and on the palm root system, the management of oil palm pruned fronds had no significant effect on the above ground biomass and nutritional status of palms. Only the trunk biomass increased significantly with RT practice.

The palms showed low production performance and are deficient in nutrients. Bunches production (6 t.ha^{-1} in mature palms), and the rates of the major nutrients like N ($< 2\%$), and K ($< 0.5\%$) are lower than the optimum one for a palm plantation.

In environmental terms, and depending on the ways of pruned frond management, smallholder plantations were evaluated as a potential carbon sink through carbon storage in the soil under fronds piles, and carbon storage by fronds piles biomass. The study also showed the carbon sink role of the smallholder plantations through carbon storage provided by above and below ground biomass (trunk, fronds and roots). This biomass is estimated to 88 tons of dry matter per hectare. These performances of the smallholder oil palm plantations are

superior to those of other agro-systems of land use and change in the use forest lands. However, they are less performing than forest systems.

From the agronomic characteristics of smallholder oil palm plantations, many perspectives for a sustainable improvement of their performances are pointed out for agricultural research. Due to the non application of nitrogen and potassium, these nutrients deficiency will become higher in the long term. The perspectives to correct this status of the smallholder oil palm plantations for sustainable production will include i) the application of a minimum nitrogen and potassium fertilizer, ii) the adoption of an agro-forestry system including oil palm and legume species and iii) the recycling of pruned fronds and empty fruit bunches.

Key words: Soil organic matter, smallholder plantations performances, sustainability, Benin.

Tableau de synthèse de l'évolution des paramètres physico-bio-chimiques du sol et de la plante en fonction d'une restitution totale ou non des feuilles en palmeraies adultes (13-20 ans). Les % entre parenthèse sont calculés par (RT-RN)/RN*100. En gras, les différences sont statistiquement significatives à 95%. RT= restitution totale et RN = restitution nulle, FO = fraction organiques ; F = fraction organo-minérales.

Profondeur (cm)	Paramètres (effet restitution totale des feuilles %)	Interprétation statistique
Paramètres physico-chimiques		
(MTE) 0-50	Stock C (+57%), Stock N (+33%)	Amélioration significative des paramètres physico-chimiques du sol due au recyclage des feuilles
0-20	C (+122%) N (+86%) pH (+9%) Ca (+104%) Mg (+186%) K (+150%)	
20-30	C (+35%) N (0%) pH (+2%) Ca (+11%) Mg (0%) K (+50%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres physico-chimiques du sol
30-50	C (+6%) N (0%) pH (0%) Ca (-9%) Mg (-11%) K (0%)	Pas d'effet significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres physico-chimiques du sol
Caractéristiques de la matière organique du sol et paramètres microbiologiques		
0-5	Quantité FO et F (+46%), Csol FO grossière (+100%), Csol FO fines (+46%)	Amélioration significative des caractéristiques de la matière organique du sol due au recyclage des feuilles
0-20	Respiration (+158%) et Biomasse (+129%) microbienne	Amélioration significative des paramètres microbiologiques du sol due au recyclage des feuilles
20-30	Respiration (-38%) et Biomasse (+41%) microbienne	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres microbiologiques du sol
	Quantité FO et F (-9%), Csol FO grossière (-29%) Csol FO fines (+34%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles sur les caractéristiques de la MOS
Biomasses et minéralo-masses aériennes		
Production annuelle Biomasse	Régimes (-2%) Feuilles (+15%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
Biomasse sur pied	Tronc (+47%)	Effet cumulatif du recyclage des feuilles

Minéralomasse N	Régimes-Rafles (+32%)			Effet significatif du recyclage des feuilles
	Feuilles (+3%)	Tronc (+50%)		Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
P	Régimes-Rafles (+10%)	Feuilles (-14%)	Tronc (0%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
K	Régimes-Rafles (-13%)	Feuilles (+5%)	Tronc (+16%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
Ca	Régimes-Rafles (+26%)	Feuilles (-9%)	Tronc (-11%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
Mg	Régimes-Rafles (+8%)	Feuilles (-23%)	Tronc (9%)	Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
Densité racinaire (dans la zone Z3s qui correspond à l'andain)				
0-100	R1 : Racines grosses (-11%)			Pas d'effet du recyclage des feuilles
	R2 : Racines moyennes (+11%)			Pas d'effet statistique significatif du recyclage des feuilles
	R3+R4 : Racines fines (+127%)			Augmentation significative de la densité de biomasse des racines fines due au recyclage des feuilles

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

1. Problématique

Les enjeux mondiaux de la sécurité alimentaire de plus de 7 milliards d'habitants de la planète définissent le grand défi d'une agriculture écologiquement durable axée sur la sauvegarde du sol et de l'environnement. L'accent est souvent mis sur les pratiques culturelles de conservation du patrimoine sol, par la restitution et le maintien de la matière organique du sol (MOS), la sauvegarde de la biodiversité faunique et floristique du sol et de la biosphère, le contrôle de la pollution des nappes, les pratiques de séquestration des gaz à effet de serre et de mitigation de leurs effets.

Selon plusieurs auteurs, parmi lesquels Nandwa (2011), Genot et al. (2009), la MOS et la fertilité des sols constituent des composantes importantes de la production des systèmes agricoles et forestiers. Malgré leur diversité, les discours sur la restitution et la conservation de la MOS, convergent tous vers le même objectif de sauvegarde des sols pour la fourniture des biens et services écosystémiques (Stengel, 2008) évoqués par le Millenium Ecosystem Assessment (2005).

En raison des effets bénéfiques de la MOS, une teneur élevée en carbone organique est généralement recherchée pour les sols cultivés. En effet, de par sa dégradation et sa minéralisation, la MOS améliore la qualité physico-chimique des sols et fournit les éléments nutritifs nécessaires au développement des cultures (Gobat et al., 1998 ; Arrouays, 2002).

De même, selon le GIEC (2002), l'utilisation des terres cultivées et les pratiques agricoles qui visent à augmenter de manière durable le stock de matière organique des sols jouent un rôle important dans la lutte contre le réchauffement planétaire. Cependant, la mise en culture des sols et les pratiques liées à l'agriculture intensive sont à l'origine de nombreuses pertes de MOS (Frisque, 2007). En effet, le développement de l'agriculture, au cours des 100 dernières années, a engendré des pertes substantielles de MOS et les stocks mondiaux de carbone organique des sols cultivés seraient passés de 209-222 GtC à 168 GtC actuellement, soit une diminution de 41 à 54 GtC (Paustian et al., 1997) cités par Rees (2001). Ces pertes, inégalement distribuées autour du globe, peuvent être imputables, d'une part à la conversion des prairies et/ou des terres sous couvert forestier en terres agricoles et, d'autre part aux pratiques agricoles intensives. Ces deux phénomènes sont eux-mêmes le résultat d'une demande croissante en produits agricoles, corollaire de la croissance démographique mondiale estimée à plus de 9 milliards d'habitants d'ici 2050 (FAO, 2013).

Dans ce contexte, la culture du palmier à huile, qui couvre de vastes superficies (12 millions d'hectares en 2010 selon Oil World Annual, 2010), est sujette à de nombreuses controverses. En effet, on peut considérer que cette culture a un impact négatif sur l'environnement lorsqu'elle remplace des forêts. Dans ce cas, les actions d'abattage et brûlis des forêts pour l'installation de cette culture monospécifique à caractère industriel constitueraient une «source de carbone» pour l'atmosphère et une perte de diversité écologique. Cependant, plusieurs auteurs considèrent que des plantations de palmier à huile peuvent être des «puits de carbone» car elles séquestrent du carbone atmosphérique dans leurs biomasses (Jaffré, 1983 ; Henson et al., 1999 ; Lamade and Bouillet, 2005 ; Germer and Sauerborn, 2008). Mieux, le recyclage de la biomasse aérienne par les feuilles d'élagage lors de la culture et par les feuilles et le tronc lors de la replantation de la palmeraie, contribuerait à enrichir le stock de carbone du sol (Khalid et al., 2000 ; Hartmann, 1991 ; Djègui, 1992 ; Frazaö, 2012). De ce fait, le stock et le statut de la matière organique des sols sous palmeraies pourraient être des indicateurs importants de la durabilité de ce système de culture.

Au Bénin, les palmeraies sont l'objet d'un recyclage particulier de leur matière organique car elles sont soumises à un système d'exploitation de type villageois comparable à celui d'une culture vivrière. En effet, elles sont pour la plupart en association avec des cultures vivrières au cours des quatre premières années de plantation et les régimes de fruit du palmier sont utilisés par les paysans pour leur propre subsistance. Ceci est dû à un climat très sec, peu favorable à une exploitation industrielle (Nouy et al., 1999). Malgré cela, l'importance de la culture du palmier à huile dans l'économie rurale béninoise est reconnue dans plusieurs études (Djegui et Daniel, 1996 ; Fournier et al., 2001a, 2001b). Le remplacement progressif, en milieu paysan, des palmeraies sub-spontanées (palmeraies naturelles) à productivité très faible par des plantations de palmier à huile sélectionné plus productives (Cochard et al., 2001 ; Fournier et al., 2002) en est la preuve. Depuis au moins deux décennies, les plantations villageoises de palmiers sélectionnés, communément appelées "palmeraies villageoises" ont connu une forte extension au Bénin et les superficies ont crû de 383 ha en 1992 à plus de 15 000 ha en 2008 (Adjadi et al., 2008).

Les paysans béninois appliquent des pratiques peu répandues dans les zones éléicoles du monde entier (Corley et Tinker, 2003) car les palmeraies villageoises béninoises ne sont pratiquement pas fertilisées, la transformation des régimes est semi artisanale et la vente de l'huile se fait sur le marché local. De plus, les feuilles d'élagage sont utilisées comme combustible pour satisfaire les besoins en chauffage de l'extraction d'huile et les autres besoins de la vie domestique. L'exportation des feuilles du palmier à huile commence

généralement à 7 ans d'âge (début de l'entretien des plantes) et se poursuit jusqu'à la fin du cycle de culture (25 - 30 ans).

Selon Nandwa (2001), l'épuisement en matière organique des sols tropicaux a été reconnu depuis longtemps comme un important processus de dégradation des sols dans ces environnements où la culture est pratiquée sans restitution de la matière organique. Dans ces conditions, on s'interroge sur la durabilité du système villageois de culture du palmier à huile qui favorise l'exportation des éléments nutritifs et peut induire d'importants changements de la MO du sol, au détriment de la croissance et de la productivité des palmiers.

En étudiant l'influence des pratiques culturales sur la répartition de la matière organique du sol sous palmeraie, Djègui (1995) constata que dans les deux horizons supérieurs (0 - 15 et 15 - 35 cm) les teneurs en matière organique étaient beaucoup plus élevées sous les andains de feuilles que dans les ronds et les interlignes dépourvus de feuilles. A partir d'une méta-analyse, Guo et al. (2002) ont montré que le stock du carbone du sol augmente lorsque le système agricole passe d'une culture vivrière au pâturage (+19%), d'une culture vivrière à une plantation (+18%) ou d'une culture vivrière à une forêt secondaire (+53%) ; et que ce stock baisse en situations inverses. Rouspard et al. (2002) affirment que les plantations pérennes ont un rôle dans la séquestration du carbone, qui se fait principalement par le sol.

Peu d'études dans les palmeraies utilisent des chronoséquences (successions de classes d'âge) qui permettent d'une part de valider les mesures de flux de carbone par les variations de stocks et d'autre part de prendre en compte les effets de l'âge sur la productivité des écosystèmes.

Très peu de travaux ont étudié l'effet des pratiques culturales des palmeraies, sur la matière organique du sol et sur le développement et la productivité de la plante. Il n'existe pratiquement pas de travaux conduits dans des chronoséquences de palmeraies villageoises qui soient orientés sur "l'influence des pratiques culturales sur le sol et la plante".

Les travaux de Hartmann (1991) dans les palmeraies industrielles de la Côte d'Ivoire, où les feuilles d'égavage sont restituées en andain dans les interlignes de plantation, se sont intéressés à l'évolution des propriétés physiques de la couverture pédologique des palmeraies.

En étudiant l'effet de différents systèmes de cultures sur la matière organique et l'azote des terres de barre du Bénin, Djègui (1992) a montré dans des palmeraies à caractère industriel, l'existence d'une variabilité spatiale de la matière organique du sol. Selon l'auteur, cette variabilité est liée d'une part aux pratiques culturales propres aux cultures vivrières conduites sur billons dans les jeunes palmeraies, et d'autre part au mode de plantation en ligne et de restitution en andains des feuilles d'égavage. Il conclut que les pratiques culturales jouent un

rôle déterminant sur le stock et la variabilité de la matière organique du sol. Hartmann (1991) a trouvé que ces restitutions de feuilles d'élagage dans les palmeraies peuvent atteindre 10 tonnes de matière sèche à l'hectare.

Quelques études (Jaffré, 1983 ; Khalid et al., 1999 ; Morel et al., 2011) ont porté sur l'estimation des biomasses et minéralo-masses aériennes des palmeraies sans prendre en compte les pratiques culturales. En Malaisie, Khalid et al. (2000a, 2000b) ont étudié les effets du recyclage de la biomasse aérienne (tronc et feuilles) du cycle précédent sur la croissance des palmiers en plantation industrielle et sur les paramètres physico-chimiques du sol. Les études de Khalid et al. (2000b) ont aussi porté sur l'effet du recyclage au moment de la replantation sur la biomasse racinaire des palmiers. Jourdan (1995) et Nelson (2006) ont également évoqué la distribution spatiale du système racinaire du palmier en fonction des techniques culturales pratiquées dans les palmeraies. Mais le développement (distribution et biomasse) du système racinaire du palmier à huile peut ne pas être conditionné uniquement par des techniques culturales, mais pourrait aussi être lié aux caractéristiques génétiques de la variété plantée (Fageria et Moreira, 2011). Selon Ruer (1968), Cornaire et al. (1994), Tonassé (2007) des différences génétiques existent au niveau du développement du système racinaire du palmier à huile. Des travaux conduits sur la distribution du système racinaire du palmier à huile, en Guinée (Nelson et al., 2006) et au Bénin (Tonassé, 2007), ont montré qu'il existe plus de racines fines, tertiaires et quaternaires (RIII et RIV) en surface qu'en profondeur. Ces racines fines se développent davantage et forment un amas important sous les andains de feuilles restituées au sol (Hartmann, 1991 ; Djègui, 1992).

En définitive, si une agriculture écologiquement durable peut s'appuyer sur des facteurs agronomiques et environnementaux favorables au statut de la matière organique et aux propriétés du sol, de même qu'au développement des cultures, il reste à mieux connaître l'impact de ces facteurs dans le cas de la culture du palmier à huile au Bénin.

2. Question de recherche

Notre problématique de recherche porte sur des facteurs agronomiques et environnementaux de la durabilité des systèmes agricoles. Elle met l'accent sur l'importance des pratiques culturales, dans le contexte des exploitations de palmeraies villageoises béninoises. Elle se traduit par une question de recherche qui a formé la base de nos travaux :

- ❖ Au cours du cycle du palmier à huile, quels sont les effets de la gestion des feuilles d'élagage sur le sol et la plante ?

Les éléments de réponse à cette question permettront d'alimenter les réflexions sur la durabilité du système de culture de la palmeraie villageoise au Bénin.

3. Objectifs

Pour répondre à la question de recherche l'objectif global a été d'étudier l'impact de la gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile sur le sol et la plante dans des chronoséquences de palmeraies villageoises.

De façon spécifique il s'est agi, en fonction de différents modes de gestion des feuilles d'élagage :

- d'étudier le stock et le statut de la matière organique au sol, et d'autres caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol ;
- d'estimer la production de biomasse végétative (tronc, feuilles et racines) et la production de régimes des palmeraies villageoises ;
- d'établir des relations entre réserves minérales du sol et réserves minérales des parties aériennes ;
- d'identifier des axes de recherche agronomique pour la gestion durable des palmeraies villageoises du Bénin.

4. Plan de la thèse

La présentation de ce travail est organisée en quatre parties et sept chapitres qui suivent **l'introduction générale**. Les chapitres correspondent à des articles publiés et soumis, ou des pré-articles à soumettre. Dans la mesure où chaque article ou préarticle contient, conformément à la forme article sa propre introduction et sa propre conclusion, l'introduction et la conclusion des chapitres contenant plusieurs articles ou préarticles sont des résumés condensés de ces sections.

- **La première partie** est consacrée à l'*étude bibliographique* qui détaille dans le chapitre 1 l'état des connaissances sur le sujet de la thèse, assorti des hypothèses de recherche, et dans le chapitre 2 l'orientation de la recherche à travers la description du cadre d'étude et de la stratégie de recherche.
- **La deuxième partie** est consacrée à une *étude exploratoire* dont les résultats sont présentés dans les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 expose les résultats du diagnostic de connaissance des palmeraies villageoises de la zone d'étude. Ces résultats ont permis de dégager une typologie de ces palmeraies. Le chapitre 4 traite de l'étude du stock de carbone des sols en relation avec les modes de gestion des feuilles d'élagage dans des chronoséquences de palmeraies choisies à partir de la typologie pré-établie.
- **La troisième partie** est consacrée à travers les chapitres 5, 6 et 7, à *une étude détaillée réalisée conjointement sur les compartiments sol et plante* des palmeraies. Le chapitre 5 porte sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol. L'estimation des biomasses et minéralo-masses aériennes des palmeraies est présentée dans le chapitre 6, et le développement du système racinaire dans le chapitre 7.
- **La quatrième partie** est consacrée à la *discussion et à la conclusion générale* des résultats. Dans une première section, la question et les hypothèses de recherche sont rappelées, puis les effets des modes de gestion des feuilles d'élagage sur le sol et la plante sont analysés et discutés dans une deuxième section. Les hypothèses de recherche sont également discutées. Dans la troisième section, les conclusions partielles des parties précédentes sont prises en compte pour analyser la durabilité

du système de culture des palmeraies villageoises du Bénin. Enfin, la conclusion générale fait le point des principaux apports de l'étude et propose des perspectives de recherche, à court, moyen et long terme.

PREMIERE PARTIE

Etat de l'art et orientation de la recherche

Première partie : Etat de l'art et orientation de la recherche

Introduction de la première partie

Dans cette première partie de la thèse, le chapitre 1 fait le point des connaissances sur le sujet et permet de définir une orientation de la recherche à travers la formulation d'hypothèses. Le cadre d'étude et la stratégie de recherche sont présentés dans le chapitre 2.

Chapitre 1 : Etat de l'art de la recherche

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les deux grands aspects abordés dans la thèse que sont la matière organique du sol et les biomasses de la plante. Il nous oriente sur la formulation des hypothèses de recherche.

1.1 Introduction du chapitre 1

Avant de définir et de mettre en œuvre une stratégie de recherche, il convient de faire tout d'abord le point des connaissances sur le concept de la matière organique des sols et son rôle dans les agro-écosystèmes. Il est également nécessaire de faire la synthèse des études antérieures sur l'effet des pratiques culturales sur la matière organique des sols tropicaux, sur la biomasse des plantes et sur les systèmes agricoles de plantations de palmier à huile. Le cas spécifique des palmeraies béninoises doit être abordé dans cette synthèse. Enfin, un point doit être fait sur les méthodes existantes pour l'étude de la matière organique du sol et l'étude des biomasses de la plante. Les conclusions tirées de ce point des connaissances permettent de formuler des hypothèses de recherche.

1.2 La matière organique du sol

1.2.1 Le concept de "matière organique du sol"

La matière organique du sol (MOS) est une notion assez large qui a été beaucoup discutée par les chercheurs. Bien que la définition exacte de la MOS soit assez diversifiée, les fondements de son concept et les réflexions sur son rôle sont souvent convergents. Ainsi, le terme "matière organique du sol" désigne un ensemble de substances et composés carbonés hétérogènes issus d'apports successifs de matières d'origines végétales et animales (Craswell 2001 ; Manlay 2007 ; d'Annunzio 2008). Au sujet de son rôle, plusieurs auteurs rapportent que la MOS contrôle de nombreuses propriétés du sol (physiques, chimiques et biologiques) et les grands cycles biogéochimiques (Craswell, 2001 ; Nadwa, 2001 ; Diels et al., 2004 ; Rossi et al., 2009 ; Clément 2011. com pers, ...). Selon Martius et al. (2001), les sols prennent

vie de leurs matières organiques : d'importantes communautés de microorganismes et d'animaux du sol (vers de terre, termites, mille-pattes, acariens, champignons, bactéries, et microbes) jouent un rôle important dans les services écosystémiques, en particulier dans le recyclage du carbone et d'autres éléments nutritifs de la plante. Craswell et Lefroy (2001) ont rappelé que sans la MOS la surface de la terre serait un mélange stérile de minéraux d'altération. La nature de la matière organique du sol est très complexe : principalement constituée des composés humiques, des racines, des microorganismes, des lombriciens....C'est pourquoi il serait plus juste de parler des matières organiques du sol.

Parmi les composantes des matières organiques du sol, une distinction importante est faite entre les substances non humiques et les substances humiques. Les substances non humiques sont des molécules appartenant à des familles chimiques identifiées : hydrates de carbone, protéines, acides aminés, lipides, tanins, lignines et acides organiques. Une partie de ces molécules peut être dissoute dans la solution du sol mais la plus grande partie est associée aux minéraux et aux substances humiques. Les substances humiques sont des macromolécules acides, de tailles variables, de composition chimique et de structures complexes. Elles sont définies sur une base opérationnelle par des critères de solubilité en milieux alcalins et non alcalins.

1.2.2 Matière organique du sol et paramètres du sol

Manlay (2007) a proposé une représentation des rôles majeurs joués par les matières organiques dans le fonctionnement du sol (figure 1.1) et a considéré que le statut de la MOS en faisait un indicateur fort de la fertilité du sol et de la dégradation des terres. Selon Frisque (2007), un des indicateurs principaux de la qualité d'un sol est sa teneur en matières organiques. Celles-ci constituent la partie vivante du sol et lui confèrent la plupart de ses propriétés.

De nombreuses études ont montré le rôle essentiel que joue la MOS dans le maintien de la qualité physique, chimique et biologique du sol (Pieri, 1989 ; Rossi et al., 2009). La MOS assure une fonction de stabilisation des agrégats du sol, et influence donc la structure et la porosité du sol qui sont essentielles au transport de l'eau et de l'air dans le sol. Mais en retour, selon Feller et al. (1991), les propriétés physiques du sol, notamment la texture, influencent la MOS. Les auteurs ont montré sur sols ferrugineux et ferrallitiques que la mise en culture des sols, pendant 3 à 10 ans, a engendré une diminution de 30 à 40 % du stock organique, diminution d'autant plus rapide que le sol est sableux. La MOS, en se dégradant et en se minéralisant, influence la qualité chimique du sol et fournit des éléments nutritifs (azote,

phosphore, calcium, magnésium...) aux plantes (Soltner, 1992 ; Gobat et al., 1998). Elle améliore la capacité d'échange cationique des sols et assure le rôle de stockage des éléments nutritifs. Une augmentation de la teneur en carbone issu de la MOS d'une valeur de 1 à 2% est susceptible d'augmenter la CEC de 25% dans un sol limoneux, et plus dans un sol sableux (Arrouays, 2002). De même, la MOS complexifie et immobilise les éléments traces métalliques (Cadmium, Mercure, Zinc, Plomb...) dans le sol et joue un rôle dans la limitation de la toxicité des sols liée à ces éléments (Halim et al., 2003 ; Achiba et al., 2009 ; Janoš et al., 2010). Elle améliore la qualité de l'eau du sol en retenant ou en dégradant certains micropolluants organiques et les pesticides. Sur la qualité biologique du sol, la MOS joue un rôle de stimulation des organismes du sol (insectes, vers de terre, microorganismes...) qui assurent à leur tour la dégradation, la minéralisation, la réorganisation et l'humification de la MOS, de même que l'aération du sol. Il y a une relation étroite entre les teneurs en MO et l'activité biologique des sols (Banerjee et al., 2006). Selon, Mustin (1987), la fraction organique du sol fournit une grande diversité d'habitats et une source d'énergie pour la faune (lombrics, acariens, nématodes...) et la microflore (champignons, algues, micro-organismes) du sol. Plus ce monde souterrain est varié, plus il assurera le maintien des pathogènes potentiels en dessous de leur seuil de nuisibilité.

Les grandes étapes de la décomposition et de la minéralisation de la matière organique du sol impliquent différents organismes du sol. La première étape consiste en une fragmentation des débris végétaux par les ingénieurs de la litière (insectes, arachnidés, crustacés...). Ces débris réduits en taille plus fine sont davantage dégradés par les ingénieurs du sol (myriapodes, vers de terre...) qui les affinent à leur tour et les rendent disponibles pour la minéralisation par les bactéries et champignons du sol (figure 1.2).

Les processus de ces étapes de décomposition et minéralisation de la matière organique du sol sont guidés à la fois par la nature biochimique des composants organiques et par les conditions du milieu : pluviométrie, température du sol, disponibilité en nutriments, disponibilité en oxygène, hydrographie, acidité du sol, texture et structure du sol, pratiques d'utilisation des terres (apports en matières organiques ou travail du sol). Selon Liski et al. (1999), le taux de carbone organique dans le sol est fonction du climat car les processus qui définissent le pool du carbone organique du sol (la production primaire nette de la végétation et la décomposition de matière organique) sont contrôlés par les conditions environnementales. Tiessen et al. (2005) ont montré que les variations de température dans le sol influencent beaucoup plus la décomposition du carbone labile du sol que celle des composantes résistantes, i.e. la matière organique stable. Martius et al. (2001) ont évoqué les

différences qu'on observe dans la gestion de la matière organique des sols en milieux tempérés comparativement aux milieux tropicaux. Selon ces auteurs, la gestion de la matière organique des sols tropicaux devrait être plus étudiée par les scientifiques, car les conditions climatiques tropicales rendent plus sévères la décomposition de la matière organique dans ces sols.

Parmi ses différentes fonctions, on attribue également à la MOS le rôle d'un réservoir important dans le cycle du carbone. Des études récentes ont montré l'importance de la séquestration du CO₂ atmosphérique dans ce réservoir : le carbone est d'abord immobilisé dans les tissus des végétaux avant d'être, soit partiellement minéralisé (c'est-à-dire libéré - ou rejeté - sous forme de gaz carbonique), soit partiellement stabilisé dans le sol sous forme d'humus (Van Wesemael, 2006). Arrouays et al. (2003) ont estimé qu'avec 1500 milliards de tonnes de carbone, soit environ deux fois le stock de carbone atmosphérique et trois fois le stock de carbone dans la végétation terrestre, le sol est le plus grand réservoir de carbone de la biosphère continentale. Maintenir ou augmenter la quantité de MOS peut donc avoir un effet sur les concentrations de CO₂ atmosphérique, en limitant une partie des émissions de gaz à effet de serre. Des actions doivent donc être encouragées dans ce sens à travers les pratiques agricoles adoptées pour la conduite des agro-systèmes, notamment sur les sols tropicaux en général, et en particulier sur les sols du continent africain dont la vulnérabilité a été évoquée dans plusieurs études (Craswell et Lefroy, 2001 ; GIEC, 2001 ; Martius et al., 2001). Selon Williams et al. (2007), l'Afrique est le troisième plus grand continent (20% de la superficie de la Terre), mais les connaissances sur le pool du carbone organique du sol y sont limitées.

Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre dans des travaux sur la matière organique du sol, et la caractérisation des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol.

L'utilisation du global positioning system (GPS) (Liu et al., 2008 ; Jiang et al., 2008), des images satellitaires, des cartes pédologiques, des cartes de rendements, des techniques géostatistiques, du système d'information géographique (SIG), de la spectroscopie infra rouge (Ambroise, 1990 ; Brunet et al., 2007 ; Barthès et al., 2008 ; Liu et al., 2008 ; Ruth et Lennartz, 2008 ; Lemos et al., 2008 ; Wetterlind et al., 2008), de la tarière ou du carottier (Nicoullaud et al., 2007 ; Chabi et al., 2003), a permis dans différentes études de positionner des parcelles et des points de prélèvement, de réaliser des échantillonnages et sondages, et de caractériser les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

La matière organique du sol peut être caractérisée par le rapport C/N du sol qui informe sur l'état de sa minéralisation, mais aussi par ses caractéristiques granulométriques. Cette caractérisation se base sur la méthode de fractionnement granulométrique de la matière

organique des sols (Feller, 1979) qui a été appliquée par Gavinelli et al. (1995), d'Annunzio (2008) et Paolo et al. (2008), pour caractériser la matière organique du sol et ses associations avec les particules minérales du sol. Les quantités et tailles des fractions granulométriques de matière organique peuvent être mises en relation avec le turn-over de la MOS, ce qui renseigne sur la vitesse de renouvellement de la MOS et sa stabilité dans le sol (Feller, 1994). L'étude des fractions granulométriques de la MOS s'accompagne souvent de celle de l'activité biologique et de la biomasse microbienne dont le rôle dans la biogenèse de l'humus et l'importance dans la libération des éléments nutritifs ont été décrits (Powlson et al., 2001 ; Ouédraogo, 2007 ; Paolo et al., 2008).

Powlson et al. (2001) ont aussi travaillé sur des indicateurs de la biomasse de la population microbienne du sol et son activité : la mesure in situ ou en milieu contrôlé du CO₂ dégagé, la détermination de la biomasse microbienne par fumigation, l'étude des activités enzymatiques (déshydrogénase ou phosphatase) et la biologie moléculaire basée sur les ADN ou ARN des microorganismes.

Le stock de MOS par unité de surface, sur une profondeur donnée, peut être calculé en utilisant la densité apparente du sol. Cette variable fournit une information complémentaire de celle de la teneur pondérale en carbone organique : une mesure de stock dans un sol peut correspondre à plusieurs teneurs différentes ; à l'inverse, une teneur mesurée dans un sol peut correspondre à des stocks de carbone différents selon l'épaisseur de sol et la superficie considérées (Frisque, 2007 ; Van Wesemael, 2006).

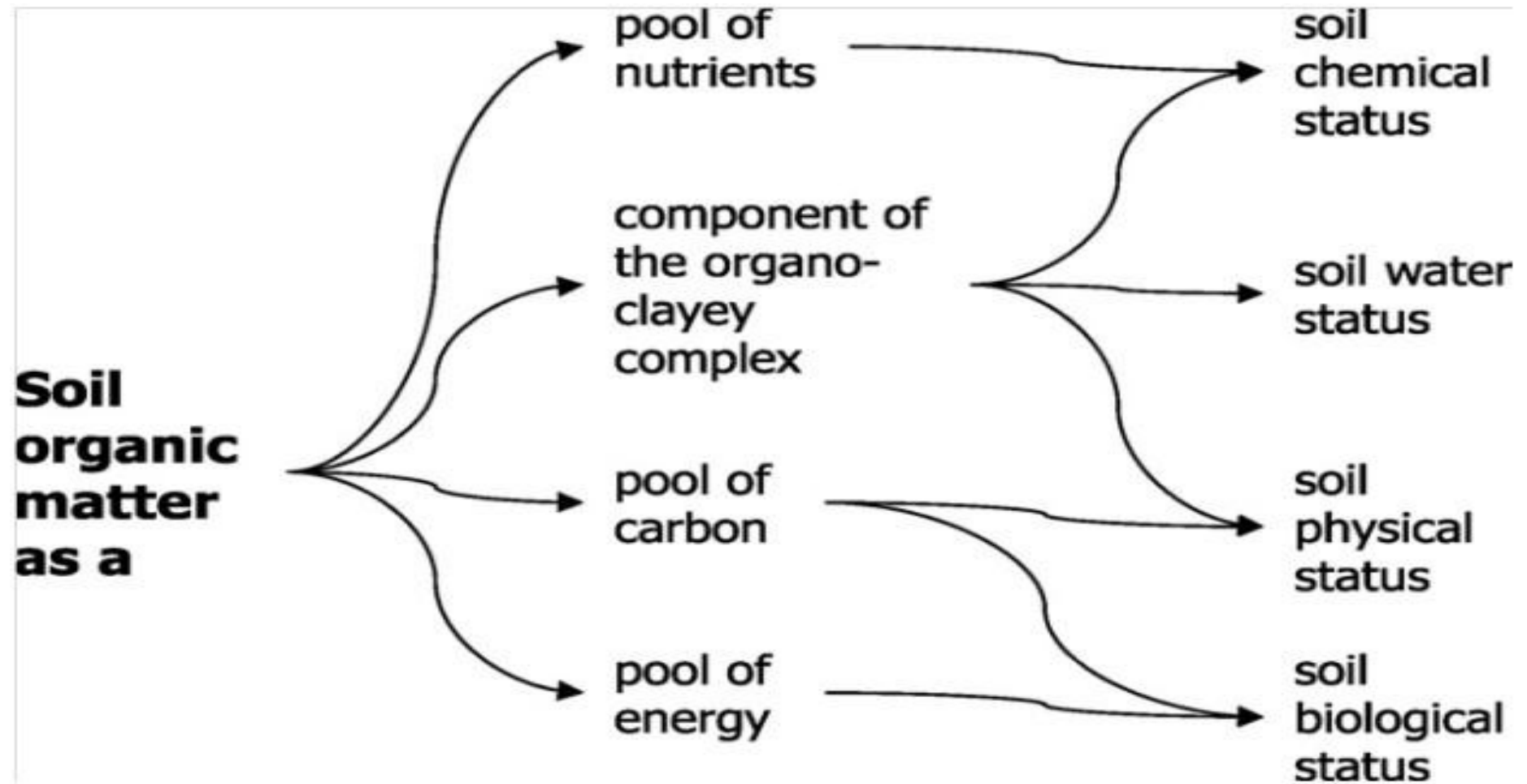


Figure 1.1. Relations entre MOS et indicateurs de fertilité du sol. (Manlay et al. 2007)

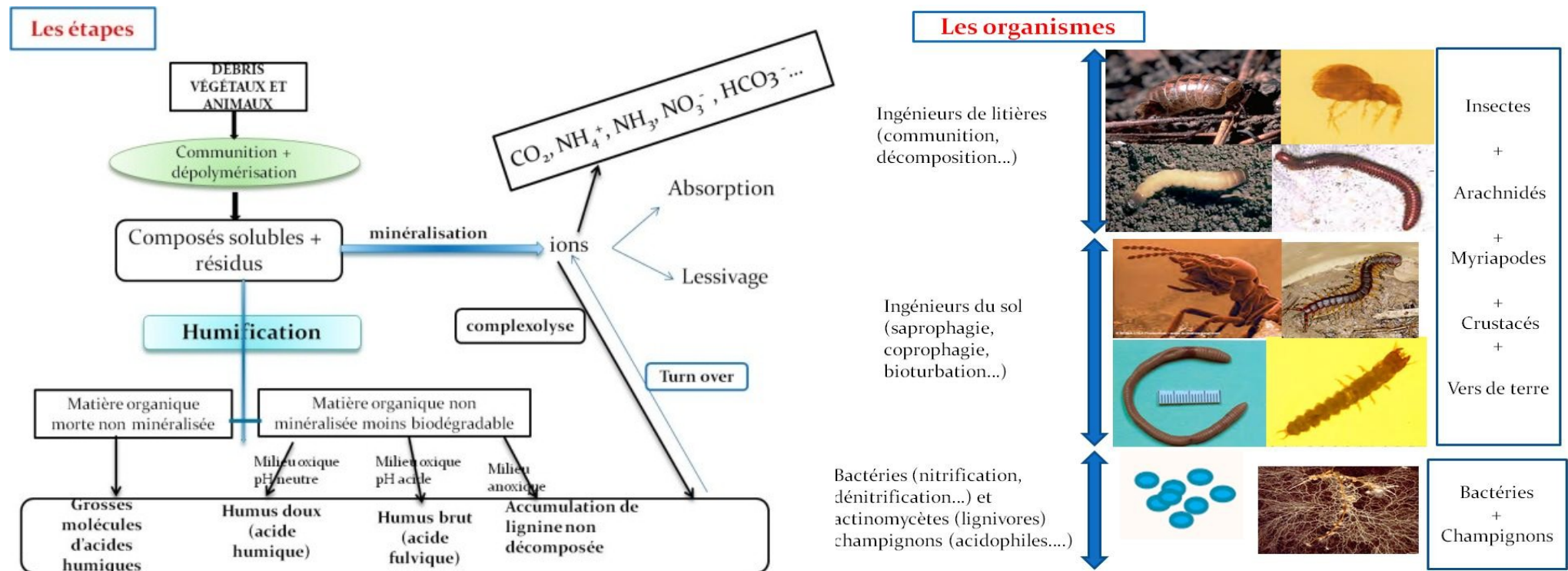


Figure 1.2. Les étapes de décomposition des MOS et les acteurs (faune et flore du sol).

Sources : Larouche (1983) ; Chotte (2009) ; Blanchart (2009) ; Humification et minéralisation des MOS :

<http://www.ecosociosystemes.fr/mineralisation.html> ; Les molécules humiques : <http://www.u-picardie.fr/beaucham/mst/humus.htm>

1.2.3 Pratiques culturales et autres facteurs influençant la matière organique des sols tropicaux

Les pratiques culturales peuvent se définir comme l'ensemble des techniques pratiquées dans la conduite des cultures depuis la préparation du sol, jusqu'à la récolte. Elles prennent en compte les techniques d'entretien et de fertilisation des cultures à différentes phases de leur cycle.

Les pratiques culturales adoptées dans les agro-systèmes ont des impacts positifs ou négatifs, sur le taux matière organique du sol et sur les fonctions qu'elle assure. Selon Powlson et al. (2001), les pratiques culturales qui engendrent une perte de la MOS endommagent la résistance du sol. Elles affectent souvent la productivité agricole, et à grande échelle menacent la sécurité alimentaire (Scherr, 1999). Les apports de matières organiques au sol sont essentiels pour maintenir la capacité d'un agrosystème à résister aux perturbations (sécheresse, maladies, froid) (Administrator, 2009). Ces apports améliorent les teneurs en carbone organique des sols, diminuent la densité apparente et augmentent la porosité qui est un bon indicateur du rôle de l'activité biologique dans la formation des pores (Arrouays et al., 2002 ; Eynarda et al., 2004).

Les débats sur la vulnérabilité des sols tropicaux et la nécessité d'adopter de bonnes pratiques de gestion de la MOS et de conservation de ces sols datent de plusieurs années. Selon Craswell et Lefroy (2001), les sols tropicaux ne sont pas nécessairement plus pauvres en matières organiques que les sols tempérés mais les pratiques culturales (défrichement et mise en culture annuelle continue) intensifient les pertes en MOS. Dans un système de culture continu pendant 20 ans au Brésil, Jantallia et al. (2007) ont constaté sur la profondeur 0 - 100 cm, une perte de stock de carbone de 10 t.C.ha⁻¹ sans labour du sol et de 30 t.C.ha⁻¹ sous labour conventionnel continu. Selon Feller et al. (2001), dans les milieux agricoles tropicaux, notamment dans les pays en développement, le maintien de la fertilité des sols en accord avec les défis environnementaux nécessite des pratiques de gestion des terres qui incluent des apports de matière organique et la séquestration du carbone. En effet, les pratiques qui permettent d'améliorer le bilan de carbone organique consistent soit à augmenter les apports en MO (enfouissement d'engrais verts et de résidus de récolte, apports de MO exogènes) soit à réduire les pertes de MOS en ralentissant leur minéralisation (techniques de labour réduit, semis direct) (Frisque 2007).

Les effets positifs des systèmes de cultures à base de légumineuse sur la MOS et d'autres paramètres du sol ont été démontrés sur les sols ferrallitiques du Bénin par Amadji et Aholoukpè (2008), Barthès et al. (2004 ; 2006). L'association de longue durée du maïs avec

une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens*) a augmenté le stock de carbone et réduit l'érosion sur ces sols. La légumineuse de couverture représente $10 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ de biomasse sèche dont 83% de biomasse aérienne, et la séquestration de $1,3 \text{ t.C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Barthès et al., 2006). Lal et Kang, (1982), Isaac et al. (2005) et Vesterdal et Leifeld (2010) rapportent que le passage d'un système forestier ou d'une végétation naturelle à différents types ou successions culturales diminue les stocks organiques du sol. La conversion d'une forêt au Ghana en un système agro-forestier à base de culture de Cacao a fait baisser les stocks de carbone, sur la profondeur 0-15 cm de sol, de $22,6 \text{ t.C.ha}^{-1}$ à $17,6 \text{ t.C.ha}^{-1}$ entre 2 ans et 15 ans de plantation (Isaac et al., 2005). Les changements d'occupation des sols influencent donc les processus biologiques et chimiques qui affectent les stocks de matières organiques dans le sol.

Cependant les techniques culturales ne sont pas les seules causes de la modification des stocks de matière organique des sols tropicaux puisqu'en milieu tropical, la dégradation du carbone et son mouvement vers la profondeur sont plus intenses qu'en milieu tempéré à cause du climat chaud et humide et des sols qui sont plus profonds (Arrouays et al, 2002 ; Craswell et Lefroy, 2001).

Le comportement des cultures sur un sol peut dépendre autant des différences de techniques culturales que des variations des propriétés du sol (Audebert et Blavet, 1992). Selon Machet et al. (2007), l'hétérogénéité des rendements constatée dans les champs cultivés n'est pas seulement due aux techniques culturales ; elle peut être également liée aux potentialités agronomiques des sols découlant de leur pédogenèse, de la topographie et de la dynamique de l'eau (Trangmar et al., 1985).

Ainsi, un défi majeur consiste à définir les étapes nécessaires pour mieux comprendre et gérer la MOS des sols tropicaux (Martius et al., 2001) ; c'est notamment le cas des sols des plantations de palmier à huile. En effet, Djegui (1995) a constaté une grande variabilité spatiale de la MOS sous palmeraie au Bénin, en raison du dispositif de plantation et des techniques culturales de gestion des matières organiques. Avec une pratique de restitution des feuilles d'élagage en andain sur les lignes de plantation, l'auteur constata que les stocks de carbone étaient plus élevés sous andain que dans l'interligne et dans les ronds (espace désherbé autour du palmier à huile pour l'application de la fertilisation minérale) mais toujours plus faibles que les stocks organiques sous un système forestier. Selon Frazaõ (2012), la variabilité de la matière organique des sols sous palmier à huile est due aux apports de litière provenant de la biomasse aérienne et de la décomposition des racines. L'auteur a observé des valeurs de stocks de carbone plus élevées sous les andains de feuilles et dans les ronds que dans les interlignes des plantations de palmier à huile au Brésil. Dans des essais de

fertilisation minérale et organique de plantations de palmier à huile en Papouasie-Nouvelle-Guinée et en Indonésie, Nelson et al. (2011) ont constaté que les apports d'engrais minéraux azotés (sulfate d'ammonium, chlorure d'ammonium) et potassique (chlorure de potassium) ont acidifié le sol dans les ronds où les engrais étaient appliqués, ce qui a entraîné une diminution des cations échangeables, notamment le calcium. Par contre, la fertilisation organique par recyclage des feuilles d'élagage, et des sous-produits d'usinage (rafles des régimes et effluents) a amélioré ces paramètres du sol et la capacité d'échange cationique. En conclusion, les pratiques culturales dans les palmeraies induisent une variabilité des propriétés du sol à l'échelle métrique autour des palmiers et constituent une des causes de la variabilité de ces propriétés à l'échelle de la parcelle, et entre les parcelles.

1.3 La culture du palmier à huile en Afrique

1.3.1 Généralités

Le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) est une plante monocotylédone de la famille des palmacées. C'est la plante oléagineuse la plus productive en corps gras à l'hectare (Bracelos, 1998 ; Corley et Tinker, 2003). En termes de production mondiale de corps gras d'origine végétale, l'huile de palme occupe depuis 2009 la première place (28%) devant le soja (22%) (Oil World, 2010).

L'épithète "guineensis" fait référence aux origines du palmier à huile qui se trouvent le long du Golfe de Guinée en Afrique de l'Ouest, se prolongeant vers l'Afrique Centrale (figure 1.3) (Jacquemard, 1998).

Malgré sa taille et son aspect, le palmier à huile n'est pas un arbre d'un point de vue botanique mais une herbe géante de la famille des monocotylédones. Dans la suite du texte nous utiliserons cependant ce terme d'arbre, communément employé et correspondant aussi à la forme anglophone « tree » de palm tree. Le palmier à huile est constitué d'une couronne de feuilles au centre de laquelle se situe le bourgeon terminal situé à l'extrémité d'une puissante tige appelée stipe ou tronc bien qu'il ne comporte pas de tissus secondaires (dont en particulier le xylème secondaire ou « bois ») (Corley, 1976). Le stipe a une forme de colonne cylindrique légèrement conique ; il est recouvert par les bases pétiolaires des feuilles élaguées (photo 1.1), qui disparaissent progressivement avec le vieillissement du palmier. Jusqu'à 3 ans, le stipe croît essentiellement en diamètre grâce au méristème d'épaississement primaire (Jourdan, 1995). A partir de 4 ans, la croissance en hauteur est de 30 à 60 cm par an selon l'âge, les facteurs édapho-climatiques et l'origine génétique du matériel végétal (Ng et al., 2003a). Le système racinaire du palmier est également dépourvu de tissus secondaires et se

compose de milliers de racines émergeant directement d'un plateau localisé à la base du stipe. Jourdan (1995) s'est basé sur des critères morphologiques pour définir quatre grands types de racines composant le système racinaire du palmier adulte. Il s'agit des racines primaires (R1), secondaires (R2), tertiaires (R3) et quaternaires (R4). En fonction de leur mode de fonctionnement, de leur séquence de mise en place et de leur état de différenciation (Jourdan et Rey, 1996 ; 1997a), ces types racines se subdivisent en classes de racines qui seront décrits plus loin dans ce chapitre.

La couronne présente une phyllotaxie régulière caractéristique de la plante. Les feuilles non ouvertes sont les flèches qui apparaissent au centre du bourgeon terminal. L'épanouissement des feuilles se fait de façon centrifuge au fur et à mesure de l'apparition des jeunes feuilles. Les feuilles sont disposées sur une spirale, où elles occupent un rang précis à un instant donné (Ng et al., 2003b). Une feuille est composée d'un pétiole dont la base s'insère dans le stipe, d'un rachis dans le prolongement du pétiole et de folioles insérées sur le rachis (figure 1.4). La jonction entre pétiole et rachis s'appelle le point C où sont situées les premières folioles. Les dimensions du point C ont été utilisées comme indicateur de la croissance végétative (Corley et al., 1971 ; Ng et al., 2003a).

En termes de conditions climatiques, pour son développement optimal, la culture du palmier à huile exige au moins 1800 mm/an de pluie, plus de 1800 heures/an d'ensoleillement et une température moyenne annuelle de 28° à 34°C (Nouy et al., 1999 ; Konan et al., 2008).

L'expansion de la culture du palmier à huile dans le monde a commencé dans les années 1960 lorsque la plante a été importée en Asie du Sud-Est, notamment en Malaisie puis en Indonésie qui détiennent aujourd'hui plus de 80% des superficies mondiales plantées (Ahoyo, 2012). Ce succès s'explique par des conditions climatiques globalement plus favorables que dans les pays de l'Afrique Occidentale (Nodichao, 2008).

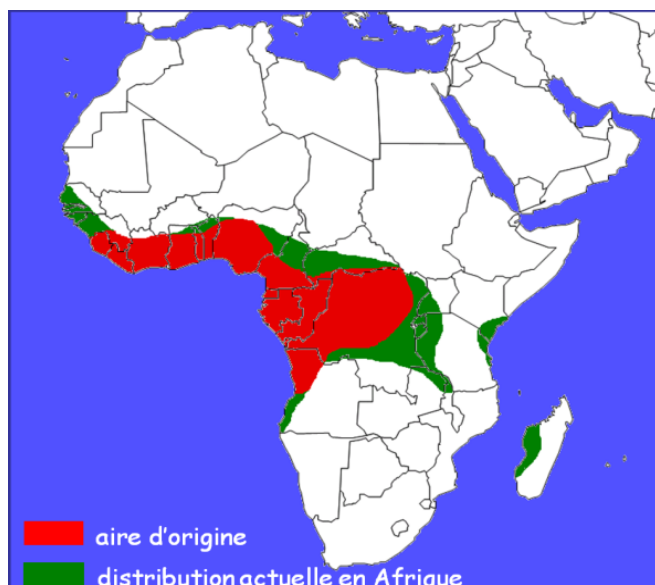


Figure 1.3 : Origine et dispersion de *Elaeis guineensis* en Afrique
Source : David CROS, (Adaptation de Corley et Tinker, 2003)



Photo 1.1. Palmier à huile adulte sur pied (10 - 12 ans d'âge)

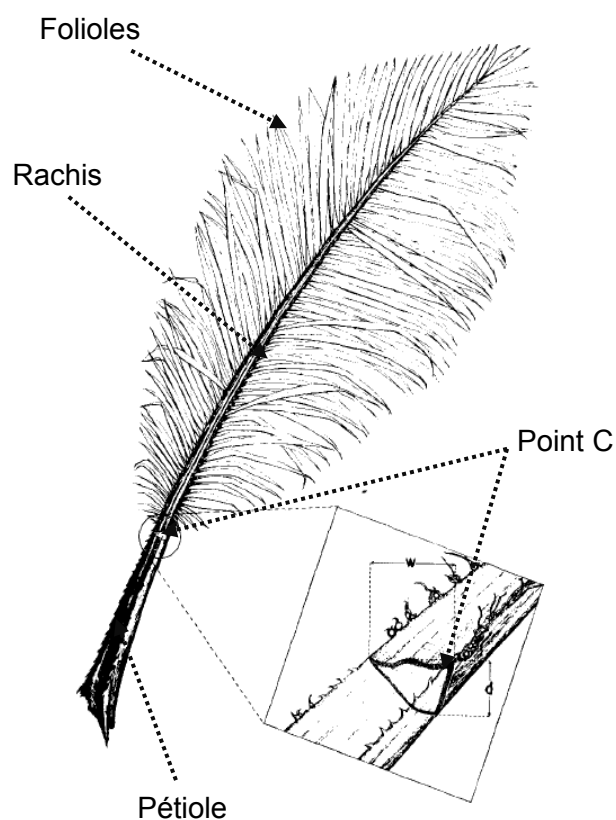


Figure 1.4. Différentes parties de la feuille du palmier à huile. Source : Corley et al. (1971).

Selon Carrère (2010), le World Rainforest Movement a défini 23 pays africains¹ qui participent à la production d'huile de palme sur le continent. Une estimation très générale donne une surface totale d'environ 6 millions d'hectares de terres plantées avec le palmier à huile dans ces 23 pays. Hirsch (1995) affirme que 9 de ces pays (le Bénin, le Cameroun, la République Centrafricaine, le Congo, la Côte d'Ivoire, le Gabon, le Ghana, la Guinée et le Nigeria) contribuent à 80% de la production africaine d'huile de palme. Les rendements moyens en régimes de palme dans ces pays sont caractérisés par une forte dispersion et varient de 2 tonnes à 16 tonnes de régimes par hectare en production pluviale et peuvent atteindre 20 tonnes à l'hectare en culture irriguée. Ceci les place entre 40 et 75 % des rendements moyens asiatiques (Dufrêne, 1989 ; Hirsch, 1995). Les estimations faites par FAO (2013) placent le Nigeria en tête de ces pays africains, qui a fourni en 2011 environ 1,5 millions de tonnes d'huile de palme sur une production mondiale de près de 50 millions de tonnes. L'USDA (2013) estime la production du Bénin à 50 000 tonnes d'huile de palme en 2013. Ces rendements sont obtenus avec des matériels végétaux améliorés depuis plusieurs années. Une première amélioration basée exclusivement sur une sélection massale (*dura x pisifera*) a donné le *tenera* qui a lancé le véritable marché de semences améliorées de palmier à huile dans le monde (Durand-Gasselin et al., 2000 ; Durand-Gasselin et Cochard, 2005). Par la suite, une multitude de croisements inter-spécifiques entre *Elaeis guineensis* et *Elaeis oleifera* (d'origine latino américaine) et intra-spécifiques ont fait objet de plusieurs études (Cochard et al., 2005). Ils ont permis de mettre à la disposition des pays producteurs du palmier à huile des variétés améliorées à haut rendement et à large adaptabilité agroécologique. En Afrique, différentes catégories d'hybrides intra-spécifiques d'origines "Deli x La Mé" et "Deli x Yangambi"² ont été mises au point en tenant compte des critères d'adaptation aux conditions agro-climatiques et de résistance à la fusariose qui est une maladie fongique endémique à l'Afrique. Mais pour une meilleure productivité du palmier à huile en Afrique, Follin (2008) a suggéré que d'autres axes de recherche soient associés aux progrès génétiques. Il s'agit notamment de la productivité des parcelles et de la durabilité économique dans le respect de l'environnement. Ces deux axes prennent en compte d'une part l'adaptation des densités de plantation au matériel végétal, au sol et au climat, et d'autre part les pratiques culturales, la gestion de la fertilisation, la lutte contre les maladies et ravageurs et la prise en compte des aspects environnementaux et socio-économiques.

¹ Angola, Benin, Burundi, Cameroun, République Centrafricaine, R.D. du Congo, R. du Congo, Côte d'Ivoire, Guinée équatoriale, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée-Bissau, Liberia, Madagascar, Nigeria, São Tomé Príncipe, Sénégal, Sierra Leone, Tanzanie, Togo et Ouganda.

² Deli (Indonésie), La Mé (Côté d'Ivoire) et Yangambi (Congo)

1.3.2 L'élœiculture au Bénin

Les populations du Bénin ont depuis longtemps cultivé le palmier à huile et tiré de l'huile de ses fruits. Le début du développement de la culture au Bénin est à situer dans la seconde moitié du 19^e siècle, avec l'accroissement du commerce régional et une incitation de la population à la production du palmier à huile par le roi Guézo qui régna de 1818 à 1858 (Fournier et al., 2001a ; Ahoyo, 2012). Les palmeraies béninoises sont restées pendant longtemps à l'état de peuplement naturel. Ce sont des palmiers sub-spontanés qualifiés de "palmiers sauvages" par Cochard et al., (2001) et répandus dans les zones humides.

Le palmier à huile est cultivé dans la région sud du Bénin (1°40 - 2°45 E et 6°20 - 7°45 N), dans le bassin sédimentaire dominé par les sols ferrallitiques faiblement désaturés formés sur sédiments meubles argilo-sableux du Continental terminal (Azontondé, 1991). Selon Fournier et al. (2001 a), cette « zone palmier » n'occupe que 20 % du territoire national, mais 67 % de la population y vit.

Le palmier est planté dans les départements de l'Ouémé, du Plateau, de l'Atlantique, du Mono, du Couffo et du Zou-sud (Adjadi, 2008). Dans cette zone, le climat est de type soudano-guinéen avec deux saisons de pluies et deux saisons sèches très marquées qui font que 90% de la production du palmier béninois sont regroupés sur 6 mois (janvier à juin) (Fournier et al., 2001 a). La pluviométrie annuelle varie de 900 mm à 1300 mm, avec des déficits hydriques annuels importants fluctuants entre 400 et 700 mm et faisant du Bénin une zone marginale pour la production industrielle du palmier à huile (Nouy et al., 1999).

Au Bénin, plusieurs étapes historiques de développement de la filière palmier à huile se sont succédé : des palmeraies sub-spontanées valorisées par la cueillette à la main et la transformation artisanale des fruits, on est passé à l'organisation de véritables palmeraies plantées à partir de semences collectées dans les anciennes palmeraies naturelles. Elles ont été installées dans les années 1920 - 1930, sur une superficie totale estimée à 500 000 ha (Fournier et al., 2000) qui a chuté au milieu du 20^e siècle à 300 000 ha (Djègui et Daniel, 1996). En effet, dans les années 1950, les palmeraies naturelles ont été délaissées au profit de grandes plantations industrielles installées avec du matériel végétal sélectionné et gérées par des coopératives d'aménagement rural (CAR) (Fournier et al., 2000 ; Adjadi, 2008). Elles couvraient 27 000 ha de superficie (Fournier et al., 2001 a). Une réorganisation de la filière est intervenue dans les années 1990, suite au déclin des grandes plantations industrielles, et la diffusion du matériel végétal sélectionné en milieu villageois a été promue pour la création des plantations privées ou palmeraies villageoises (Adjè et al., 2001; Fournier et al., 2002).

Dès lors, on a assisté à une extension remarquable de ces plantations privées installées sous le contrôle de la station de recherche sur le palmier à huile pour la fourniture des plants sélectionnés par des pépiniéristes agréés, et sous le contrôle des agents de vulgarisation pour des conseils sur les techniques de bonne conduite de la culture. Les superficies plantées avec le palmier à huile sélectionné en milieu villageois ont ainsi connu une nette progression au Bénin, des années 1990 à nos jours : de 867 ha en 1997 à plus de 16 000 ha en 2012. Les plus grandes superficies plantées chaque année se trouvent dans le département de l'Ouémé-Plateau (Adjadi, 2012). Les parcelles individuelles sont de superficies très variables mais en majorité comprises entre 0,5 ha et 10 ha dans la région des départements de l'Ouémé et du Plateau, grands producteurs de régimes de palmier sélectionné au Bénin (SNV, 2009 ; Aholoukpè et al., 2013b).

Les matériels végétaux sélectionnés diffusés en milieu villageois sont d'origine Deli x La Mé et Deli x Yangambi et issus des "expériences internationales" d'amélioration végétale du palmier à huile (Durand-Gasselin et al., 2000). Dans les conditions climatiques du Bénin, ces matériels peuvent donner jusqu'à 12 tonnes de régimes à l'hectare, soit 3,5 à 4 tonnes d'huile à l'hectare (Houssou, 1985) dans les départements les plus arrosés qui sont l'Ouémé et le Plateau. Selon Adjè (2004), l'irrigation partielle des palmiers sélectionnés en période de sécheresse au Bénin a permis d'obtenir des rendements de 20 à 25 tonnes de régimes à l'hectare en station.

L'expansion récente des palmeraies villageoises béninoises est la preuve de l'importance du palmier dans l'économie familiale rurale béninoise. La superficie totale de palmeraies villageoises s'estime aujourd'hui à plus de 16000 ha. Ces palmeraies sont installées pour divers usages de l'huile et des organes de la plante : alimentation, combustibles, construction d'habitation, pharmacopée, usages rituels et autres (Dissou, 1988 ; Fournier et al., 2001 b).

Les palmeraies villageoises du Bénin sont installées suivant un dispositif de plantation industrielle (143 plants à l'hectare en triangle équilatéral de 9 m de côté), mais sont généralement conduites comme un système d'exploitation de type villageois. Toujours en association avec les cultures vivrières (principalement le maïs), les quatre à cinq premières années de plantation, les produits de récolte du palmier à huile sont utilisés par les paysans pour leur propre subsistance. La culture ne bénéficie pratiquement pas de fertilisation et la transformation des produits de récolte est semi artisanale avec une vente sur place des sous-produits. Ces palmeraies sont caractérisées par des techniques culturales assez variées en ce qui concerne les associations culturales, les techniques d'entretien et la gestion des résidus de

récolte et des feuilles d'élague. Il est fréquent que les feuilles élaguées soient utilisées comme combustible pour l'extraction de l'huile ou d'autres besoins de la vie domestique.

L'expansion des palmeraies alimente la problématique d'occupation des terroirs avec des corollaires sous-jacents comme la disparition des jachères, la destruction des forêts, l'inadéquation des techniques culturales, ainsi que les problématiques environnementales et agronomiques liées à la culture elle-même. Il n'est donc pas surprenant que les recherches actuelles sur le palmier à huile s'intéressent aux impacts environnementaux (séquestration du carbone) des palmeraies (Göttingen, 2005 ; Germer et Sauerborn, 2009 ; Morel et al., 2011 ; Frazão, 2012 ; ...) et à la durabilité des systèmes à base de palmier à huile (préservation des sols, conservation de matière organique, nutrition minérale et hydrique) (Hartmann, 1991 ; Djègui, 1995 ; Adjè, 2004 ; Nodichao, 2008 ; Dubos et al., 2011...).

1.4 La notion de biomasse des plantes

1.4.1 Biomasse des plantes et stockage de carbone

La biomasse d'une plante représente, selon Cherisey et al. (2007), l'ensemble de la matière organique vivante de cette plante. Elle se définit par l'ensemble de la matière organique produite par la plante à travers le processus de la photosynthèse sous forme de carbohydrates présents dans les différents organes. Ce processus explique le rôle de puits de carbone de la production de biomasse, évoqué par plusieurs travaux, qui contrebalance l'émission des gaz à effet de serre à travers le stockage de carbone atmosphérique. Ainsi, en fonction de leur biomasse, les écosystèmes naturels (forêts, prairies) ou cultivés sont souvent indexés dans le contexte actuel du changement climatique. La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) pointe la production de biomasse comme une variable essentielle pour l'amélioration de notre connaissance du système climatique (Le Toan et al., 2011). Les activités qui concernent le piégeage du carbone dans la biomasse sont répertoriées sous l'acronyme LULUCF («Land Use, Land Use Change & Forestry») i.e. «l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie» (Frisque, 2007).

Des études ont montré que tous les écosystèmes continentaux n'ont pas les mêmes performances en termes de séquestration du carbone atmosphérique sous forme de biomasse végétale. Les forêts viennent en tête (dominées par les forêts tropicales), suivies des savanes, des prairies et des terres cultivées (GIEC, 2000). Selon Robert et Saugier, (2003), les écosystèmes terrestres ont un potentiel important de séquestration du carbone, du fait que le carbone contenu dans la végétation (650 Gt) représente presque autant que celui contenu dans l'atmosphère (750 Gt). Ce carbone se retrouve principalement dans le bois des arbres. De ce fait, les forêts et les plantations pérennes ont une part importante dans la séquestration du CO₂ atmosphérique à travers la biomasse de leurs arbres. Les nombreux travaux réalisés sur l'estimation de la biomasse et le stockage de carbone des LULUCF, surtout dans les régions tropicales humides (Houghton, 2000 ; Houghton, 2005, 2006 ; Isaac et al., 2005 ; Peltier et al., 2007 ; Houghton, 2010 ; Chaturvedi et al., 2011 ; Coe et al., 2011 ; etc.) en sont la preuve. Ces études se justifient d'autant que face au boom démographique mondial, estimé à 9 milliards d'habitants sur terre d'ici 2050 (FAO, 2013), les forêts sont détruites au profit d'installation de systèmes agricoles pouvant satisfaire la demande alimentaire des populations. Selon le Millenium Ecosystem Assessment (2005), environ 10-20% des terres de prairies et de forêts existantes devront être converties pour d'autres usages d'ici 2050, en raison principalement de l'expansion de l'agriculture et secondairement de l'extension des villes et

des infrastructures. La conversion des forêts en terres agricoles dans les tropiques entraîne un changement général de couverture végétale qui a des conséquences sur le cycle de carbone, car elle se traduit généralement par de grands flux de CO₂ vers l'atmosphère lorsque la biomasse forestière est brûlée (Schlesinger, 1986 cité par Nyssen 2008).

Ces changements d'utilisation des terres et leurs conséquences sur le cycle de carbone sont à l'origine des discours et des actions qui encouragent l'afforestation, la reforestation ou l'occupation des terres agricoles par des systèmes agro-forestiers. Ces actions sont définies par le protocole de Kyoto de la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (CCNUCC), pour être mis en œuvre dans le monde entier, y compris l'Afrique. Elles nécessitent par conséquent la quantification des variations de stocks de carbone et souvent l'établissement de relations allométriques d'estimation de ces variations (Henry et al., 2011).

Plusieurs méthodes basées sur des équations allométriques ont été mises au point pour quantifier le stock de carbone dans la partie aérienne des arbres (Djomo et al., 2010 ; Singh et al., 2011 ; Henry et al., 2010 ; etc.). Ces équations répondent au principe de base de l'allométrie qui permet selon Picard et al. (2012), de prédire une mensuration d'un arbre (typiquement sa biomasse) en fonction d'une autre mensuration (par exemple son diamètre). Une équation allométrique est une formule qui formalise de manière quantitative cette relation.

En plus de leur important rôle environnemental, les écosystèmes naturels et cultivés jouent un rôle agronomique par le stockage du carbone dans le sol à travers le retour au sol de la biomasse aérienne des arbres et le turn-over de la biomasse racinaire. La chute des feuilles constituant la litière des forêts naturelles, le recyclage des émondes des plantations et des résidus de récolte des cultures, stockent le carbone dans le sol sous forme de matière organique. Les nombreuses fonctions de cette matière organique du sol ont été évoquées dans les paragraphes précédents.

Les débats sur la conversion des systèmes forestiers en systèmes cultivés visent particulièrement le palmier à huile qui fait objet de nombreuses controverses. Si de nos jours, en raison de l'intérêt mondial accordé au cycle du carbone, il est important d'estimer avec précision la biomasse aérienne des écosystèmes naturels (dont les forêts) pour apprécier les augmentations et les pertes de carbone stocké (Henry et al., 2011), il est tout aussi important de quantifier la biomasse des écosystèmes cultivés, en particulier ceux basés sur des plantes pérennes et notamment la biomasse des plantations de palmier à huile. Cet oléagineux est à même de répondre à la demande mondiale de corps gras d'origine végétale

(Oil World, 2010) ; et si elles ne contribuent pas à détruire des surfaces de forêt, les palmeraies à huile pourraient jouer un rôle de puits de carbone (Göttingen, 2005 ; Germer and Sauerborn, 2008 ; Henson et al., 1999 ; Jaffré, 1983 ; Lamade and Bouillet, 2005).

1.4.2 Biomasses et minéralo aériennes du palmier à huile

Le palmier à huile stocke du carbone dans ses différents organes à partir de la photosynthèse. Cette activité de photosynthèse stocke principalement le carbone dans trois parties aériennes du palmier que sont le tronc, les feuilles et les régimes, qui représentent 96% de la production annuelle de biomasse aérienne dans une palmeraie (Corley et Tinker, 2003). Pour des palmiers adultes de plus de 10 ans, Dufrêne (1990) a estimé l'ensemble de la biomasse constituée par le tronc et les feuilles à 42 tonnes/ha en Côte d'Ivoire. Khalid et al. (1999) ont estimé la biomasse de ces deux parties de l'arbre à 85 tonnes/ha dans une palmeraie de 23 ans en Malaisie. De ce fait, la palmeraie pourrait être considérée, par rapport à d'autres agro-systèmes, comme un agro-système de séquestration du carbone atmosphérique. Mais ses performances restent inférieures à celles des forêts naturelles ou plantations forestières (Jaffré, 1983 ; Göttingen, 2005 ; Morel et al., 2011). Dans une palmeraie de 130 arbres/ha en Côte d'Ivoire, la biomasse aérienne maximale de la palmeraie (50 t/ha) était atteinte vers 15 à 20 ans mais demeure nettement inférieure à la biomasse des recrûs forestiers qui atteint 230 t/ha à 40 ans et environ 450 t/ha au bout d'une centaine d'années (Jaffré, 1983).

Plusieurs études ont été entreprises pour estimer les biomasses des palmeraies à différents âges (Jaffré, 1983 ; Khalid et al., 1999 ; Morel et al., 2011). L'estimation des biomasses par observation directe telle qu'elle a été pratiquée par certains auteurs (Jaffré, 1983 ; Syahrudin, 2005) impose d'abattre et de disséquer des arbres puis d'échantillonner les différents compartiments des feuilles et du tronc. En milieu villageois comme celui du Bénin, il n'est cependant pas concevable d'abattre des palmiers et il est donc préférable de s'orienter vers des équations allométriques pour la prédiction des biomasses des feuilles et du tronc.

Il existe peu de méthodes allométriques d'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc du palmier à huile. Ces méthodes sont d'ailleurs assez anciennes. Il s'agit principalement des équations établies par Corley et al. (1971) en Malaisie, reprises par Khalid et al. (1999), Morel et al. (2011). Dans l'application de ces méthodes, l'estimation de la biomasse d'une feuille est basée sur la mesure de la section du point C tandis que la biomasse du tronc est calculée à partir de son volume et de sa densité. Cette dernière est une fonction de l'âge de la plante. Ce jeu d'équations n'a pas été testé dans des conditions agro-écologiques autres que celles de l'Asie du sud-est.

La minéralo-masse du palmier à huile représente la quantité d'éléments minéraux présents dans la biomasse de la plante ; elle permet d'apprécier les réserves à un moment donné ainsi que leur distribution dans les différents organes. Des estimations des quantités exportées par les régimes ont été fournies par Ng (1967 ou 1968) en Malaisie, Dubos et al. (2011) en Colombie. Khalid et al. (1999) ont évalué les minéralo-masses présentes dans les troncs et les couronnes de feuilles lors de l'abattage d'une palmeraie de 23 ans. Le recyclage de la biomasse aérienne dans une palmeraie peut fournir un supplément nutritif important, en particulier d'azote et de potassium, pour suppléer aux apports d'engrais minéraux nécessaires au maintien du potentiel de rendement maximum. Dans une palmeraie de 136 arbres/ha en fin de cycle en Malaisie, Khalid et al. (1999) ont trouvé que la biomasse aérienne recyclable contenait à l'hectare 577 kg N, 50 kg P, 1255 kg K, 285 kg Ca, 141 kg Mg. Les auteurs avancent que le recyclage de cette biomasse aérienne présente un double avantage : la restitution d'une quantité importante de matière organique et d'éléments nutritifs au sol pour le maintien de sa fertilité et une économie monétaire pour les producteurs qui réduiront l'achat d'engrais minéraux. Selon Jaffré (1983), la minéralo-masse du tronc du palmier à huile est évidemment plus importante que celle des autres organes vu qu'à l'âge adulte (en moyenne 17 ans), cet organe représente plus de 75% de la biomasse aérienne recyclable du palmier à huile. Le potassium y est stocké principalement, suivi de l'azote (Khalid et al. 1999 ; Dubos et al. 2011). Dans leur étude sur des palmeraies adultes en Malaisie, Khalid et al. (1999) ont trouvé des teneurs moyennes d'azote et de potassium des feuilles, respectivement de 1% et 1,3%. Les folioles des feuilles sont plus riches en N (2,2% de la MS en moyenne) tandis que le potassium se trouve principalement dans les rachis et pétioles (1,5% de la MS en moyenne)

1.4.3 Biomasse racinaire du palmier à huile

Le système racinaire du palmier à huile est de type fasciculé. En perpétuel renouvellement, il forme un réseau dense constitué de plusieurs types de racines, rayonnant autour du plateau racinaire (photo 1.2) (Jourdan et Rey, 1997a). Jourdan et Rey (1996) ont défini selon leur ramification et leur diamètre, 4 types de racines chez le palmier en pleine production : les racines primaires RI (diam > 4 mm), les racines secondaires RII (1,5 < diam < 4 mm), les racines tertiaires RIII et quaternaires RIV. Les deux derniers types sont souvent regroupés et désignés par racines fines (Rf : diam < 1,5 mm). Jourdan et Rey (1996 et 1997a) se sont basés sur le mode de fonctionnement des racines, leur séquence de mise en place et leur état de différenciation pour définir deux classes par type de racine : les RIVB dirigées verticalement vers le bas et les RIH à direction de croissance horizontale. Les RII sont portées par les RI en

angle droit. Les RIIVB sont verticales dirigées vers le bas et les RIIVH sont verticales dirigées vers le haut. Les RIII sont portées par les RII et les RIV par les RIII. On distingue les racines fines qui poussent en surface (RIII_s et RIV_s) et celles qui poussent en profondeur (RIII_p et RIV_p). Jourdan et al. (2000) ont montré que cette orientation des racines est basée sur le géotropisme. On parle de géotropisme négatif (VH) ou positif (VB). Selon Dufrêne (1989), les racines à géotropisme positif (vers le bas) seraient capables d'extraire l'eau jusqu'à 5 m. Nodichao (2008) affirme que les RI et les RII à géotropisme positif ont une croissance indéfinie et permettraient au palmier d'utiliser l'eau et les minéraux des couches profondes du sol. Cet auteur pense aussi que la présence des RIIVH (géotropisme négatif) portées par les RIH serait une disposition constitutive qui permet au palmier à huile d'explorer très rapidement, de façon opportuniste, les pluies accidentelles qui surviennent en saison sèche. Ainsi, de par son développement et ses fonctions, le système racinaire permet au palmier une bonne exploitation et exploration du sol aussi bien en surface qu'en profondeur (photo 1.3) (Jourdan et Rey, 1997a ; Nodichao, 2008). L'architecture racinaire est directement liée aux différentes fonctions assumées par les racines, dont la fonction principale est l'utilisation efficiente des ressources du sol (Lynch, 1995).

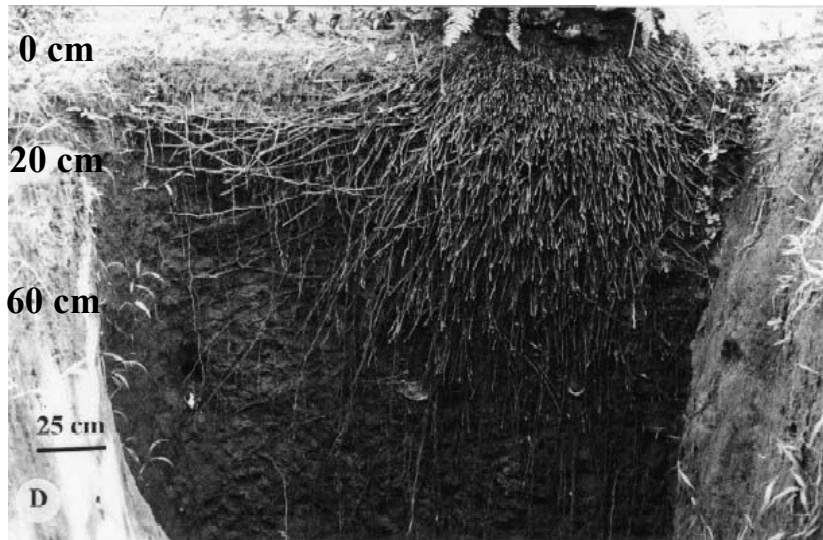


Photo 1.2. Système racinaire d'un palmier de 20 ans observé au champ
Source: Jourdan et Rey, 1997a

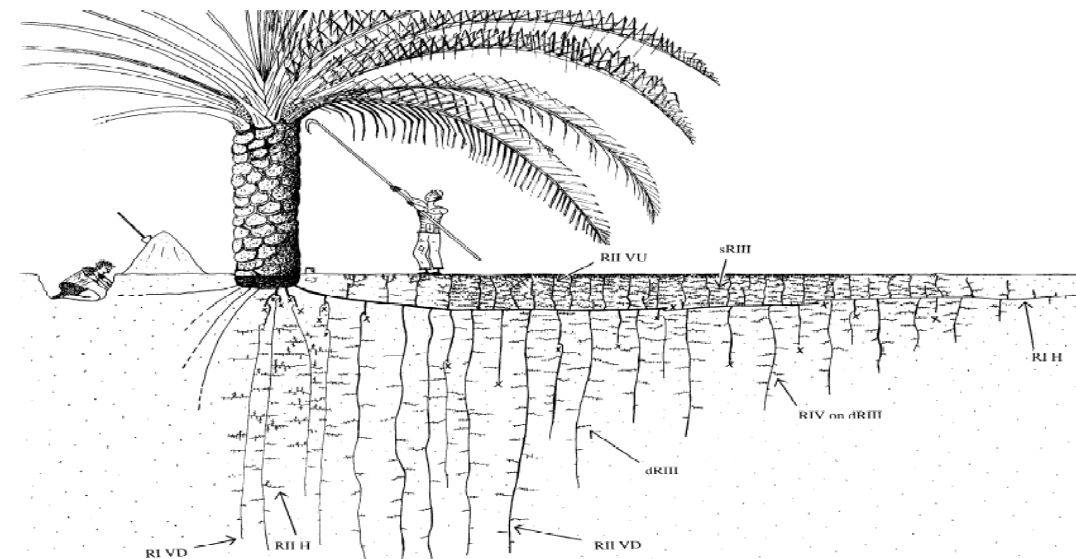


Photo 1.3. Architecture du système racinaire du palmier à huile. VD (vertical down) et V U (vertical up) équivalent respectivement à VB (vertical vers le bas) et VH (vertical vers le haut).

Source : Jourdan et Rey, 1997a

Dans des études sur le développement racinaire, la biomasse racinaire a été évoquée comme une caractéristique tout aussi importante que l'architecture racinaire et dont la connaissance renseigne sur le développement du système racinaire en relation avec plusieurs facteurs. Plusieurs travaux ont montré que les pratiques culturales, la variabilité spatiale de la fertilité des sols, la pluviométrie et même le génotype de la plante affectent le développement et la distribution racinaire (Taillez, 1971 cité par Ng et al., 2002 ; Djègui et al., 1992 ; Tonassé, 2007; Nodichao, 2010 ; Dassou, 2011). Jourdan et Rey (1996) ont montré par simulation que la biomasse racinaire du palmier à huile augmente de façon exponentielle dès la fin de la phase juvénile du palmier à huile. Elle passe de 0,02 t/ha à 3 t/ha puis à 55 t/ha respectivement pour les palmiers d'1 an, de 4 ans et de 16 ans. Les estimations faites par Dassou (2011) dans des palmeraies de 2 ans et 16 ans plantées sur terre de barre au Bénin vont également dans le même sens, aussi bien pour la biomasse que pour la longueur des différents types de racines. De même, Tonassé (2007) et Nodichao (2008) ont montré dans des palmeraies du Bénin, une variabilité spatiale (verticale et latérale) de la densité racinaire, dépendante de l'origine génétique des palmiers.

Selon Ng et al. (2002), la plupart de la biomasse racinaire se trouve dans la profondeur 0-100 cm du sol, mais les racines actives dans l'absorption des nutriments sont principalement situées entre 0 et 50 cm. Djègui (1992) et Hartmann (1991) avaient observé un amas important de racines fines et secondaires sous les andains de feuilles de palmiers restituées au sol et conclurent que la forte humidité et la richesse en matière organique du sol sous andain auraient favorisé cette importante densité racinaire.

Vu l'architecture et le développement du système racinaire du palmier à huile, les méthodes d'estimation de sa biomasse ont beaucoup évolué. Jourdan (1998) a montré les limites de la méthode à l'extracteur plat (Ruer, 1969), de celle à la «pala-draga» (Taillez, 1971) ou à la tarière (Henson et Chai, 1997), pour un échantillonnage précis et une bonne estimation de la biomasse racinaire du palmier. L'auteur a adapté la méthode du polygone ou diagramme de Voronoï (Honda, 1978 ; Snowdon et al., 2002 ; Saint-André et al., 2005) en triangles de Voronoï (Figures 1.5) chez les palmacées.

Nodichao (2008) décrit l'espace de Voronoï comme suit : *"dans une palmeraie, le choix d'un palmier quelconque entouré de ses six voisins permet de définir un hexagone centré sur l'arbre choisi et délimité par la demi-distance entre l'arbre central et ses voisins. Cet hexagone est dénommé espace de Voronoï. Il est composé de 12 triangles rectangles équivalents ayant pour sommet commun le centre du stipe de l'arbre choisi. Si on suppose une symétrie radiale du développement racinaire autour de cet arbre, on peut considérer que le*

développement racinaire dans un triangle pris au hasard est équivalent au développement racinaire dans les 11 autres triangles. L'observation dans un seul triangle de Voronoï permet donc d'estimer le développement racinaire dans l'espace de Voronoï autour du palmier".

Selon Jourdan (1998), la méthode de Voronoï serait une des méthodes les plus précises car elle présenterait l'avantage d'échantillonner un volume de sol représentatif et assez grand (1/12 du volume élémentaire) autour du palmier observé. Ces descriptions faites par Jourdan (1998) et Nodichao (2008) du dispositif de Voronoï, ne sont valables qu'en absence d'andains de feuilles au sol. En présence d'andains de feuilles, les zones équivalentes sont d'une part, celles qui portent les andains, et d'autre part, celles sans andain de feuilles (figure 1.5). Selon Nodichao (2008), la méthode de Voronoï a l'inconvénient d'être lourde au regard de l'importance du volume de sol à trier. En testant au Bénin trois méthodes d'étude racinaire du palmier à huile, la méthode à la tarière, le Voronoï complet et le Voronoï simplifié (figure 1.6), Dassou (2011) a montré que la méthode à la tarière sous estimait les paramètres racinaires alors que par extrapolation, le Voronoï simplifié estimait aussi bien ces paramètres que le Voronoï complet. Il a donc recommandé l'utilisation de la méthode de Voronoï simplifié.

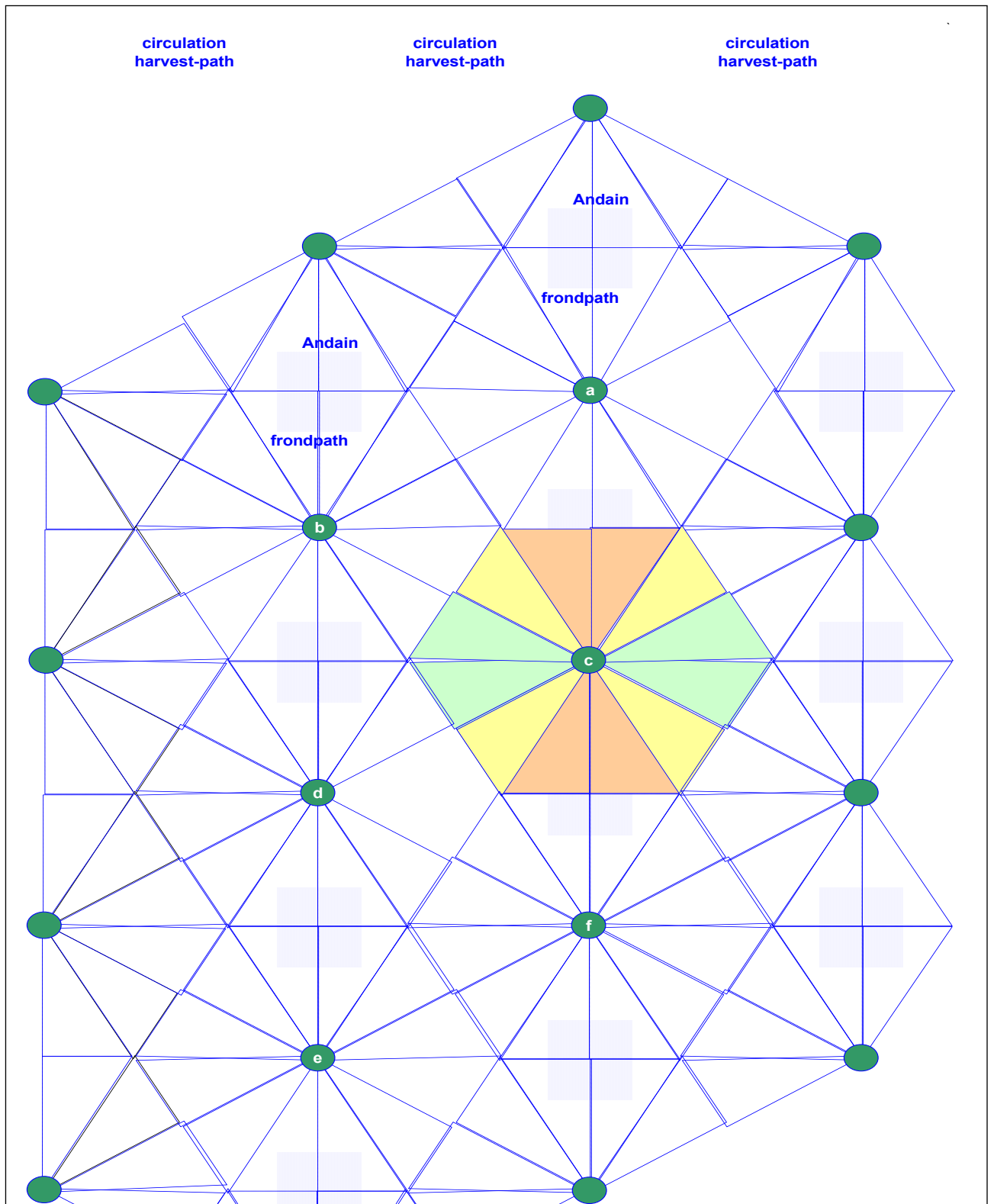


Figure 1.5. Diagramme de Voronoï autour de l'arbre (c) décomposé en 12 triangles rectangles égaux en surface. Les triangles de même couleur échantillonnent des zones de fertilité comparables. Les tas de feuilles (andains) sont figurés en pointillés bleus.

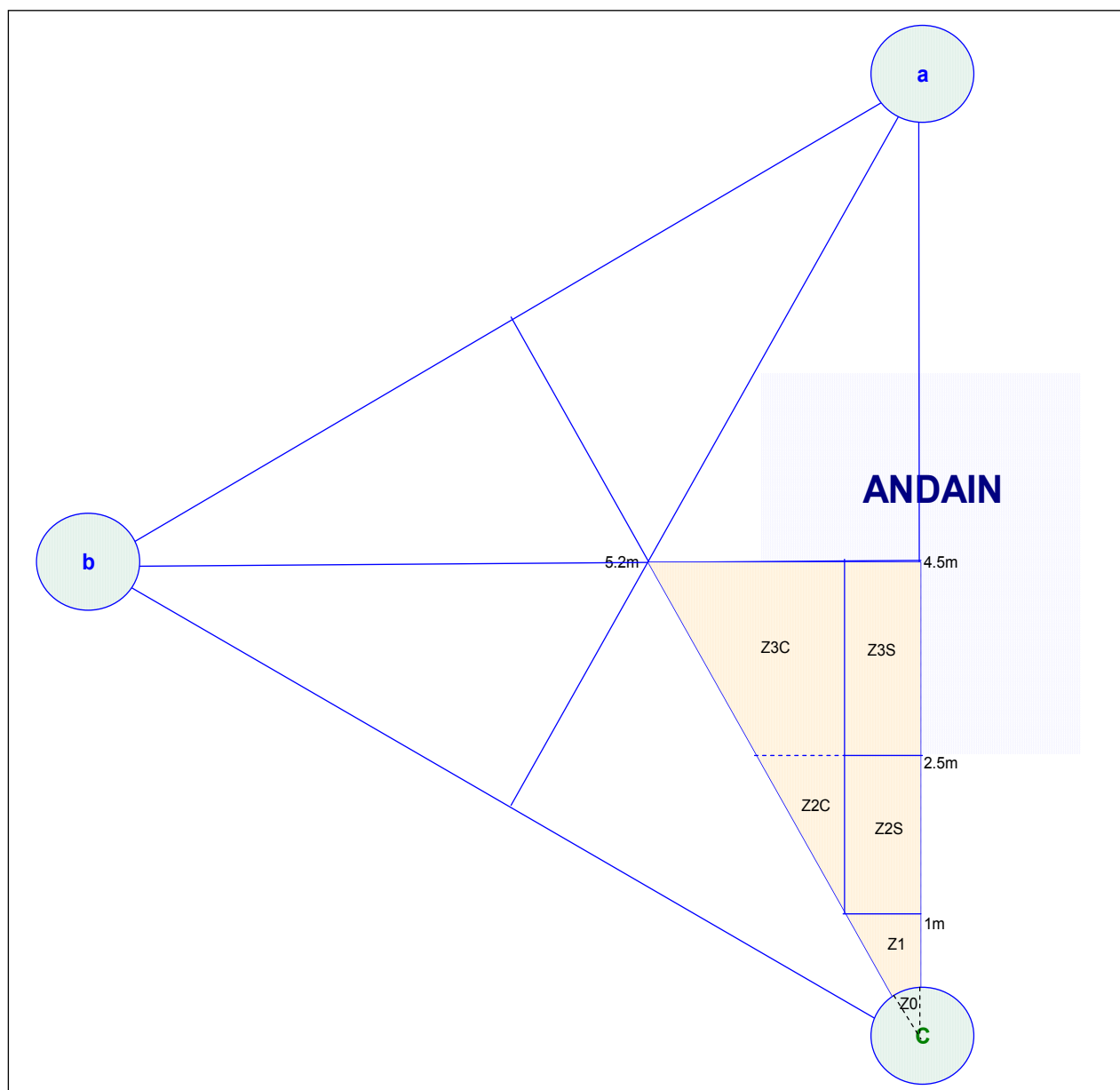


Figure 1.6. Triangle de Voronoï orienté sur la ligne de plantation entre les arbres (a) et (c). Les zones Z1 et Z2 (Z2s et Z2c) échantillonnent chez le palmier adulte, le rond de récolte où sont apportés les engrais. La zone 3 (Z3s et Z3c) échantillonne sous le tas de feuilles (andain) situé entre 2 arbres voisins.

1.5 Conclusion du chapitre 1 et hypothèses de recherche

En conclusion à ce chapitre, on peut retenir le rôle important de la matière organique des sols dans le cycle des nutriments et la vie dans le sol pour la fourniture d'éléments nutritifs nécessaires au développement des cultures. De plus, lorsque les pratiques culturales favorisent son stockage, la MOS joue un rôle environnemental en régulant le taux de CO₂ atmosphérique. L'estimation de la biomasse des cultures et leur restitution au sol lors des changements d'utilisation des terres sont au cœur des débats. Dans ce contexte, l'impact agronomique et environnemental de la matière organique des sols et de la biomasse des palmeraies reste cependant peu connu. Répondre à cette problématique en milieu villageois, conduit à développer des méthodes non destructrices d'estimation de la biomasse aérienne des palmeraies.

Les pratiques culturales en cours dans les palmeraies villageoises du Bénin, caractérisées par une faible fertilisation et une exportation fréquente de la matière organique recyclable, suscitent des interrogations vis à vis de la restitution de la matière organique au sol et de la séquestration du carbone dans la plante et le sol. Ces interrogations ont donné lieu à la question de recherche qui est : «*Au cours du cycle du palmier à huile, quels sont les effets de la gestion des feuilles d'élague sur le sol et la plante?*». Dans cette thèse, nous tenterons de répondre à cette question de recherche à l'aide de la stratégie de recherche développée dans le chapitre 2.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises à partir de la question de recherche et de l'état des connaissances sur le sujet de thèse :

H1- Il existe dans la zone d'étude des types de palmeraies villageoises qui se distinguent par des facteurs pédologiques, agronomiques et socio-économiques.

H2- Les modes de gestion des feuilles d'élague induisent des effets significatifs sur le sol et la plante et ils varient selon les âges des palmeraies. Parmi ces effets :

H2.a. les modes de gestion des feuilles d'élague affectent les stocks de la matière organique du sol selon les âges des palmeraies ;

H2.b. il se crée une variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ;

H2.c. les biomasses et minéralo-masses du palmier à huile sont modifiées.

Chapitre 2 : Cadre d'étude et stratégie de recherche

Dans ce chapitre nous allons présenter le cadre d'étude et la stratégie de recherche adoptée pour répondre à la question de recherche et tester les hypothèses.

2.1 Introduction du chapitre 2

L'objet du chapitre est de présenter dans un premier temps les caractéristiques climatiques, pédologiques, géographiques et démographiques du département du Plateau qui a abrité les travaux de cette thèse. Dans un second temps, la stratégie de recherche que nous avons adoptée afin de pouvoir effectuer ces travaux selon le chronogramme de la thèse et les méthodes d'investigation identifiées sera décrite. Cette stratégie comporte deux sous-sections : une première sous-section qui présente les grandes étapes de l'étude et une deuxième sous-section qui résume les différentes méthodes utilisées pour vérifier les hypothèses de recherche.

2.2 Cadre d'étude

Les travaux ont été conduits dans le département du Plateau qui est situé au sud-est du Bénin (figure 2.1). Il est limité au nord par le département des Collines, à l'est par la République du Nigéria, à l'ouest par le département du Zou et au sud par le département de l'Ouémé. Il est subdivisé en cinq communes : Kétou, Pobè, Adja-ouère, Sakété et Ifangni. Ce département couvre une superficie de 3264 km², soit environ 3% de la superficie nationale (INSAE, 2008). Selon le découpage administratif, les communes sont subdivisées en arrondissements, eux-mêmes subdivisés en villages et quartiers de ville. Le recensement général de la population et de l'habitation de 2002 a dénombré dans le département 407116 habitants. Des projections démographiques estiment cette population à 581612 habitants en 2013 (INSAE, 2008).

Le département du Plateau est dominé par un climat de type sub-équatorial à deux saisons de pluies et deux saisons sèches qui s'alternent. La grande saison pluvieuse dure de mars à juillet (figure 2.2). Elle est suivie de la petite saison sèche, caractérisée par une baisse plus ou moins marquée des précipitations pendant le mois d'août. La petite saison pluvieuse couvre la période de septembre à octobre. Enfin, la grande saison sèche dure de novembre à février. La hauteur moyenne annuelle de pluie dans le département est de 1300 mm. Les déficits hydriques mensuels (différence entre évapotranspiration potentielle et précipitations) sont parfois très marqués (figure 2.2). Le cumul annuel fluctue entre 400 et 700 mm (Nouy et al., 1999). Les températures moyennes annuelles enregistrées entre les années 2000 et 2010 varient entre 25 et 30°C avec des pics de 23°C et 35°C respectivement pour les températures

minimales et maximales (Dassou, 2011). Sur une grande partie de l'année (mars à novembre), la pluviosité est supérieure ou égale à la moitié de l'ETP. Selon Franquin (1969) cité par Dassou (2011), cette période est la plus humide et correspond à la période active de végétation. La réserve en eau du sol est encore supérieure à la réserve d'eau du sol au point de flétrissement permanent. Selon Aho et Kossou (1997), l'humidité relative moyenne favorable à une bonne expression du potentiel maximal de production du palmier à huile, varie entre 75 et 85 %.

On rencontre dans le département des formations végétales dominées par des savanes arborées et arbustives, des palmeraies plantées avec le matériel végétal sélectionné appelées communément "palmeraies sélectionnées", et des palmeraies issues de régénération naturelle (désignées par "palmeraies naturelles"), des jachères arbustives, des îlots de forêts semi-décidues, des galeries forestières (Djègui, 1992). Le système de cultures vivrières est caractérisé par la pratique de deux saisons culturales annuelles liées au régime des pluies. Parmi les nombreuses cultures vivrières pratiquées dans le département, la culture de maïs est dominante et se retrouve toujours en tête de rotation.

La couverture pédologique du département est constituée principalement de sols rouges ferrallitiques formés sur le Continental Terminal, de vertisols et sols à caractère vertique, de sols hydromorphes et de sols ferrugineux tropicaux (Volkoff, 1976 a ; Volkoff et Willaime, 1976 ; Agossou, 1983 ; Azontondé, 1991).

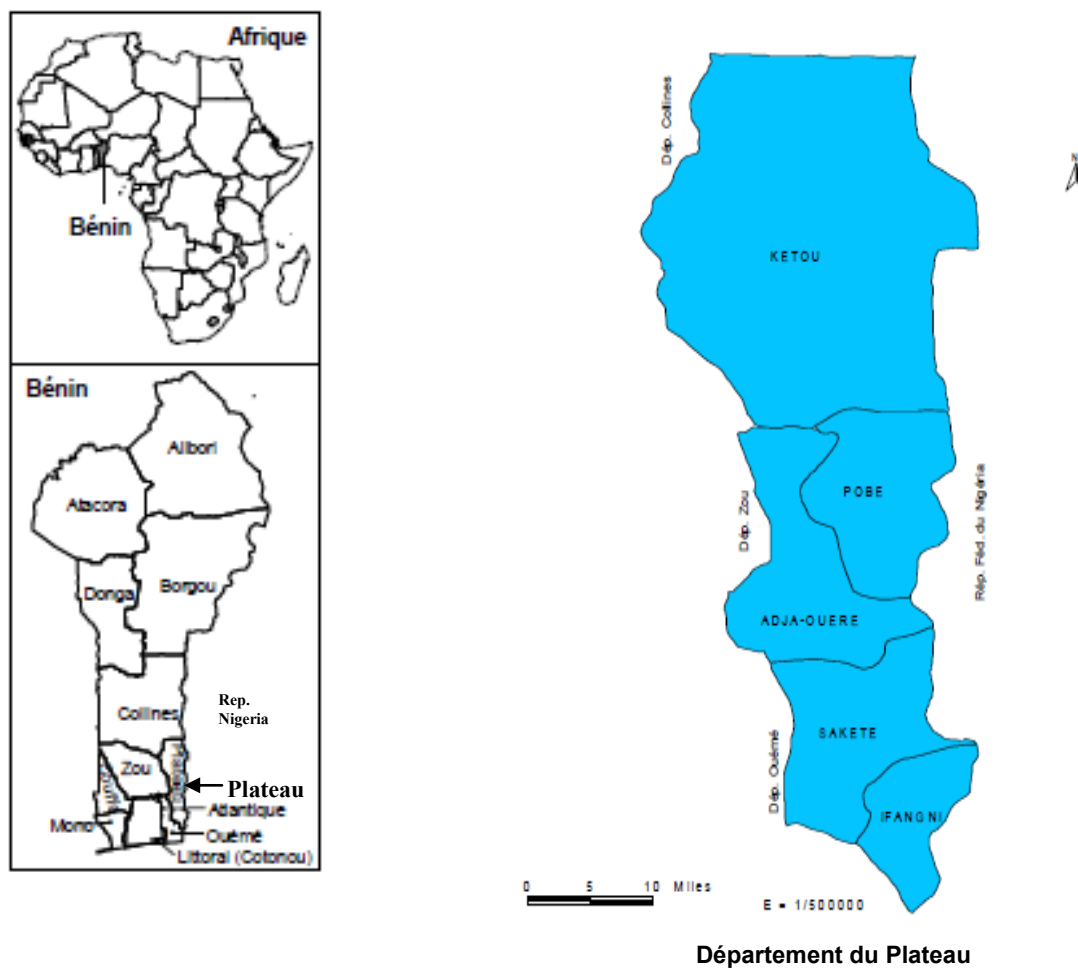


Figure 2.1. Zone d'étude

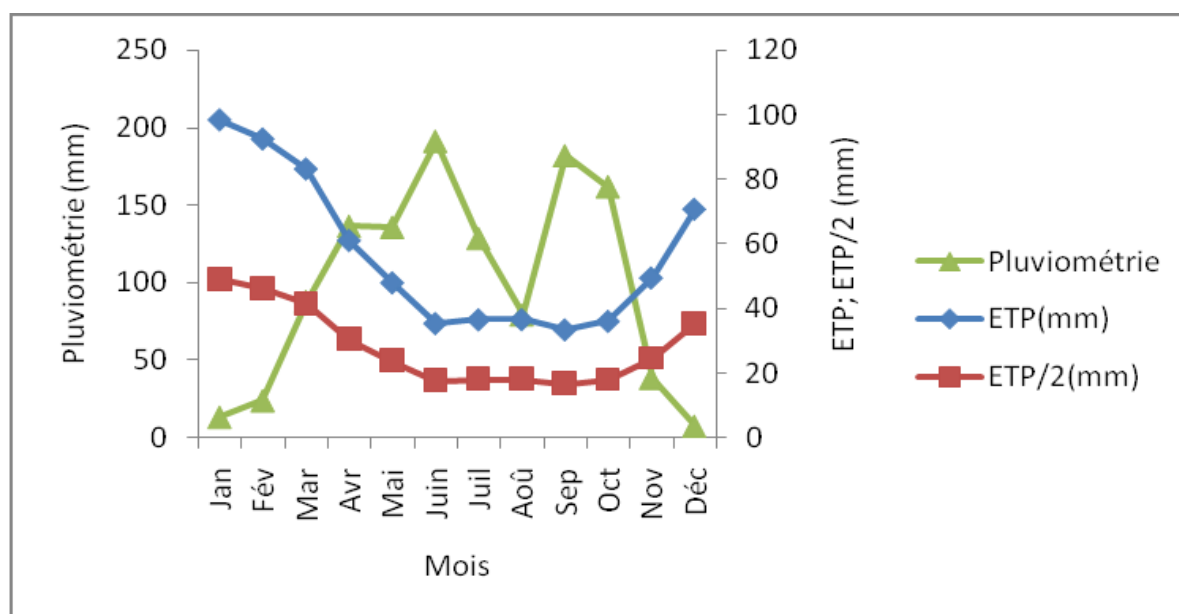


Figure 2.2. Hauteur mensuelle des pluies et évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle enregistrées dans le département du Plateau entre 2000 et 2010. Source : Dassou (2011).

2.3 Stratégie de recherche

La stratégie de recherche adoptée peut se définir à partir des étapes d'étude prévues et des méthodes à mettre en œuvre. Son élaboration tient compte des objectifs et du chronogramme.

2.3.1 Etapes d'étude

Deux grandes étapes ont été identifiées afin d'étudier les aspects agro-pédologiques et environnementaux de la gestion des feuilles d'élague dans les palmeraies villageoises du Bénin :

- Une étape exploratoire de connaissance agro-pédologique des palmeraies villageoises,
- Une étape d'investigations plus approfondies sur les compartiments sol et plante.

Ces deux étapes sont schématisées sur la figure 2.3.

Au cours de ces étapes, le choix des palmeraies a été effectué selon une approche en «pyramide inversée» portant sur un choix d'abord large de palmeraies étudiées avec une stratégie exploratoire, puis sur un choix plus réduit de palmeraies représentatives qui ont été étudiées avec des stratégies plus approfondies. Le choix des palmeraies a permis des analyses statistiques des résultats et a tenu compte des possibilités d'observation et du chronogramme de travail.

2.3.1.1 Etape 1 : Etude exploratoire de connaissance agro-pédologique des palmeraies villageoises

Pour cette étape, nous avons jugé nécessaire d'effectuer, dans une première phase, un diagnostic basé sur des enquêtes en milieu paysan. Celui-ci a été destiné à la réalisation d'une typologie des palmeraies villageoises du département du Plateau.

Ce diagnostic typologique des palmeraies villageoises du département du Plateau a été effectué sur un large nombre de palmeraies (188) dont la méthode de choix est décrite dans le chapitre 3. Il a permis d'identifier des classes d'âges, le type de sol le plus planté, les catégories de planteurs et deux modes contrastés de gestion des feuilles d'élague.

Dans une seconde phase, la typologie des palmeraies a permis de constituer une chronoséquence virtuelle avec 22 palmeraies réparties dans tout le département et situées sur le type de sol le plus planté. Ces palmeraies tiennent compte des différentes classes d'âges et des deux modes contrastés de gestion des feuilles d'élague. Dans chacune des palmeraies, 9 arbres ont été tirés au hasard sur une superficie d'un hectare pour des prélèvements de sol à 4 profondeurs (0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm). Ces 9 arbres ont été identifiés par des étiquettes afin de servir à toutes les études dans la suite des travaux de la thèse. La chronoséquence de

palmeraies a permis de préciser l'effet des deux modes de gestion des feuilles d'élagage et l'effet de l'âge des plantations à l'aide d'une première évaluation du stock de matière organique du sol sur 0-20 cm de profondeur présentée dans le chapitre 4. Cette seconde phase de l'étude exploratoire a porté uniquement sur une évaluation du sol parce que les méthodes d'étude de la plante sont assez lourdes pour la biomasse racinaire (méthode de Voronoï) et celles de la biomasse végétative aérienne, restaient à être établies. A partir des 22 palmeraies de la chronoséquence, 12 palmeraies ont été choisies pour l'étude plus approfondie des compartiments «sol et plante» mentionnée au paragraphe suivant (Etape 2).

2.3.1.2 Etape 2 : Etudes des compartiments «sol et plante» des palmeraies villageoises en fonction du mode de gestion des feuilles d'élagage

Ces études ont été conduites dans les 12 palmeraies choisies à l'issue de la seconde phase de l'étape 1. L'étude du compartiment «sol» a concerné le stock de matière organique et les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol sur 50 cm profondeur du sol (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-50 cm). Les études du compartiment «plante» ont porté d'une part sur des estimations des biomasses et minéralo-masses aériennes, et d'autre part sur le développement du système racinaire sur 1 m de profondeur du sol.

En pratique, les 12 palmeraies de l'étape 2 ont été sélectionnées comme suit : 2 modes contrastés de gestion des feuilles x 3 palmeraies x 2 classes d'âges contrastées. Les études ont porté sur les 9 arbres choisis au départ dans l'étape 1. Cependant, au cours de l'étape 2, le nombre de palmeraies et le nombre d'arbres choisis par parcelle ont varié suivant les études en fonction des objectifs, des méthodes utilisées et du chronogramme de la thèse. Ainsi, les 12 palmeraies ont été prises en compte pour les études de la biomasse aérienne et des propriétés physico-chimiques du sol. Dans ces 12 palmeraies, les 9 arbres ont été retenus par parcelle, pour les études de la biomasse aérienne alors que 6 arbres parmi les 9 arbres ont été tirés au hasard pour les études de sol.

Parmi les 12 palmeraies, 4 palmeraies de classe d'âge adulte (2 modes de gestion des feuilles x 2 palmeraies) ont été choisies pour les études racinaires de 4 arbres/parcelle, et pour une étude complémentaire sur le sol (biomasse microbienne et respiration du sol) ayant porté sur 3 arbres/parcelle. Dans ce choix raisonné de nombre de palmeraies et d'arbres par parcelle, on constate que certains arbres ont fait l'objet de tous les types d'étude, puisque les arbres ont été chaque fois tirés au hasard parmi les 9 arbres choisis au départ. Le détail des choix effectués est décrit dans la section "matériels et méthodes" des chapitres qui suivent.

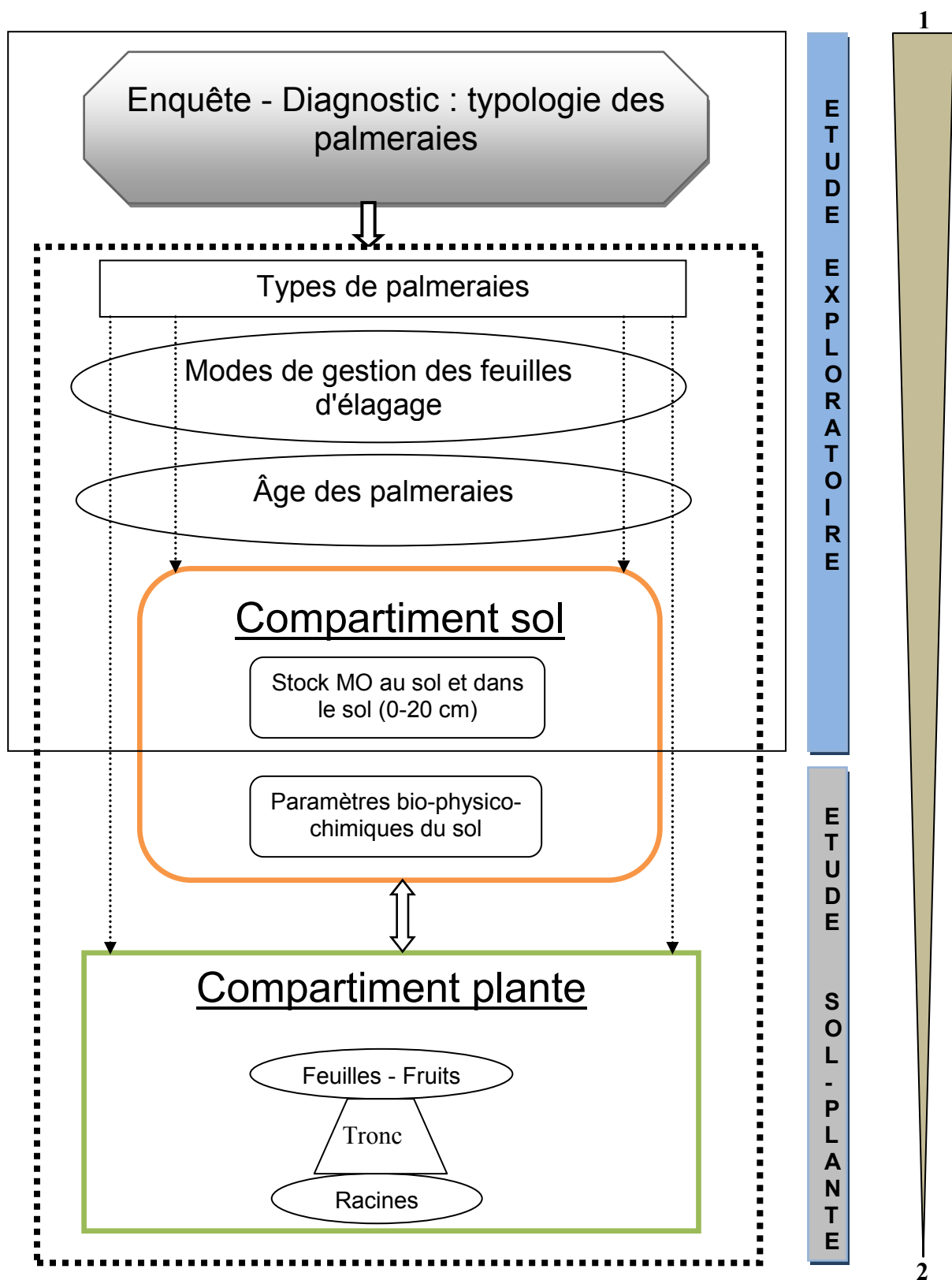


Figure 2.3. Schéma des grandes étapes de la recherche. Elle a été conduite d'un niveau d'étude large (1) à un niveau restreint en termes de situations étudiées et plus approfondie en termes de variables pris en compte pour les compartiments sol et plante (2).

2.3.2 Méthodes d'observation et de mesures mises en œuvre

Nous résumons dans les paragraphes suivants les principales méthodes mises en œuvre, sachant que celles-ci seront plus largement détaillées dans les chapitres de la deuxième et de la troisième partie de la thèse.

2.3.2.1 Méthodes d'observation et d'échantillonnage

L'évaluation du sol dans l'étude exploratoire (étape 1) a été faite par prélèvement d'échantillons de sol sous les andains de feuilles (au milieu) et dans les interlignes où les feuilles ne sont pas restituées. Des composites d'échantillons ont été constitués pour les analyses de laboratoire.

Dans le cadre de l'étude approfondie (étape 2) des compartiments sol et plante, les observations de sol et de racines ont été faites dans l'espace de Voronoï défini autour de chaque palmier choisi. Les échantillons de sol et de racines ont été prélevés dans la zone 3 simplifiée (Z3S) du triangle de Voronoï (figure 1.6), à différentes profondeurs sous andains et dans l'interligne.

Quant aux observations de la partie aérienne des palmiers, des équations allométriques ont été mises au point et appliquées sur les palmiers choisis pour l'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc des palmeraies. Des échantillons végétaux ont été prélevés sur le tronc, sur les feuilles et sur les rafles des régimes de fruits pour la détermination des teneurs en éléments minéraux conduisant au calcul de la minéralo-masse des palmeraies. Des inventaires de couronne (suivi de l'émission des inflorescences) ont été effectués périodiquement pendant 18 mois pour l'estimation de la production annuelle des palmeraies.

2.3.2.2 Méthodes d'analyse des échantillons

Les paramètres du sol ont été déterminés par prédiction avec la méthode de la spectroscopie proche infra rouge (SPIR) (Barthès et al., 2006 ; Brunet et al., 2007 ; Aholoukpè, 2009). Le principe de la SPIR consiste à acquérir au spectromètre proche infra rouge (1100 à 2500 nm) les longueurs d'onde des spectres émis par tous les échantillons. Les données spectrales sont traitées avec le logiciel WinISI III-v.1.61 ou R 2.15.2 (R development core team, 2012) pour le choix d'un lot d'échantillons représentatifs pour la calibration et la validation des modèles de prédiction à établir. Ce lot d'échantillons est analysé en laboratoire³ par les méthodes conventionnelles de détermination des paramètres physico-chimiques du sol pour l'obtention

³ Les analyses de sol par méthodes conventionnelles de laboratoire ont été faites pour partie au Bénin (granulométrie et pH) et à Montpellier (carbone, azote, cations échangeables, phosphore assimilable et CEC).

des données dites de référence. Ces dernières sont utilisées pour établir les modèles en tenant compte d'un certain nombre de variables indicatrices de la précision des modèles pour la prédiction des paramètres du sol. Les modèles sont étalonnés puis validés. La qualité de l'étalonnage est appréciée par l'erreur standard de validation croisée (SECV) (qui doit être minimale), par le coefficient de détermination R^2_{cal} entre valeurs mesurées et prédites (qui doit être maximal), et par le rapport entre écart type de la sous-population d'étalonnage et SECV, usuellement noté RPD (qui doit être maximal). La qualité de la validation des modèles est appréciée par l'erreur standard de prédiction (SEP) et par le coefficient de régression de validation (R^2_{val}) entre mesures et prédictions. Selon Chang et al. (2001), $RPD > 2 \rightarrow$ bon étalonnage ; $1,4 < RPD < 2 \rightarrow$ étalonnage moyen et $RPD < 1,4 \rightarrow$ mauvais étalonnage. La validation est considérée bonne lorsque R^2_{val} est proche de 1.

Les variables de précisions des modèles obtenus pour la prédiction des paramètres de sol sont présentées pour chaque étude à l'annexe 2.

La caractérisation bio-physique de la MOS a été faite avec les méthodes conventionnelles de fractionnement granulométrique (Feller, 1979) et d'étude de la respiration et de la biomasse microbienne dans le sol (Gorissen, 1996 ; Brookes et al., 1982).

Les échantillons de végétaux prélevés sur le tronc, les feuilles et les rafles pour la détermination de la minéralo-masse ont été analysés par méthodes conventionnelles au laboratoire d'analyse d'échantillons végétaux du Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD).

Les échantillons de racines prélevés lors de l'excavation du sol de la zone Z3S du Voronoï simplifié ont été triés en fonction du diamètre des racines, scannés, séchés et pesés pour la détermination de l'architecture et de la biomasse racinaire (Nodichao, 2008 ; Dassou, 2001).

Une détermination de la «légitimité variétale» a été faite pour les 9 arbres/parcelle choisis pour l'étude afin d'identifier leurs origines qui ont été prises en compte dans l'analyse des résultats d'étude des biomasses de la plante. A cet effet, des échantillons composites de folioles ont été constitués à partir d'une douzaine de feuilles choisies au hasard par arbre. Ces échantillons ont été broyés et analysés par des méthodes de biologie moléculaire.

2.3.2.3 Méthodes d'analyse des résultats

Des tableaux croisés dynamiques ont été réalisés et différentes analyses statistiques ont été effectuées avec les logiciels SAS[®], XLSTAT[®]. V.2011.4.02 et R 2.15.2 (R development core

team, 2012). Ces analyses ont varié suivant les études. Ainsi, selon les cas, il a été procédé au calcul de paramètres de statistique descriptive (moyenne, écart-type, coefficient de variation...), à l'analyse de variance avec l'étude des interactions entre différents facteurs, à l'analyse factorielle des correspondances multiples et à des analyses de corrélation entre les paramètres étudiés.

2.4 Conclusion du chapitre 2

On peut retenir que la stratégie que nous avons adopté s'appuie sur un choix raisonné de palmeraies selon une démarche pyramidale inversée adaptée au chronogramme de la thèse et aux possibilités effectives de mise en œuvre (en terme de temps et de moyens) des méthodes d'investigation.

Conclusion de la première partie

En conclusion à cette première partie, le contexte, la problématique de recherche et l'état des connaissances ont conduit à la formulation des hypothèses de notre étude.

Le test de ces hypothèses et l'obtention d'éléments de réponse aux questions sous-jacentes constituent les objectifs de la suite de notre travail. Ceux-ci s'appuieront sur une stratégie de recherche basée sur un choix raisonné de palmeraies selon une démarche en « pyramide inversée » et qui comprend deux grandes étapes : une étude exploratoire de connaissance globale des palmeraies villageoises du département du Plateau, puis une étude plus approfondie, effectuée dans un sous-ensemble de palmeraies choisies, sur l'effet du mode de gestion et de l'âge des palmeraies sur le sol et la plante.

Dans la partie suivante, nous présenterons les travaux menés dans le cadre de la première étape (exploratoire). La troisième partie sera consacrée aux travaux menés dans le cadre de la seconde étape.

DEUXIEME PARTIE

**Diagnostic agro-pédologique des palmeraies
villageoises : Approche régionale exploratoire**

Deuxième partie : Diagnostic agro-pédologique des palmeraies villageoises : Approche régionale exploratoire

Introduction de la deuxième partie

Conformément au plan de thèse et à la stratégie de recherche, la deuxième partie de cette thèse a été consacrée à un diagnostic destiné à caractériser la diversité des situations rencontrées. Il a permis de tester les hypothèses suivantes :

H1- Il existe dans la zone d'étude des types de palmeraies villageoises qui se distinguent par des facteurs pédologiques, agronomiques et socio-économiques.

H2.a. les modes de gestion des feuilles d'élagage affectent les stocks de la matière organique du sol selon les âges des palmeraies.

Suite à un inventaire général des palmeraies du département du Plateau, une enquête de caractérisation des palmeraies a été effectuée et a permis d'établir une typologie des palmeraies et de tester l'hypothèse H1. Les résultats de l'enquête typologique sont présentés dans le chapitre 3. Ils ont servi à identifier le type de sol le plus planté avec le palmier à huile, les âges de palmeraies et les deux modes contrastés de gestion des feuilles, qui sont des éléments pris en compte dans le chapitre 4 pour évaluer le stock de matière organique du sol des palmeraies et tester l'hypothèse H2.a.

Chapitre 3 : Typologie des palmeraies villageoises

Les travaux exploratoires ont débuté par l'acquisition de connaissances générales des palmeraies villageoises. Elle s'est faite à travers un diagnostic participatif avec les paysans qui ont contribué à l'obtention d'informations sur les caractéristiques pédologiques, agronomiques et socio-économiques de la culture du palmier à huile en milieu villageois. Ce diagnostic qui a abouti à la typologie des palmeraies villageoises a orienté la suite des travaux. Le présent chapitre a fait l'objet d'un article publié dans une revue indexée. Les références de l'article sont présentées ci-après.



Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(3): 978-999, June 2013

International Journal
of Biological and
Chemical Sciences

ISSN 1991-8631

Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Typologie des plantations villageoises de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans le département du Plateau au Bénin

H. AHOLOUKPE^{1,2,3*}, V. P. VISSOH², G. AMADJI², P. DELEPORTE³, B. DUBOS⁴,
L. NODICHAO¹, R. GLELE KAKAÏ², J.L. CHOTTE⁵ et D. BLAVET⁵

¹ Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Bénin.

² Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, BP 526 FSA/UAC, Cotonou, Bénin.

³ CIRAD, UMR Eco&Sols, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

⁴ CIRAD, UPR Systèmes de pérennes, F-34398 Montpellier, France.

⁵ IRD, UMR Eco&Sols, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

*Auteur correspondant, E-mail. aholoukpeherve@yahoo.fr; Tel : (229) 96720404.

3.1 Introduction du chapitre 3

En Afrique tropicale, l'huile de palme occupe une position prépondérante dans la production agricole, les échanges et la consommation de corps gras. Au Bénin, le palmier à huile joue un rôle économique important et est l'oléagineux le plus productif. Dans les années 1990, l'huile de palme représentait au Bénin plus de 50% de la production en huile végétale (Djégui et Daniel, 1996) et couvrait près de la moitié de la demande nationale annuelle en corps gras, soit 6 à 9 kg/habitant/an (Adjé et Adjadi, 2001; Fournier et al., 2001).

En raison de l'importance du palmier à huile dans l'économie et la sécurité alimentaire des familles rurales (Adjadi, 2008 ; MAEP, 2009), on assiste de nos jours à une forte expansion des palmeraies villageoises au Bénin. Ces palmeraies sont qualifiées de «villageoises» par opposition aux palmeraies industrielles (Rafflegeau, 2008). L'organisation de la filière du palmier à huile sélectionné au Bénin a connu de grandes étapes historiques. Le programme de plantation à grande échelle a été lancé par l'Etat colonial dans les années 1950, puis renforcé après l'indépendance (1960) par l'Etat béninois (Fournier et al., 2002). Mais ce programme a connu par la suite des difficultés qui ont entraîné une baisse de la production d'huile de palme pour deux raisons : la baisse de la pluviométrie et la fluctuation des cours mondiaux des corps gras caractérisé par la concurrence des pays producteurs des zones écologiquement plus favorables (Fournier et al., 2002). L'Etat béninois a donc procédé à une réorganisation de la filière en installant de grandes plantations de taille supérieure à 500 ha, gérées par des coopératives d'aménagement rural (CAR) et alimentant des unités industrielles de traitement des régimes de palme (Adjadi, 2008). A partir des années 1990, un projet financé par l'Union Européenne et l'Etat béninois a contribué à une large diffusion en milieu villageois du matériel végétal sélectionné par la recherche agronomique. Ce projet s'est appuyé sur les structures de recherche [station de Pobè : Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP)] et de développement agricoles [Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural (CARDER)] dont les rôles fondamentaux ont été la fourniture de matériel végétal sélectionné et la formation des producteurs (Adjé et Adjadi, 2001). Dès lors, on note un engouement des petits paysans pour la production du palmier à huile (Follin, 2000), et la superficie des palmeraies villageoises est passée de 383 ha en 1992 à plus de 15 000 ha en 2008 (Adjadi, 2008). Les plus importantes superficies (plus de 9 000 ha entre 2006 et 2012) de terres cultivées avec le matériel végétal sélectionné du palmier à huile se retrouvent dans les départements de l'Ouémé et du Plateau au Sud-est du pays (Adjadi, 2012).

Bien que plantées avec la même densité de palmiers sélectionnés, les palmeraies villageoises béninoises s'écartent des modèles agro-industriels en raison de la diversité des systèmes culturels pratiqués : diverses associations de cultures vivrières, divers modes de fertilisation et de gestion des feuilles élaguées....

Cette diversité des pratiques culturelles nous a amené à proposer une étude agro-pédologique des palmeraies villageoises dont la première étape a été d'établir leur typologie. Selon Perrot et Landais (1993), face à l'extrême diversité des situations à décrire, les typologies ont l'ambition de constituer un jeu de types qui simplifie la réalité tout en respectant les particularités principales. Les typologies d'exploitations agricoles permettent de définir des groupes cibles d'exploitations, de comparer ces exploitations et de juger de leur fonctionnement, pour des interventions efficaces (Mbetid-Bessane et al., 2002). Elles ont pour objectif de fournir à l'usage des décideurs une image de l'activité agricole locale pour orienter les actions de développement (Arbelot et al., 1997).

L'objectif de ce travail est d'établir la typologie des palmeraies villageoises afin de proposer aux acteurs de la recherche et du développement agricole, un outil d'aide à la décision et de choix raisonné de palmeraies pour des actions en milieu paysan.

3.2 Matériels et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude est le département du Plateau situé au sud-est du Bénin (figure 3.1). Il est composé de cinq (5) communes : Kétou, Pobè, Adja-Ouèrè, Sakété et Ifangni. La pluviométrie annuelle moyenne dans la zone est de 1300 mm ; elle présente une répartition de type bimodal caractéristique du climat subéquatorial avec des déficits hydriques très marqués en saison sèche (Azontondé, 1991 ; Nouy et al., 1999). La végétation est dominée par des savanes arborées et arbustives, des palmeraies plantées avec le matériel végétal sélectionné appelées communément "palmeraies sélectionnées", et des palmeraies issues de régénération naturelle (désignées par "palmeraies naturelles"), des jachères arbustives, des îlots de forêts semi-décidues, des galeries forestières et des mangroves (Djègui, 1992 ; CBD, 2001).

La couverture pédologique est constituée principalement de sols rouges ferrallitiques formés sur le Continental Terminal, de vertisols et sols à caractère vertique, de sols hydromorphes et de sols ferrugineux tropicaux (Volkoff, 1976 a ; Volkoff et Willaime, 1976 ; Agossou, 1983 ; Azontondé, 1991).

Collecte de données

Les grandes étapes de cette partie sont présentées sur la figure 3.2.

Phase préparatoire

Une recherche documentaire a permis de connaître les organisations des producteurs de palmier à huile au sein des villages, communes et départements. Le traitement des cartes administrative, topographique, pédologique et de couverture du sol (IGN, 1968 ; Volkoff, 1976 b ; CENATEL, 2009) a abouti à la création d'un système d'information géographique, en utilisant le logiciel Quantum GIS version 1.8.0 (Quantum GIS Development Team, 2013).

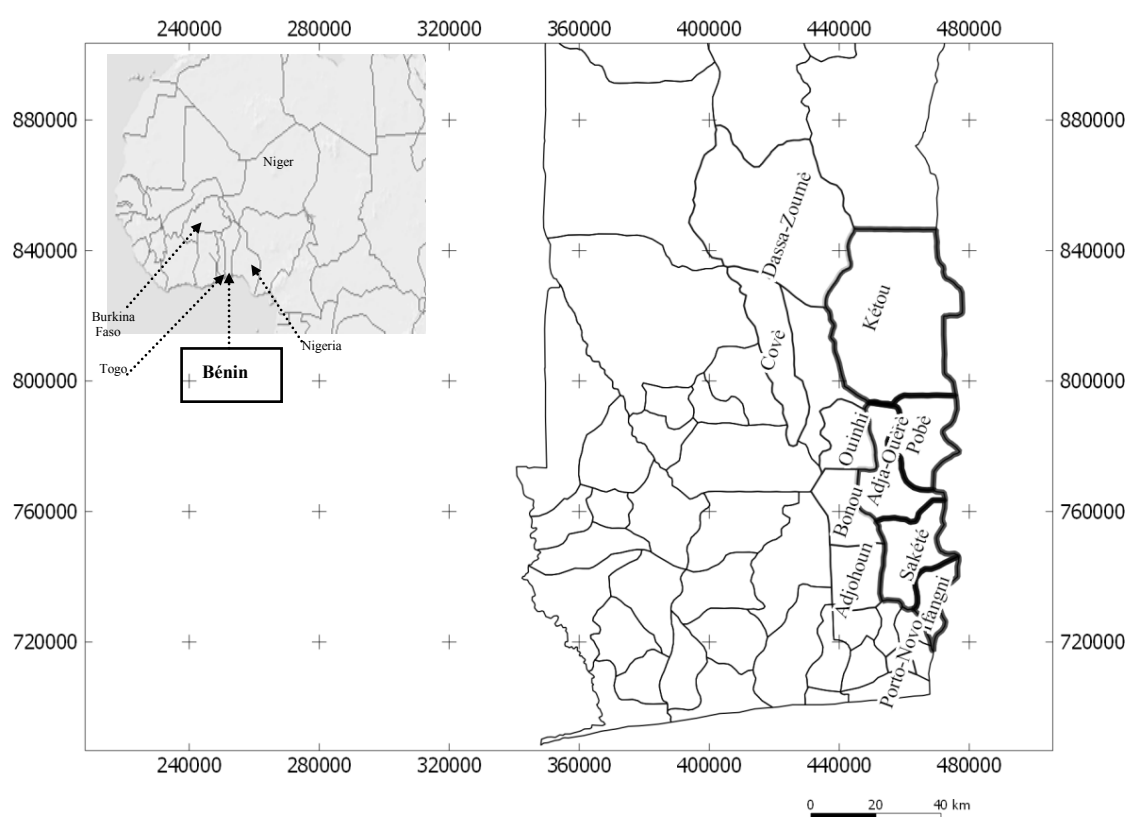


Figure 3.1. Localisation géographique de la zone d'étude. Les communes à contour gras désignent les 5 communes de la zone d'étude (Département du Plateau).

Une enquête institutionnelle a été réalisée auprès des organisations villageoises, communales et régionales de planteurs, du Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural (CARDER) et de la station de recherche sur le palmier à huile dénommée Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP) de Pobè. Pour identifier l'importance relative des communes en matière de culture du palmier à huile sélectionné, un recensement

des producteurs de chaque commune a été fait et complété par les superficies plantées et les villages de rattachement en utilisant les informations collectées dans la phase préparatoire.

Phase de terrain

La collecte des données a été faite à deux échelles correspondant à deux niveaux de typologie des palmeraies villageoises : (i) typologie globale des palmeraies sélectionnées du département du plateau et (ii) typologie spécifique des palmeraies sélectionnées installées sur le type de sol le plus planté (TSPP).

Le choix des variables ayant servi à ces deux niveaux de typologie s'est basé sur les concepts et les théories de Smith et al. (2004) et de Kossoumna Liba'a et Havard (2006) qui considèrent que les variables d'une étude de typologie des agrosystèmes peuvent être de nature sociologique, climatique, agronomique, économique.

- Typologie globale des palmeraies sélectionnées

En tenant compte des informations collectées lors de la phase préparatoire, qui montrent l'inexistence de la production du palmier à huile dans la commune de Kétou, la typologie globale s'est focalisée sur les communes d'Adja-Ouèrè, de Sakété, de Pobè et d'Ifangni. A partir de la liste des producteurs recensés, un groupe de 20 personnes a été sélectionné de façon aléatoire par commune pour l'enquête. Ce groupe comprend de simples producteurs, de personnes détenant des informations fiables sur la commune (personnes ressources), et parfois de membres du bureau de l'union communale des producteurs de palmier à huile (UCPPH). Des entretiens semi-structurés ont été effectués en assemblée générale avec chaque groupe et des variables accessibles à cette échelle globale ont été collectées : les types de sol, l'origine des plants sélectionnés, les superficies plantées, les passés culturels des plantations et les pratiques culturelles appliquées dans les palmeraies. Ces informations ont été utilisées pour établir la typologie globale.

- Typologie spécifique des palmeraies sélectionnées installées sur le type de sol le plus planté (TSPP)

Pour des raisons logistiques et du fait de la localisation de la station de recherche, l'enquête individuelle auprès des propriétaires de palmeraies se trouvant sur le TSPP s'est déroulée dans les communes d'Adja-Ouèrè, de Sakété et de Pobè où est localisée la station de recherche. Ces palmeraies forment une population N de 299 planteurs. En tenant compte des informations collectées en assemblée générale et relatives aux techniques culturelles de gestion des sols dans les palmeraies, une enquête sommaire a permis d'avoir la population p d'individus qui appliquent au moins une technique culturelle non pratiquée dans toutes les palmeraies.

L'échantillon n de producteurs enquêtés sur le TSPP a été déterminé selon l'équation de distribution binomiale (Dagnelie, 1998) ci-après.

$$n = \frac{U_{1-\alpha/2}^2 \times p(1-p)}{d^2}$$

n = taille de l'échantillon ; $U_{1-\alpha/2}$ est la valeur de la variable normale aléatoire ; pour une valeur de probabilité de $\alpha = 0,05$; $U_{1-\alpha/2} = 1,96$; p représente la proportion d'individus qui appliquent au moins une technique culturale non commune à toutes les palmeraies ; d est l'erreur marginale fixée à 10%. On obtient n = 88,5 arrondi à 90 producteurs choisis de façon aléatoire parmi la population N. Etant donné que certains producteurs disposent de plusieurs plantations, les informations ont été collectées pour un total de 188 palmeraies sur le TSPP.

Des entretiens semi-structurés ont été effectués individuellement avec les 90 producteurs pour établir la typologie spécifique des palmeraies se trouvant sur le TSPP. Les informations collectées en assemblée générale, notamment sur la taille des exploitations et les techniques culturales pratiquées, ont permis de définir les variables étudiées sur le TSPP. Ces variables sont : l'âge des palmeraies, la superficie, le passé culturel, et les pratiques culturales dont en particulier les associations de cultures vivrières, la fertilisation et les modes de gestion des feuilles d'égavage des palmiers. L'enquête individuelle a renseigné ces variables et des visites de champs ont été effectuées pour vérifier les informations fournies.

Analyse des données

Les informations collectées au cours des phases d'enquête institutionnelle et en assemblée générale ont été utilisées pour une analyse descriptive. Selon la nature de certaines informations, l'analyse a été participative avec les producteurs qui ont apprécié et pondéré certaines caractéristiques des palmeraies. Quant aux données collectées auprès des 90 producteurs sur les 188 palmeraies du TSPP, elles sont à la fois quantitatives et qualitatives et ont été codifiées et saisies dans le logiciel Microsoft Excel[®] 2007. Les superficies plantées ont été calculées pour chacun de ces producteurs et ont permis d'identifier les catégories de producteurs se trouvant sur le TSPP. Ces catégories ont été ajoutées aux variables collectées à l'échelle du TSPP afin de réaliser une analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) pour une description des relations entre les modalités des variables. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT[®]. V.2011.4.02.

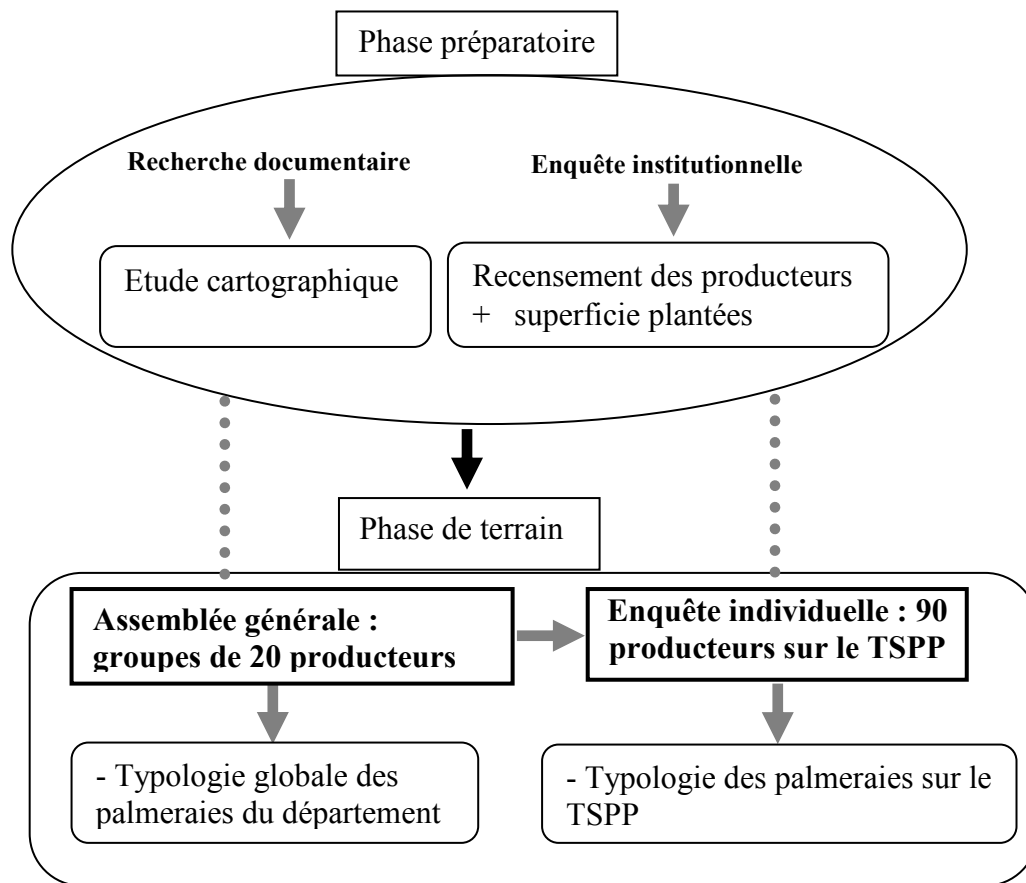


Figure 3.2. Les grandes étapes de la collecte des données. TSPP indique le type de sol le plus planté avec le palmier à huile.

3.3 Résultats

Classes de sols et importance des palmeraies

La couverture pédologique du département du Plateau est composée de quatre grandes classes de sols : les sols hydromorphes, les vertisols, les sols ferrugineux tropicaux et les sols ferrallitiques faiblement désaturés. Dans la commune de Kétou, on rencontre plus fréquemment les sols ferrugineux tropicaux appauvris sans concrétions sur granite calco-alcalin à biotite, et à concrétions sur embrèchite et granite. On y rencontre également dans cette commune les sols ferrallitiques à faciès induré sur grès du crétacé.

Le tableau 3.1 présente les superficies des différentes classes et sous-classes de sols rencontrés dans le département.

On constate sur les figures 3.3 que dans l'ensemble des quatre autres communes, ce sont les sols ferrallitiques qui dominent. Ces sols représentent 65% de la couverture pédologique du département. Les terres de barre (sols ferrallitiques formés sur sédiment meuble argilo-sableux du Continental Terminal) constituent la sous-classe dominante (49%) des sols

ferrallitiques. Elles représentent le type de sol le plus planté (TSPP) avec le palmier à huile dans le département du Plateau et couvrent majoritairement les communes de Sakété, d'Ifangni et d'Adja-Ouèrè.

L'étude a révélé que la culture du palmier à huile sélectionné se fait essentiellement dans les communes d'Adja-Ouèrè, de Pobè, de Sakété et d'Ifangni. Soixante-trois (63) planteurs ont été dénombrés dans la commune de Pobè, 81 planteurs dans Ifangni, 272 planteurs dans Adja-Ouèrè et 196 planteurs dans Sakété.

Caractéristiques générales des plantations de palmier à huile sélectionné

Matériel végétal et création des plantations

Les palmiers sélectionnés proviennent du CRA-PP ou des pépinières agréées par la station. Il s'agit systématiquement de matériel végétal sélectionné représenté par différentes catégories de variétés issues de l'amélioration de l'hybride *tenera* qui provient du croisement entre *dura* et *pisifera*. Ces catégories de variétés améliorées ont des origines génétiques Déli x La Mé ou Déli x Yangambi⁴.

La plantation se fait généralement pendant les trois premiers mois de la grande saison des pluies, d'avril à juin. Les plantations villageoises de palmier à huile sélectionné sont installées suivant le dispositif des plantations industrielles, en triangles équilatéraux de 9 m de côté, soit une densité de plantation de 143 arbres à l'hectare. Les planteurs ajoutent parfois quelques plants en bordure du champ, ce qui porte la densité à environ 150 plants à l'hectare.

⁴ Déli (Indonésie), La Mé (Côte d'Ivoire) et Yangambi (Congo) désignent les régions d'origine des parents des hybrides.

Tableau 3.1. Types de sols, leur superficie (S) et pourcentage (%S) dans le département du Plateau

Code	Nom	S (ha)	% S
Ferra_1	Sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, hydromorphes, sur sédiment argileux du Continental Terminal	13663	3,96
Ferra_2	Sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, modaux, sur grès et matériau colluvial	45125	13,06
Ferra_3	Sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, modaux, sur matériau argilo-sableux remanié et grès du crétacé	38178	11,05
Ferra_4 "terre de barre"	Sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, modaux, sur sédiment meuble argilo du Continental Terminal	96495	27,93
Ferra_5	Sols ferrallitiques faiblement désaturés, appauvris, facies indure, sur grès et sédiment argilo	31405	9,09
Ferru_1	Sols à sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, appauvris, sans concrétions, sur granite calco-alkalin à biotite	12738	3,69
Ferru_2	Sols à sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, lessives, sans concrétions, sur granite acide	11757	3,40
Ferru_3	Sols a sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, lessives, hydromorphes, sur embrêchite et granite	2275	0,66
Ferru_4	Sols à sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, lessives, a concrétions, sur embrêchite porphyroïde à ferro-magnésiens et granite	2404	0,70
Ferru_5	Sols à sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, appauvris, peu ferrugineux, sur embrêchite et granite	30030	8,69
Ferru_6	Sols a sesquioxides de fer et de manganèse ferrugineux tropicaux, lessives, hydromorphes, sur matériau colluvial sableux et sablo-argileux	16346	4,73
Hydro_1	Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères, à gley, de profondeur, sur matériau alluvial argileux	1194	0,35
Hydro_2	Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères, à pseudo-gley, à taches et concrétions, sur sable et sable sur argile	2458	0,71
Hydro_3	Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères, à gley, de profondeur, sur matériau alluvio-colluvial	1100	0,32
Hydro_4	Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères, à pseudo-gley, à taches et concrétions, sur matériau alluvial argileux et sédiment argileux du Paléocène	321	0,09
Hydro_5	Sols hydromorphes moyennement organiques, humiques à gley, non sales a anmoor acide, sur matériau alluvial deltaïque	5919	1,71
Verti	Vertisols topomorphes, non grumosoliques, hydromorphes, sur argile sédimentaire	34046	9,86
Total		345 453	100

Source : Volkoff et Willaime, 1976 ; travaux de numérisation et de géoréférencement des cartes de sol (thèse d'Hervé Aholoukpè).

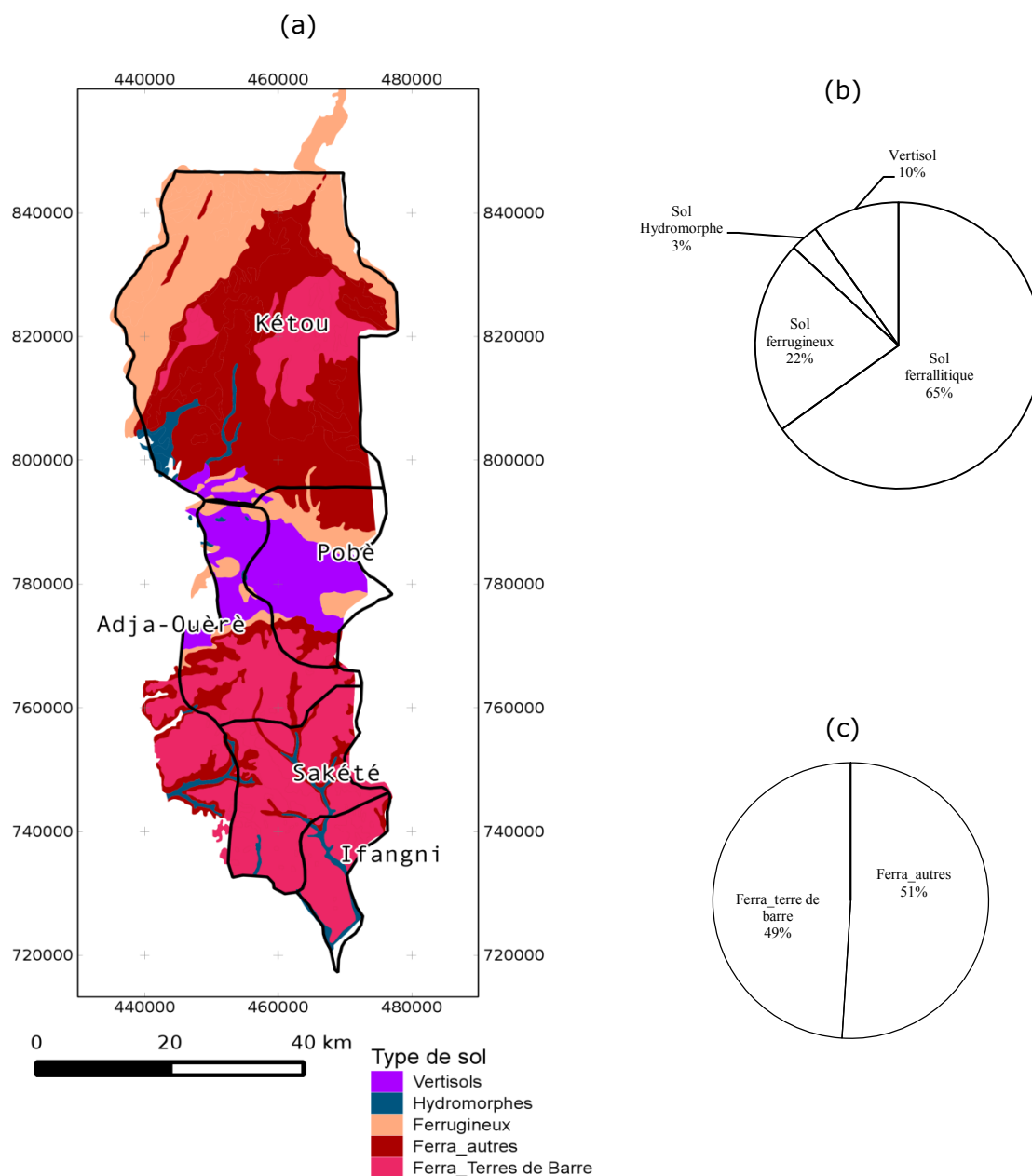


Figure 3.3 : Les différents types de sol dans le département (a), leurs proportions (b), et la proportion des terres de barre parmi les sols ferrallitiques (c). Ferra-Terres de barre désigne la sous classe de sols ferrallitiques sur continental terminal Ferra-autres désigne les autres sous-classes de sols ferrallitiques.

Source : travaux de numérisation et de géoréférencement des cartes de sol (thèse d'Hervé Aholoukpè)

Taille et âge des exploitations

Les producteurs ont défini trois catégories de planteurs en fonction de leurs superficies plantées (SP) : les petits planteurs : $SP < 10$ ha ; les planteurs moyens : $SP = 10$ à 30 ha ; et les grands producteurs : $SP > 30$ ha.

Les premières récoltes de régimes interviennent entre 4 et 5 ans et l'exploitation est conduite pendant au moins 25 ans avant une éventuelle replantation par le paysan. Au cours de ce cycle, le développement de la plante et le mode de récolte de régimes permettent de distinguer différents stades végétatifs. Les paysans ont défini 4 classes d'âges de palmeraies en fonction du rendement en régimes par arbre et des outils de récolte (ciseaux, hache et faucille). Des observations de terrain effectuées au cours de cette étude, ont complété la perception paysanne et ont permis de présenter dans le tableau 3.2 les quatre classes d'âges qui distinguent l'état végétatif des palmiers, le rendement en fruits et les modes de récolte.

Passé cultural et techniques culturelles dans les palmeraies villageoises

Il faut distinguer le passé cultural des palmeraies et les techniques culturelles pratiquées dans la plantation.

Typologie selon le passé cultural

Les passés culturels des palmeraies villageoises sont présentés dans le tableau 3.3. On distingue deux sortes de palmeraies : les palmeraies de type extension (ou premier cycle) qui n'ont pas été créées après une palmeraie existante (sélectionnée ou de régénération naturelle), par opposition aux palmeraies de type replantation. Exceptionnellement, les palmeraies sur d'anciennes jachères abritant quelques rares palmiers naturels ont été considérées comme des extensions. Aux dires des paysans un faible nombre de palmeraies sont en replantation dans la région d'étude.

Tableau 3.2. Principales phases de développement des palmeraies et leurs caractéristiques selon la perception paysanne.

Ages (ans)	Type de plantation	Etat végétatif de la plantation	Mode de récolte
0 – 6	Jeune	Installation végétative du plant ; colonisation progressive du milieu par le système racinaire ; première production de régimes ; arrêt de cultures intercalaires entre 4 et 5 ans.	Récolte au ciseau
7 – 12	Pré-adulte	Canopée non fermée ; présence de recrûs ligneux sous palmeraie ; rendement en augmentation.	Récolte à la hache.
13 – 24	Adulte	Canopée fermée ; moins de luminosité ; régression des recrûs ; rendement maximum vers 15 ans.	Récolte à la faucille ou à la hache en grimpant dans l'arbre avec un cerceau.
≥ 25	Vieux	Eclaircissement de la canopée ; augmentation des recrûs ; rendement en baisse ; perte des bases pétiolaires du stipe.	Récolte à la faucille ou à la hache en grimpant dans l'arbre avec un cerceau.

Tableau 3.3. Types de palmeraies selon le passé culturel

Palmeraie de type extension				Palmeraie de type replantation		
Passé culturel				Passé culturel		
Ancienne jachère arborée ou forêt secondaire	Ancienne jachère arborée avec quelques rares palmiers naturels	Champ de cultures vivrières (maïs, niébé, arachide, manioc, tomate, piment...)	Champ de cultures vivrières et quelques pieds de palmiers naturels	Palmeraie sélectionnée de densité 143 arbres/ha	Palmeraie naturelle* à densité réduite (80 à 100 arbres/ha) + association permanente de cultures vivrières	Palmeraie naturelle en culture pure de densité 143 arbres/ha

* Palmeraie naturelle désigne une plantation de palmiers à huile issus de régénération naturelle et dont les fruits sont ramassés par les producteurs pour servir de semences aux nouvelles plantations.

Typologie selon les techniques culturales dans les palmeraies

Deux types de techniques culturales caractérisent les plantations villageoises de la zone d'étude : les techniques d'entretien de la plantation et celles de gestion du sol.

- les techniques d'entretien consistent généralement à l'ablation des fleurs au jeune âge (de 18 à 36 mois), au fauchage des recrûs des interlignes de plantation après arrêt des cultures

intercalaires (une à deux fois par an) et l'élagage annuel des feuilles non fonctionnelles des palmiers.

- quant aux techniques de gestion du sol elles sont caractérisées par une association systématique des cultures vivrières (maïs, tomate, niébé, arachide, manioc, piment, patate douce...) jusqu'à 4 - 5 ans d'âge des palmiers, un apport occasionnel d'engrais NKP, KCl et urée et une fertilisation organique par restitution ou non des sous-produits d'usinage des fruits de palmier et des feuilles d'élagage. Dans la palmeraie, les apports d'engrais se font dans l'espace circulaire appelé "rond" aménagé autour du tronc du palmier. Les observations de terrain ont montré que le diamètre du rond en plantation villageoise varie de 0,5 m au jeune âge à 1,5 m à l'âge adulte des palmiers.

Les planteurs disposant d'unités de transformation des fruits ont déclaré restituer les sous-produits d'usinage (rafles, tourteaux...) dans les palmeraies.

La fertilisation chimique du palmier à huile se fait de façon très irrégulière et les formes et doses d'engrais ne sont pas respectées dans la plupart des cas. Le tableau 3.4 présente les doses d'engrais recommandées par la station de recherche sur le palmier à huile et celles appliquées par la majorité des producteurs qui font l'effort d'un apport de fumures minérales aux palmiers. D'une façon générale, les doses apportées par les paysans sont inférieures aux prescriptions de la recherche. De plus, les paysans ne respectent pas les périodes d'apport recommandées. L'apport d'azote sous forme d'urée est privilégié au jeune âge. Les paysans ont affirmé que l'urée constitue parfois le seul type d'engrais appliqué jusqu'à l'entrée en récolte. Après 5 ans, ils privilégient l'apport du KCl ou du NPK et y associent parfois l'urée. Les doses d'engrais appliquées par les paysans sont fonction de la disponibilité des engrais et des moyens financiers dont dispose le producteur.

L'enquête a permis d'identifier 5 modes de gestion des feuilles d'élagage dans les palmeraies villageoises qui sont présentés dans le tableau 3.5. On constate que la gestion des feuilles d'élagage va du mode de restitution nulle à celui de la restitution totale. Dans le cas des modes de restitution, les feuilles peuvent être rangées en andain entre deux arbres sur la ligne de plantation ou disposées en vrac dans la palmeraie. La photo 1 illustre le mode de restitution des feuilles en andain dans une palmeraie.

Tableau 3.4. Doses de fumures recommandées par le CRAPP de Pobè sur le palmier à huile et celles appliquées par les paysans

Engrais	Dose	An 0	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5
Urée (g/plant)	R	150 (1 ^{er} apport) + 200 (2 ^e apport)	200 (1 ^{er} apport) + 200 (2 ^e apport)	250 (1 ^{er} apport) + 250 (2 ^e apport)	500	500	Selon DF ou apport de 750g à 1000g
	P	0	300	300	250	250	250
Chlorure de potassium (g/plant)	R	200	200	500	500	500	Selon DF ou apport de 500g à 750g
	P	0	0	250	250	450	500

R = doses recommandées par le Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRAPP)

P = dose appliquée par les paysans

DF = diagnostic foliaire réalisé par détermination chimique des teneurs foliaires en N, P, K, Ca et Mg.



Andain de feuilles de palmiers

Photo 3.1 : Dispositif de restitution en andain des feuilles dans une palmeraie en station (Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes) au Bénin.

Tableau 3.5. Modes de restitution des feuilles d'élagage des palmiers

Mode de gestion des feuilles d'élagage	Code mnémo	Description
Restitution totale en andain (exportation quasi-nulle)	RTA	Retour de presque toutes les feuilles d'élagage au sol ; elles sont rangées en andain, sur la ligne de plantation (Photo ci-après). Très peu de feuilles sont collectées par les paysans.
Restitution totale en vrac (exportation quasi- nulle)	RTV	Retour des feuilles d'élagage au sol sans dispositif particulier (au hasard sur toute la surface). Très peu de feuilles sont collectées par les paysans.
Restitution partielle en andain (exportation partielle)	RPA	Retour des feuilles d'élagage au sol et rangées en andain. Une partie de ces feuilles sont prélevées par les villageois pour usage domestique (bois de feu).
Restitution partielle en vrac (exportation partielle)	RPV	Retour des feuilles d'élagage au sol sans dispositif particulier (au hasard sur toute la surface). Une partie de ces feuilles sont prélevées par les villageois pour usage domestique.
Restitution nulle (exportation totale)	RN	Toutes les feuilles sont ramassées par les villageois pour des usages domestiques.

Caractéristiques des palmeraies plantées sur les terres de barre

Les proportions des catégories de producteurs sont présentées en figure 3.4 qui montre que les producteurs de la zone d'étude sont majoritairement (93%) des petits planteurs (SP < 10 ha).

Les caractéristiques des 188 palmeraies étudiées sur terre de barre dans les communes de Pobè, Adja-Ouéré et Sakété, et les proportions de leurs modalités sont présentées dans le tableau 3.6. Les enseignements tirés sont les suivants :

Les palmeraies sont majoritairement localisées dans les communes d'Adja-Ouéré et de Sakété. Elles sont pour la plupart de type extension et les cultures vivrières dominent dans leur passé cultural ;

- 67% des palmeraies sont d'âges supérieurs à 7 ans et font l'objet de différents modes de gestion des feuilles d'élagage ;
- 65% des palmeraies ont été ou sont associées au jeune âge à diverses cultures vivrières ;

- 87% des palmeraies sont peu ou pas (20,5%) fertilisées et dans 2/5 ième des cas, les engrais utilisés ne sont pas ceux recommandés par la recherche ;
- la fertilisation organique est très peu pratiquée et les feuilles d'élague sont exportées (totalement ou partiellement) dans plus de 80% des cas.

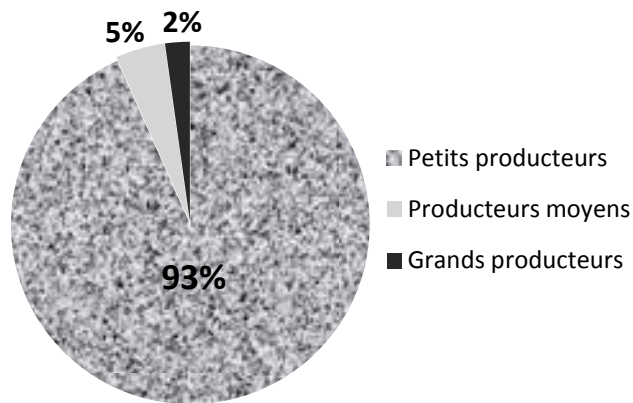


Figure 3.4 : Proportion relative des types de producteurs de palmier à huile sélectionné installé sur terres de barre. Typologie établie selon les superficies plantées, nombre de producteurs = 90. Petits producteurs : superficie totale plantée < 10 ha ; producteurs moyens : 10 ha < superficie totale plantée < 30 ha ; grands producteurs : superficie totale plantée ≥ 30 ha.

Tableau 3.6. Caractéristiques des palmeraies sur terre de barre

Variable	Modalités	Code AFCM	Pourcent age (%)
Localisation parcelle	Adja-Ouèrè		51,1
	Pobè		7,4
	Sakété		41,5
Age (an)	< 4	Age1	12,8
	4-6	Age2	20,2
	7-12	Age3	39,4
	13-20	Age4	21,8
	> 20	Age5	5,9
Superficie (ha)	< 1	Sup1	11,7
	1-5	Sup2	71,3
	5-10	Sup3	9,6
	>10	Sup4	7,5
Passé cultural (palmeraie en replantation)	Diverses cultures vivrières+ rares palmiers naturels	Pascult1	5,9
	Palmeraie naturelle	Pascult2	1,6
	Palmeraie sélectionnée	Pascult3	1,6
Passé cultural (palmeraie en extension)	Diverses cultures vivrières+ rares palmiers naturels	Pascult4	14,9
	Diverses cultures vivrières	Pascult5	17,6
	Maïs, manioc	Pascult6	20,8
	Maïs	Pascult7	4,3
	Maïs, légumineuse	Pascult8	1,1
	Jachère à palmiers naturels d'au moins 10 ans	Pascult9	3,7
	Jachère arborée	Pascult10	28,7
Association cultures vivrières au jeune âge de plantation	Toutes cultures vivrières	AssoCv1	63,8
	Maïs, manioc	AssoCv2	23,9
	Maïs seul	AssoCv3	8,5
	Maïs, légumineuse	AssoCv4	3,7
Apport de rafles	Non	Aprafl0	89,4
	Oui	Aprafl1	10,7
Apport sous-produits de transformation	Non	Apdu0	89,9
	Oui	Apdu1	10,1
Gestion feuilles d'élagage	Restitution nulle (RN)	Gfeuil1	54,3
	Restitution partielle en vrac (RPV)	Gfeuil2	20,8
	Restitution partielle en andain (RPA)	Gfeuil3	11,2
	Restitution totale en vrac (RTV)	Gfeuil4	0,5
	Restitution totale en andain (RTA)	Gfeuil5	13,3
Type fumure minérale	Non recommandé	Tfum0	41,5
	Recommandé	Tfum1	58,5
Dose fumure minérale	Non recommandé	Dfum0	72,9
	Recommandé	Dfum1	27,1
Application fumure minérale	Sans apport	Applfum0	20,7
	Apport irrégulier	Applfum1	66,5
	Apport régulier	Applfum2	12,8

Age = classe d'âge; Sup = superficie; Pascult = passé cultural; AssoCv = association de cultures vivrières; Aprafl = apport de rafles dans les ronds; Apdu = apport sous-produits de transformation; Gfeuil = mode de gestion des feuilles d'élagage; Tfum = type de fumure; Dfum = dose de fumure; Applfum = régularité d'application de fumure; Catprod = catégorie de producteur

La figure 3.5 tirée de l'analyse factorielle des correspondances multiples, permet de distinguer 4 groupes de palmeraies qui sont caractérisés par des variables ayant des relations entre elles. Le tableau 3.7 présente quelques caractéristiques de ces groupes de palmeraies qui sont : les types de planteurs appartenant à chaque groupe, les âges des palmeraies et leur superficie, puis les modes de fertilisation minérale et de gestion des feuilles.

Tableau 3.7 : Quelques caractéristiques des groupes palmeraies sur terre de barre

Groupe de palmeraies	Types de planteurs	Gestion des feuilles d'élague	Fertilisation	Age palmeraie	Pourcentage palmeraies (%)	Superficie totale (ha)	Pourcentage superficie (%)
Groupe 1	Grands producteurs	- Restitution totale en andain - Restitution partielle en andain	Doses recommandées de fumures	Majoritairement adultes (13-20 ans)	13	324	49
Groupe 2	Petits planteurs	- Restitution nulle	Doses non recommandées de fumures	Jeune (4-6 ans) et préadulte (7- 12ans)	67	208	31
Groupe 3	Petits et moyens producteurs + quelques grands producteurs	-	Doses recommandées de fumures	Jeune 0 - 4ans et adulte (13-20 ans)	13	76	12
Groupe 4	Petits et moyens producteurs	- Restitution totale et partielle en vrac	Pas d'apport ou apport irrégulier de fumures	-	7	54	8

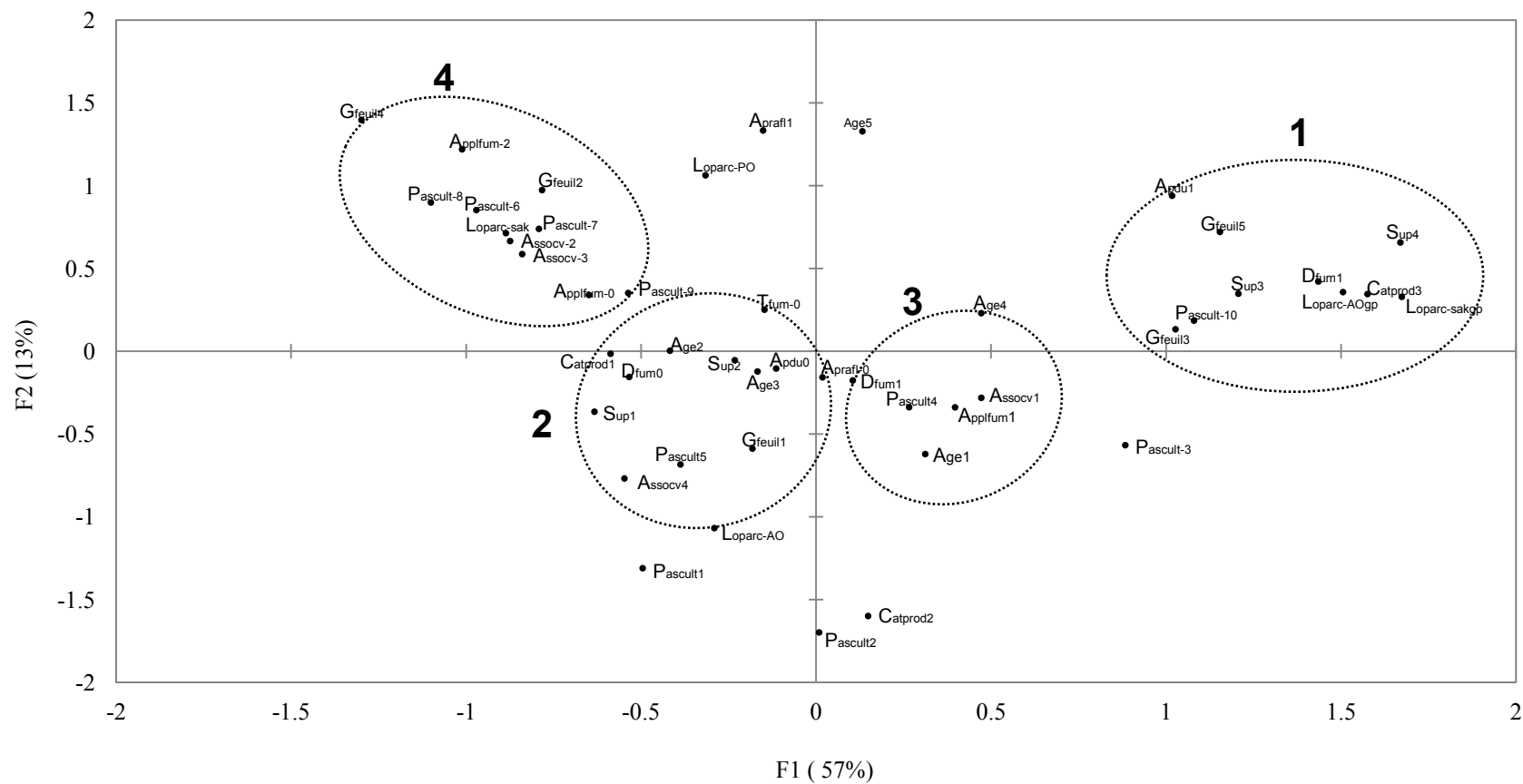


Figure 3.5 : Projection des caractéristiques des parcelles des 90 producteurs dans le TSPF sur les axes F1 et F2 de l'analyse factorielle en composantes multiples. Age = classe d'âge ; Sup = superficie ; Pascult = passé cultural ; AssoCv = association de cultures vivrières ; Apraft = apport de rafles dans les ronds ; Apdu = apport sous-produits de transformation ; Gfeuil = mode de gestion des feuilles d'élagage ; Tfum = type de fumure ; Dfum = dose de fumure ; Applfum = régularité d'application de fumure ; Catprod = catégorie de producteurs.

- Les palmeraies du groupe 1 ont des superficies élevées (sup3 et sup4) et appartiennent aux grands producteurs. Ces producteurs appliquent les doses d'engrais recommandées (Dfum1) recyclent les déchets de transformation et font une restitution totale ou partielle des feuilles d'élagage en andains. Les palmeraies de ce groupe représentent 13% de l'effectif des palmeraies sur terre de barre et occupent 49% des superficies plantées (tableau 3.7). Elles sont localisées dans les communes d'Adja-Ouère et de Sakété et sont installées sur d'anciennes jachères arbustives d'âge estimé à plus d'une dizaine d'années par les producteurs.
- A l'opposé du groupe 1, le groupe 2 est composé de palmeraies appartenant aux petits producteurs, de superficies plantées inférieures à 5 ha (Sup1). Les palmeraies de ce groupe couvrent 31% de la superficie totale plantée et représentent 67% du nombre de palmeraies étudiées sur terres de barre (tableau 3.7). Les exploitants du groupe 2 ne respectent pas les doses d'engrais recommandées (Dfum0) et ne recyclent pas les sous-produits de transformation. Dans la plupart de leurs palmeraies, les feuilles d'élagage sont totalement exportées pour servir principalement de combustible. Les associations culturales au jeune âge de plantation se font souvent avec le maïs et les légumineuses (figure 3.5). Les parcelles de ces plantations étaient cultivées avant le palmier avec diverses cultures vivrières : maïs, niébé, arachide, manioc, tomate, piment, patate douce...
- Le groupe 3 est constitué en majorité de jeunes palmeraies (Age1) qui ne sont pas encore entrées en production, et qui reçoivent de façon irrégulière les doses et types d'engrais (Applfum1). On rencontre les palmeraies de ce groupe dans les 3 communes étudiées et elles appartiennent pour la plupart aux petits et aux grands producteurs.
- Les palmeraies du groupe 4 se retrouvent majoritairement dans la commune de Sakété (Loparc-sak), où l'association du palmier avec le maïs et le manioc au jeune âge est fréquente (Assocv2 et Assocv3). Les engrais ne sont pas appliqués (Applfum0). Les feuilles d'élagage partiellement restituées sont disposées en vrac (Gfeuil2).

La figure 3.6 présente les proportions des modes de gestion des feuilles d'élagage en fonction des âges des palmeraies concernées (palmeraies d'âges > 7 ans). On constate que quelle que soit la classe d'âge, l'exportation totale ou partielle des feuilles (RN+RPV+RPA) est la pratique la plus répandue. On note dans la classe d'âge 13-20 ans une part importante (31,7%) du mode de restitution totale en andain (RTA) par rapport aux autres âges.

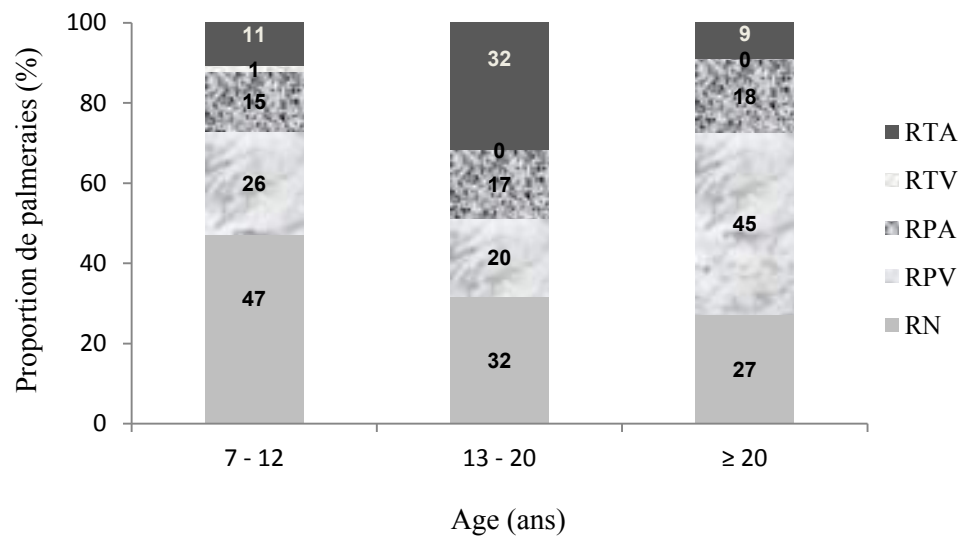


Figure 3.6 : Proportion des types de palmeraies par classe d'âge selon le mode de gestion des feuilles. Les codes mnémoniques RTA, RTV, RPA, RPV et RN désignent respectivement Restitution Totale en Andain, Restitution Totale en Vrac, Restitution Partielle en Andain, Restitution Partielle en Vrac et Restitution Nulle.

3.4 Discussion

Caractéristiques générales des palmeraies du département du Plateau

La distribution géographique de la culture du palmier à huile sélectionné est liée à la couverture pédologique du département. Les sols ferrallitiques qui sont les plus favorables à cette culture (Agossou, 1983 ; Elong, 2003) se retrouvent dans les communes d'Adja-Ouèrè, de Sakété et d'Ifangni. Les autres types de sols sont plus fréquents dans les communes de Kétou et de Pobè et offrent des contraintes physiques (notamment texturales) plus importantes que les terres de barre (Azontondé, 1991). Ils sont moins propices à la culture du palmier à huile.

Selon les paysans, les palmeraies ont été d'abord installées sur les sols ferrallitiques puis par la suite sur les autres types de sol (hydromorphes et vertisols). Ceci pourrait s'expliquer par la dominance des sols ferrallitiques dans le département (figure 3.3b) et par la forte présence dans le passé des palmiers naturels sur ces sols (Juhé-Beaulaton, 1998). De même, les palmeraies de la station de recherche et celles des coopératives d'aménagement rural, avaient été installées sur les sols ferrallitiques et auraient servi de modèles aux planteurs privés pour leur choix.

Les plantations villageoises sont plus nombreuses dans les communes d'Adja-Ouèrè et de Sakété (tableau 3.6) en raison de l'installation historique des coopératives dans ces deux communes qui a suscité un attrait pour cette culture. Cet engouement des paysans s'expliquerait par la diffusion du matériel végétal amélioré par le CRA-PP et les pépiniéristes agréés. Les résultats du recensement des planteurs de palmier à huile sélectionné concordent avec ceux de SNV-Bénin (2009) et confirment la bonne position occupée par les communes d'Adja-Ouèrè et de Sakété dans la production du palmier à huile sélectionné dans le département du Plateau.

Les paysans ont déclaré que les moyens financiers étaient une limite à la taille des plantations. Ils estiment que sans les ressources financières le producteur ne peut pas planter et entretenir de grandes superficies même s'il pourrait accéder à de telles superficies par un mode de faire valoir direct du foncier (héritage ou achat). En fonction de la superficie totale plantée les producteurs ont défini trois groupes de producteurs. L'importance des petits producteurs dans la zone d'étude est confirmée par les observations faites sur les terres de barre où 93% des producteurs ont des exploitations de petite taille. Cela indique que la majorité des petits producteurs ont de faibles moyens financiers. Toutefois, on rencontre quelques rares producteurs ayant des moyens financiers importants mais qui disposent de palmeraies de

petite taille. Ils ont déclaré avoir volontairement limité leurs superficies en palmier. Bien que peu attirés par cette culture, ils justifient cette petite superficie par le côté prestigieux du palmier à huile.

La prédominance des palmeraies en extension confirme l'adoption récente du palmier à huile sélectionné en plantation villageoise dans le département. Les fortes proportions de palmeraies jeunes (moins de 6 ans d'âge) et pré-adultes (7 - 12 ans d'âge) rencontrées sur les terres de barre confirment ce caractère récent (Adjé et Adjadi, 2001 ; Adjadi, 2008). En effet, bien que la variété sélectionnée (*tenera*) ait été introduite au Bénin depuis les années 1950 (Fournier et al., 2002), elle n'est apparue en plantation villageoise que dans les années 1990 avec le projet de relance de la production du palmier à huile (Adjé et al., 2001; Fournier et al., 2002). Ainsi, les superficies plantées ont connu un accroissement entre 1988 et 1993 et le palmier à huile sélectionné a progressivement pris le pas sur les palmeraies naturelles pour la fourniture des corps gras. Selon Adjadi (2008), la grande expansion de palmeraies villageoises a eu lieu entre 1997 à 2000 quand les superficies plantées ont augmenté de 85%. Ainsi, la plupart des palmeraies villageoises sont toujours en production ou ont été peu replantées. Ce qui explique les affirmations des paysans sur la faible présence des palmeraies de type replantation dans le département.

Par rapport aux cultures vivrières, les paysans ont manifesté un intérêt prioritaire pour la culture du palmier à huile qui s'avère plus rémunératrice. Mais en revanche dans leur stratégie d'allocation et de gestion des terres agricoles, ils associent les cultures vivrières aux plants de palmier à huile à leur jeune âge quel que soit le type de système de culture adopté. Ces associations de cultures vivrières au jeune âge de plantation ont été adoptées dans les palmeraies sélectionnées de la même façon qu'elles étaient pratiquées traditionnellement dans les palmeraies naturelles. Elles génèrent des revenus aux paysans et assurent leur subsistance (Chaléard, 2002) avant l'entrée en production du palmier. Selon Dufumier et al. (1997), l'association des cultures vivrières aux cultures pérennes, dans les premières années de plantation, est fréquente en agriculture paysanne. Elle permet de répondre aux besoins alimentaires des exploitants, et d'offrir une rémunération optimale vis-à-vis des coûts de production (terre, travail et main-d'œuvre). Dans la zone d'étude, l'entretien périodique des cultures vivrières associées participe fortement à l'entretien des jeunes palmeraies. Dans les systèmes d'association et de rotation des cultures, le recyclage des résidus de récolte profite aux cultures associées par le maintien des stocks de carbone et d'éléments nutritifs dans le sol

et par la fourniture d'azote lorsque le système cultural comporte des légumineuses (Deans et al., 1999 ; Bolin et Sukumar, 2000 ; Barthès et al., 2004 ; Amadji et Aholoukpè, 2008).

Les palmeraies où les feuilles d'élagage sont totalement exportées, sont fréquentes dans le département. Cependant quelques feuilles échappent toujours au ramassage, et les folioles ainsi que l'extrémité apicale du rachis sont parfois abandonnées sur place.

Cette pratique d'exportation des feuilles peu répandue dans d'autres pays à vocation élaeicole (Côte d'Ivoire, Malaisie, Indonésie, Equateur...) (Corley et Tinker, 2003) contribue à une perte de matière organique et d'éléments minéraux à l'échelle de la parcelle. Elle se justifie par les usages qui en sont faits par les populations : construction, alimentation du bétail, combustibles, pharmacopée, usages rituels et autres (Ahoyo, 2008). L'enquête a révélé que l'utilisation des feuilles comme combustible est devenue très courante dans la zone d'étude depuis au moins une décennie. Cette évolution s'explique par la raréfaction du bois issu des forêts dont les prélèvements sont de plus en plus contrôlés par les propriétaires ou les garde-forestiers.

Les palmeraies à restitution totale en andain (RTA) ou restitution totale en vrac (RTV) ont été considérées comme des exportations nulles. En réalité, il arrive que quelques feuilles d'élagage soient exportées, mais toujours en quantité négligeable. Ces palmeraies sont soit surveillées par des gardiens soit situées à au moins 5 Km des habitations. Elles subissent moins la pression des populations pour le besoin en combustible.

Les associations culturales et le recyclage des feuilles d'élagage interviennent dans le stock de matière organique des sols sous palmeraies. Selon Djègui (1995), une variabilité spatiale des stocks de la matière organique des sols sous palmeraie est liée aux pratiques culturales. On peut donc s'interroger sur la durabilité du système des palmeraies villageoises du Bénin lorsque les producteurs arrêtent les associations culturales à 5 ans, puis à partir de 7 ans exportent les feuilles d'élagage jusqu'à la fin du cycle de culture. Une pratique qui pourrait entraîner selon les estimations de Aholoukpè et al. (2013), une exportation annuelle de 10 tonnes de matière sèche à l'hectare. A cela, il faut ajouter la très faible fertilisation des palmeraies. Selon Ton et de Haan (1995), la conservation de la matière organique, le recyclage des éléments nutritifs, l'emploi des fumures, la rotation des cultures et les mesures anti-érosives, sont recommandés pour parvenir un équilibre entre les apports et les prélèvements d'éléments nutritifs, gage d'une agriculture durable.

Caractéristiques des palmeraies villageoises sur les terres de barre

Les caractéristiques des palmeraies se trouvant sur les terres de barre sont similaires à celles du département. Les proportions de petits, moyens et grands producteurs peuvent s'expliquer par le fait que la majorité des producteurs disposent de revenus modestes alors que la superficie plantée est surtout limitée par leurs moyens financiers et la main-d'œuvre dont ils disposent. Cependant, avec la multiplicité des petits producteurs, on peut en déduire que le palmier à huile concerne une frange importante de la population.

La figure 3.6 présente le groupe 1 constitué de palmeraies appartenant pour la plupart aux grands producteurs. Ces palmeraies sont proches des usines de transformation ou gardées par des agents de sécurité puisqu'elles bénéficient d'apport de sous-produits de transformation des régimes et subissent moins la pression de la population pour l'exportation des feuilles d'élague. De plus, les propriétaires de ces palmeraies semblent avoir été sensibilisés à l'application des engrais, puisque l'analyse des informations collectées montre qu'ils appliquent les doses recommandées. En effet, leur statut de grands producteurs signifie qu'ils ont les moyens financiers pour acheter les engrais spécifiques au palmier à huile et se sont informés des doses recommandées. Ces producteurs ont également un accès facile à une main-d'œuvre qualifiée et recrutent souvent des techniciens agricoles pour la conduite de leurs exploitations. Mais dans la réalité, ces pratiques ne sont pas toujours celles appliquées. Par exemple, les doses d'engrais appliquées et les fréquences d'application sont loin de celles recommandées par la station de recherche (tableau 3.4). Bien que représentant 13% des palmeraies sur terre de barre, les palmeraies du groupe 1 occupent près de la moitié de la superficie plantée (tableau 3.7). Ceci témoigne du fait que les moyens financiers des grands producteurs leur permettent d'acheter les terrains en jachère ou les forêts secondaires pour l'extension des palmeraies. Ces producteurs contribuent davantage à la déforestation, par l'installation des palmeraies à la place des forêts secondaires, avec toutes les conséquences environnementales qui en découlent : augmentation des gaz à effet de serre, perte de la biodiversité... (Germer et Sauerborn, 2008 ; Morel et al., 2011).

Les petits producteurs (groupe 2 de la figure 3.5) qui disposent d'un faible revenu ont un accès limité aux fumures et à la main-d'œuvre qualifiée. Ils se retrouvent également dans le groupe 3 (figure 3.5) où les fumures recommandées sont appliquées de façon irrégulière faute de moyens financiers.

L'existence de ces quatre groupes permet d'opérer des choix de palmeraies villageoises pour des études sur les terres de barres du département.

Les différentes modalités de gestion des feuilles d'élitage sont également rencontrées dans les palmeraies sur terres de barre. A tous les âges de plantation à partir de 7 ans, les feuilles d'élitage sont plus exportées qu'elles ne sont restituées (figure 3.6). La dominance des palmeraies de type "exportation des feuilles" en phase pré-adulte (7-12 ans) est due au fait que ces palmeraies appartiennent aux petits producteurs (groupe 2 de la figure 3.5) et sont situées à proximité des habitations ; ce qui augmente le taux de prélèvement des feuilles pour usages domestiques. Cependant, certains de ces petits producteurs sont propriétaires de palmeraies de type "restitution totale des feuilles".

Les petits producteurs installent leurs palmeraies près des habitations du fait de leur faible niveau de ressources qui ne leur permettent pas, selon Ton et de Haan (1995), d'acquérir des terrains en jachère, ni des parcelles forestières. Ils ont un faible impact sur la dégradation de l'environnement.

La part importante de la restitution des feuilles dans la classe 13-20 ans pourrait s'expliquer par le fait que les grands producteurs y sont plus représentés et que ces exploitants contrôlent mieux le recyclage des feuilles d'élitage.

3.5 Conclusion du chapitre 3

Au terme de cette étude, on retient que les terres de barre (sols ferrallitiques formés sur sédiment meuble argilo-sableux du Continental Terminal) représentent le type de sol le plus planté avec le palmier à huile dans le département du Plateau et que la typologie des palmeraies villageoises du département du Plateau, peut se baser sur :

(i) des caractéristiques peu variables : la densité de plantation, le précédent cultural des palmeraies, l'association quasi systématique des cultures vivrières au jeune âge de plantation, avec des variations dans le choix du type de cultures associées, et les pratiques de fertilisation qui sont mal ou peu respectées en particulier chez les petits planteurs.

(ii) des caractéristiques variables : la restitution des sous-produits de transformation qui est surtout limitée à quelques grands planteurs et les modes de recyclage des feuilles d'élitage. A partir de 7 ans, les feuilles d'élitage sont plus fréquemment exportées chez les petits producteurs qu'elles ne sont restituées.

Ces caractéristiques provenant des facteurs aussi bien socio-économiques qu'agronomiques posent la question de l'adéquation de la nutrition minérale des palmeraies et celle du maintien des stocks de matière organique dans les sols. Elles nous interrogent sur les performances à long terme des palmeraies villageoises au Bénin et font appel à des actions de recherche et

développement qui doivent être plus orientées vers les petits et moyens producteurs et impliquer des acteurs d'autres disciplines (agronomie, environnement, foresterie, sociologie...).

L'existence sur les terres de barre de groupes de palmeraies caractérisées par différentes pratiques culturelles donne les premières pistes de recherche et facilite le choix des palmeraies pour des actions futures. Il s'agirait notamment de l'étude des deux modes contrastés de gestion des feuilles d'élagage (restitution totale et restitution nulle) pratiqués à partir de 7 ans d'âge et durant tout le cycle de la palmeraie.

Chapitre 4 : Modes de gestion des feuilles et MOS dans une chronoséquence de palmeraies

Ce chapitre contient les résultats de la deuxième phase de l'étape exploratoire. Il comprend une évaluation des stocks de matière organique dans une chronoséquence de 22 palmeraies choisies à l'issue du diagnostic de typologie. Il a fait l'objet d'un « préarticle » dont le titre⁵, présente une forme « informative » des principaux résultats.

4.1 Introduction du chapitre 4

La conversion des forêts tropicales en systèmes agricoles intensifs est très critiquée de nos jours du fait des conséquences environnementales (émission de gaz à effet de serre, perte de la biodiversité écologique) et sociales liées au changement d'utilisation des terres (GIEC, 2000 ; Houghton, 2003 et 2010). Les débats sur le changement climatique et l'utilisation des terres agricoles insistent sur l'afforestation et la reforestation (Le Toan et al., 2011) et sur des pratiques culturales de séquestration ou de mitigation des gaz à effet de serre. Dans ce domaine, les pratiques de restitution au sol des biomasses et leurs rôles dans le stockage du carbone et des nutriments dans le sol ont été abordés dans plusieurs études (Frisque, 2007 ; Khalid et al., 2000 ; Victoria et al., 2012 ; ...). L'accroissement du stockage de carbone sous forme de matière organique des sols peut jouer un rôle important dans la lutte contre l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (réduction des émissions de CO₂), et donc dans la prévention du changement climatique (Arrouays et al., 2002 ; Victoria et al., 2012). Le stockage du carbone dans le sol sous forme de matière organique dépend de nombreux facteurs, dont les occupations des sols et les pratiques agricoles. Il est donc important de connaître le potentiel offert par le sol, sous palmeraie, en tant que "puits de carbone" selon les pratiques et les usages.

Une augmentation du stock de carbone organique des sols, même très limitée en valeur relative, obtenue par une réduction de la vitesse de minéralisation, peut mettre en jeu des quantités de carbone très importantes par rapport aux flux nets annuels d'échange avec l'atmosphère (Arrouays et al., 2003). Les pratiques culturales dans les plantations de palmier à huile peuvent être déterminantes dans ces flux. En effet, certains auteurs affirment que les pratiques d'abattage et brûlis des milliers d'hectares de forêts tropicales et leur remplacement par les plantations de palmier à huile affectent le "puits de carbone" par déstockage du carbone (Germer et Sauerborn, 2008, Houghton, 2010 ; Koh et al., 2011 ; Carlson et al.,

⁵ Titre du Pré-article : Soil carbon stock is affected by management of pruned fronds in palm plantations of smallholders in Western Africa

2012). D'autres auteurs reconnaissent aux palmeraies un rôle de stockage du carbone sous forme de biomasses aérienne et racinaire (Jaffré, 1983 ; Henson, 2002 ; Morel al. 2011 ; Khalid et al., 1999) et dans le sol (Hartmann, 1991 ; Djègui, 1992 ; khalid et al., 2000a; Frazão, 2012). Selon Sayer et al. (2012), même si la conversion des forêts en culture de palmier à huile a un effet sur l'émission de CO₂, il ressort aussi que les plantations de palmier à huile stockent plus de carbone que n'importe quelle autre culture. L'auteur affirme qu'en termes d'émission de carbone, et compte tenu de la nécessité de répondre aux besoins en corps gras futurs, la culture du palmier à huile est préférable à d'autres oléagineux.

Les études d'estimation des stocks de carbone du sol pour l'évaluation du potentiel "puits de carbone" des sols sous divers usages agricoles ont été souvent conduites sur les systèmes agro-forestiers (Lardy et al., 2002 ; Isaac et al., 2005 ; Jantalia et al., 2007 ; Marco et al., 2010). De façon conventionnelle, le calcul du stock tient compte de la densité apparente et de l'épaisseur de la couche de sol étudiée. Bernoux et al. (1998) rapportent que la connaissance de la densité apparente du sol est nécessaire pour convertir les teneurs en carbone organique en masse de carbone organique par unité de surface. Selon Ellert et Bettany (1995), des comparaisons de stocks de carbone du sol devraient être effectuées à masses de terre égales (équivalentes), surtout lorsqu'on se retrouve dans des situations où des pratiques culturales induisent des variations non négligeables de densités apparentes et donc de masses de terre correspondantes sur une profondeur donnée. Le calcul du stock de carbone par masse de terre équivalente (MTE) rend également compte des différences liées à une variabilité spatiale et temporelle des stocks (Ellert et al. 2002).

Si quelques études ont porté sur le potentiel des plantations de palmier à huile en termes de stock de carbone dans ses biomasses végétatives, très peu d'études ont quantifié le stock de carbone du sol des palmeraies et moins encore à différents âges de plantation. Il existe une variabilité spatiale du recyclage de la matière organique au sol en raison du dispositif de plantation qui distingue différentes zones dans la palmeraie : les ronds généralement désherbés pour le ramassage des fruits détachés et l'application des engrais ; les interlignes qui servent de passage pour le ramassage de la récolte et les zones d'andainage des feuilles élaguées (Djègui et al., 1992 ; Law et al., 2009 ; Frazão, 2012).

Les systèmes de palmeraies villageoises ou palmeraies des petits planteurs sont encouragés, car telles qu'elles sont définies par le "Roundtable on Sustainable Palm Oil", ces palmeraies n'empiètent pas sur les high conservation value forest (HCVF) et leur production contribue

pour une part importante à la production mondiale d'huile de palme (Vermeulen et Goad, 2006).

Au Bénin, les palmeraies villageoises sont majoritairement établies sur d'anciennes cultures vivrières et font objet d'une gestion assez diversifiée des feuilles d'élagage, allant d'une restitution totale (RT) à une restitution nulle (RN) des feuilles durant tout le cycle du palmier (Aholoukpè et al., 2013a). Les différents modes de gestion des feuilles d'élagage dans les palmeraies sont susceptibles de produire des effets différents sur la qualité du sol et la durabilité du système de culture. La seule étude réalisée par Djègui (1992) sur l'estimation des stocks de carbone du sol des palmeraies villageoises du Bénin a montré que les stocks, calculés par profondeurs équivalentes, sont plus élevés sous les andains que dans le rond et les interlignes.

Cette étude fournit une évaluation du potentiel "puits de carbone" du sol des palmeraies villageoises du Bénin. L'estimation des stocks de carbone a été faite dans une chronoséquence de palmeraies en relation avec les pratiques de gestion des feuilles d'élagage.

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Milieu d'étude

L'étude a été conduite dans le département du Plateau situé au Sud-Est du Bénin (figure 4.1a). Le climat est de type subéquatorial caractérisé par une alternance de deux saisons de pluie et deux saisons sèches inégalement réparties dans l'année. On enregistre une hauteur moyenne de 1300 mm de pluie par an et un déficit hydrique variant entre 600 et 800 mm (Nouy et al., 1999). Les sols de cette étude font partie du type de sol le plus utilisé pour la culture de palmier à huile dans le département (Aholoukpè et al., 2013a). Ils appartiennent à la famille des sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris en argile (Volkoff et Willaime, 1976). Ils sont communément appelés "terre de barre", et ont été décrits par Azontondé (1991), Amadji et Aholoukpè (2008). La végétation est dominée par des savanes arborées et arbustives, des palmeraies plantées avec le matériel végétal sélectionné appelées "palmeraies sélectionnées", et des palmeraies issues de régénération naturelle (désignées par "palmeraies naturelles"), des jachères arbustives, des îlots de forêts semi-décidues et des galeries forestières (Djègui, 1992 ; CBD, 2001). Les périodes de végétation active dans le département correspondent à celles des deux saisons de pluie : mars à juillet et septembre à octobre.

4.2.2. Caractéristiques et choix des palmeraies

L'étude a porté sur les palmeraies villageoises plantées avec du matériel végétal sélectionné, d'origine génétique Deli x La Mé ou Déli x Yangambi (Aholoukpè et al., 2013a). Elles sont situées sur les terres de barre et plantées en quinconce (dispositif de triangle équilatéral de 9 m de côté) à une densité de 143 arbres/ha. Pour l'entretien des plants, les feuilles des palmiers sont élaguées à partir de 7 ans et sont restituées au sol par certains producteurs, mais sont exportées dans la plupart des cas par les populations pour des usages domestiques. Parmi les cinq modes de gestion de ces feuilles d'élagage par les paysans (Aholoukpè et al., 2013a), les extrêmes ont été retenus pour cette étude. Il s'agit des modes de restitution totale des feuilles en andain (RT) sur la ligne de plantation, et de restitution nulle (RN) où les feuilles sont quasiment toutes exportées. A l'âge adulte (13-20 ans), les interlignes des palmeraies adultes sont occupées par des recrus végétatifs périodiquement sarclés et restitués au sol.

Vingt deux palmeraies de différents âges représentant ces deux modes RT et RN ont pu être identifiées dans le département (figure 4.1b). La diversité des pratiques culturelles en milieu villageois n'a pas permis d'avoir les deux modes RT et RN et le même nombre de parcelles à tous les âges (tableau 4.1). Dans le cas des vieilles parcelles où les feuilles ne sont pas restituées, on assiste dans la plupart des cas à une restitution en vrac des rafles, de sous produits d'usinage au sol ou de déjections animales. Ce qui ne correspond plus au mode RN étudié dans notre travail. La pratique de fertilisation minérale dans les palmeraies étudiées est inexistante ou très irrégulière. La restitution significative des feuilles au sol commence à 7 ans d'âge des palmeraies. Ainsi, la durée moyenne de restitution des feuilles est de 4 ans dans une palmeraie pré-adulte, de 10 ans dans une palmeraie adulte, et supérieure à 10 ans dans une vieille palmeraie.

Tableau 4.1 : Nombre de parcelles par classe d'âge

Classes d'âge	Mode Gestion_feuilles	Nombre_parcelle
4 - 6 (jeune)	Indéfini*	5
7 - 12 (pré-adulte)	RT	3
	RN	3
13 - 20 (adulte)	RT	6
	RN	3
≥ 20 ans (vieux)**	RT	2

* le mode est indéfini dans les jeunes palmeraies car la restitution des feuilles n'a pas commencé à cet âge. Ces parcelles ont été considérées comme RN pour l'étude des stocks de carbone.

** il n'existe pas de réel mode RN dans les vieilles palmeraies

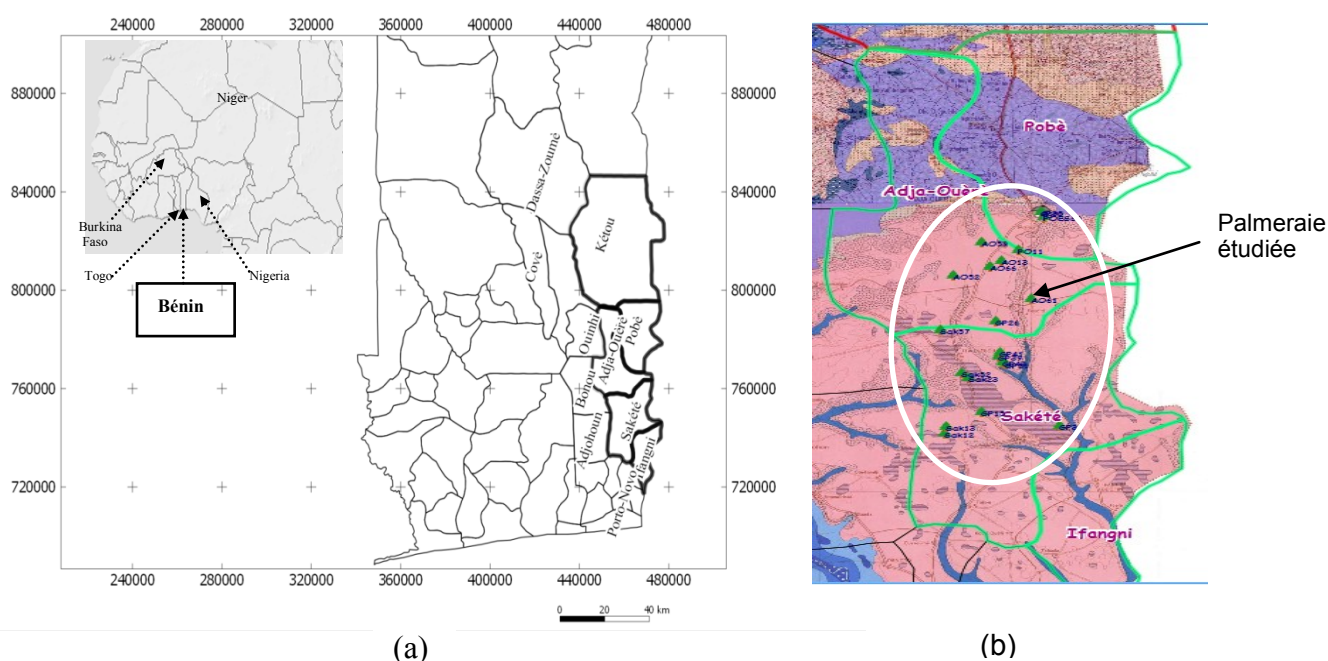


Figure 4.1 : Zone d'étude et répartition spatiale des palmeraies. Elles sont majoritairement situées dans Adja-Ouère et Sakété qui sont les deux communes de forte production de palmier à huile dans le département.

4.2.3. Echantillonnage de sol, mesures et calcul du stock de carbone

Les observations ont été faites sous 9 palmiers retenus au hasard sur 1 ha de palmeraie où le développement des palmiers est homogène.

❖ Echantillonnage de sol

L'échantillonnage du sol a été fait sur la ligne et dans l'interligne de plantation à 4,5 m du tronc de deux palmiers. Le point sur ligne se retrouve au milieu des andains de feuilles dans les palmeraies RT, et dans la même zone dans les palmeraies RN (figure 4.2). Le sol a été prélevé par tranches de 5 cm jusqu'à 20 cm de profondeur. Dans le but de réduire les coûts d'analyse de laboratoire tout en gardant la possibilité de prendre en compte la variabilité intra parcellaire lors des tests statistiques, 296 échantillons de sol ont été constitués de la façon suivante pour les analyses au laboratoire :

- mélange par profondeur des échantillons des 9 palmiers de 17 parcelles pour obtenir des composites de sol (4 profondeurs x 2 positions x 17 parcelles = 136 échantillons)
- mélange par profondeur des échantillons de 6 palmiers de 5 parcelles pour obtenir des composites de sol (4 profondeurs x 2 positions x 5 parcelles = 40 échantillons)
- échantillons individuels (non composite) des 3 palmiers restants dans les 5 parcelles précédentes (4 profondeurs x 2 positions x 3 palmiers x 5 parcelles = 120 échantillons)

❖ Mesures

Les dimensions (longueur, largeur) des andains de feuilles des parcelles RT ont été mesurées. Toutes les feuilles au sol y compris celles déjà en décomposition ont été pesées sur le terrain pour l'obtention du poids frais de chaque andain. Un échantillon représentatif de l'andain a été prélevé et séché à l'étuve à 70°C pendant 72 heures pour la détermination du taux de matière sèche de chaque andain, utilisé pour le calcul de la masse sèche de l'andain.

Des prélèvements de sol au cylindre de densité ont été effectués à chaque profondeur sous l'andain et dans l'interligne des 22 parcelles étudiées pour la détermination de la densité apparente du sol.

Dans une parcelle adulte RT, un transect pédologique a été installé et orienté perpendiculairement à la ligne de l'andain (photo 4.1) pour la description du profil du sol dans ces deux zones.

Au laboratoire, les 296 échantillons de sol ont été analysés par la méthode de la spectroscopie proche infra rouge (SPIR) (Barthès et al., 2006 ; Brunet et al., 2007 ; Aholoukpè, 2009) pour la prédiction de la teneur en carbone organique avec des modèles de régression établis sur la

base des résultats d'analyse par méthode conventionnelle d'un nombre réduit (125) d'échantillons. La méthode conventionnelle est celle du CHN par combustion sèche totale du sol sous oxygène avec comme gaz vecteur l'hélium pur à 870°C.

En tenant compte du contexte de gestion des feuilles d'élitage pouvant induire une variabilité spatiale de la densité apparente du sol et du taux de matière organique, le stock de carbone a été calculé par masse de terre équivalente (Ellert et Bettany 1995).

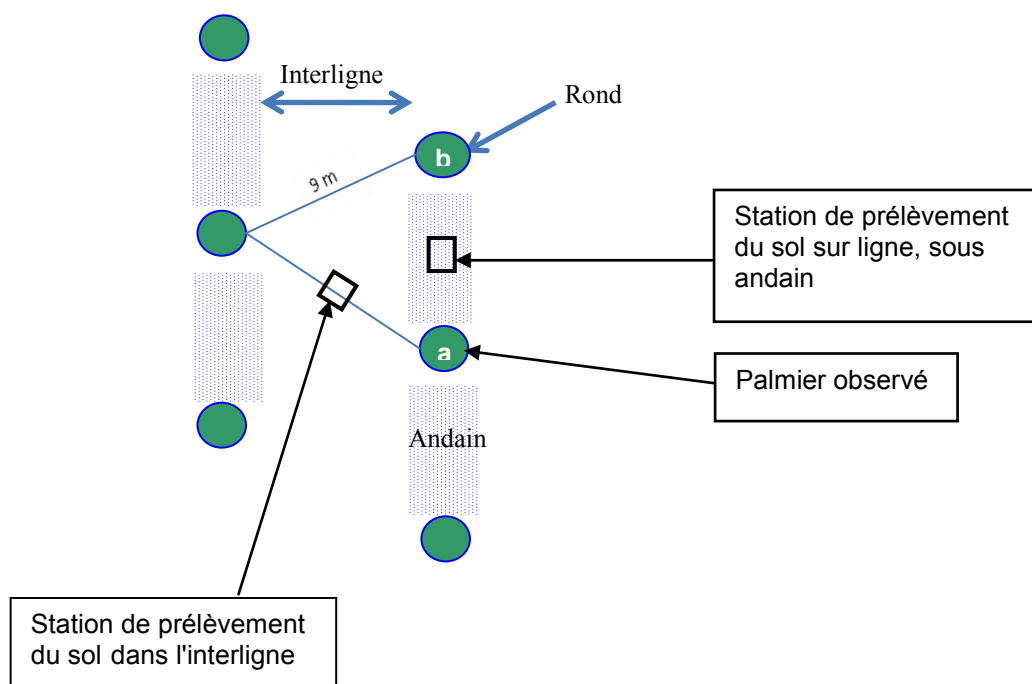


Figure 4.2. Stations de prélèvement du sol dans une palmeraie. Rond = zone délimitée autour du tronc pour le ramassage des fruits détachés et pour les apports d'engrais Dans les parcelles RN, les andains de feuilles n'existent pas mais les stations de prélèvement du sol ont été localisées selon la disposition indiquée sur la ligne et dans l'interligne.



Photo 4.1. Transect pédologique transversal sur andain et interligne dans une palmeraie adulte.

4.2.4. Traitement et analyse des données

La masse sèche moyenne d'andain par palmier a été calculée en considérant les masses sèches d'andain des 9 palmiers observés dans les parcelles RT. La biomasse totale de feuilles au sol dans une palmeraie a été estimée en multipliant la masse sèche moyenne d'andain d'un palmier par la densité de 143 arbres par hectare. Les longueurs et largeurs des andains ont permis de calculer leur surface par palmier. Dans notre contexte d'étude (palmeraies béninoises), nous avons considéré qu'il existe un tas d'andain par palmier et 143 palmiers à l'hectare. Ainsi, la surface de chaque andain a été multipliée par la densité de 143 arbres par hectare pour l'estimation du taux de couverture du sol par ces andains dans une palmeraie.

Le profil de densité apparente du sol a été établi pour 2 classes d'âges : 7-12 ans et 13-20 qui représentent respectivement des durées moyennes assez courtes (4 ans) et relativement longues (10 ans) de gestion des feuilles d'élagage.

Les observations faites dans le transect pédologique ont permis de décrire les différents horizons de sol sous andain et dans l'interligne.

Les stocks de carbone ont été déterminés pour des masses de terre égales (équivalentes) des profils de sol sous andain et dans l'interligne. Le calcul des stocks a suivi la procédure ci-après :

A- résumé du mode de calcul

- On a fixé une MTE de façon à ce que l'on dispose effectivement, pour tous les profils de sol à comparer et pour l'épaisseur de sol E_c correspondant à cette MTE, de données de D_a , de teneur en terre fine et de teneurs en C de façon à pouvoir calculer le stock de C sur l'épaisseur E_c .
- Pour chaque profil de sol on a identifié la tranche n de sol qui permet d'atteindre cette MTE et on a calculé l'épaisseur E_c de sol en considérant l'épaisseur cumulée des $n-1$ tranches de sol et la portion alpha de la tranche n à prendre en compte pour atteindre la MTE.
- Enfin, on a calculé le stock de C contenu dans cette épaisseur E_c de sol par sommation des stocks C_i de carbone des $n-1$ tranches de sol et du stock de C de la portion alpha de la tranche n de sol.

B- fixation de la MTE

Pour chaque profil de sol, on dispose de k tranches de sol (k n'est pas nécessairement une constante, et peut varier selon le profil) d'épaisseurs E_i fournissant une épaisseur totale E (E peut aussi varier selon le profil bien que cela ne soit pas le cas dans cette étude).

Pour chaque tranche de sol d'épaisseur E_i (i allant de 1 à k), on dispose de données de densité apparente (D_{ai}), et de taux de terre fine (TF_i) (< 2 mm) telles que

$$TF_i = (100 - \text{taux de refus}) / 100$$

Pour chaque profil de sol, on a calculé la masse de terre fine MTF sur l'épaisseur E disponible en sommant les masses de terre fine de chaque tranche de sol contribuant à cette épaisseur E :

$$MTF = \sum_{i=1}^{i=k} MTF_i = \sum_{i=1}^{i=k} D_{ai} \cdot E_i \cdot TF_i \quad (\text{Equation 1})$$

Dans ce chapitre, $k = 4$; $E_i = 5$ cm et $E = 20$ cm

On a fixé par la suite une masse de terre équivalente (MTE) inférieure ou égale à MTF.

$$MTE \leq MTF \quad (\text{Inégalité 1})$$

C- Détermination de l'épaisseur E_c à prendre en compte pour obtenir la MTE

Pour chaque profil de sol on a déterminé, pour obtenir la MTE fixée :

- le nombre **n** ($n \leq k$, et n dépend du profil de sol) de tranches de sol à prendre en compte ;
- la portion **alpha** d'épaisseur de la dernière tranche (tranche n) à considérer pour obtenir la MTE :

Le nombre **n** (qui peut varier d'un profil de sol à un autre) est tel que

$$\sum_{i=1}^{i=n-1} MTF \text{ tranche } i < MTE < \sum_{i=1}^{i=n} MTF \text{ tranche } i \quad (\text{Inégalité 2})$$

La portion **alpha** d'épaisseur de la tranche n à considérer pour obtenir MTE a été déterminée comme suit :

$$MTE = \sum_{i=1}^{i=n-1} MTF \text{ tranche } i + (\alpha * MTF \text{ tranche } n) \quad (\text{Équation 2})$$

d'où :

$$\alpha = \frac{MTE - \sum_{i=1}^{i=n-1} MTF \text{ tranche } i}{MTF \text{ tranche } n} \quad (\text{Équation 3})$$

Pour un profil de sol donné, l'épaisseur E_c ($E_c \leq E$) correspondant à la MTE fixée est obtenue par la formule suivante qui tient compte des épaisseurs de chaque tranche de sol :

$$E_c = \sum_{i=1}^{i=n-1} E \text{ tranche } i + (\alpha * E \text{ tranche } n) \quad (\text{Équation 4})$$

D- Calcul des stocks de C pour une même MTE

Pour chaque profil de sol, le calcul du stock de C contenu dans la MTE a été fait par simple sommation de stocks sur l'épaisseur E_c correspondant à la MTE. Pour une même MTE, le calcul des stocks de C est alors fonction :

- du nombre **n** de tranches de sol à considérer ;
- de la valeur **alpha** correspondant à la proportion d'épaisseur de la tranche n (dernière tranche de sol à considérer) ;
- des valeurs **D_{ai}**, **TF_i** et **C_i** de chaque tranche de sol.

Le Stock de C par MTE a été obtenu par la formule suivante :

$$QC = \sum_{i=1}^{i=n-1} C_i \cdot Da_i \cdot E_i \cdot TFi + [\alpha \cdot C_n \cdot Da_n \cdot E_n \cdot TFn] \quad (\text{Équation 5})$$

L'équation 5 s'applique directement sans facteur multiplicatif en considérant les unités ci-dessous :

- QC en Mg.ha⁻¹ ;
- Epaisseurs Ei en cm ;
- Densité apparente Dai en g.cm⁻³ (ou kg.dm⁻³) ;
- Taux de terre fine TFi en g.g⁻¹ ;
- teneurs pondérales en carbone Ci en g.100g⁻¹

Dans cette étude, 200 kg.m⁻² de MTE est proche de la masse totale de terre fine calculée sur la profondeur étudiée (20 cm) sous andain et dans l'interligne.

Des analyses de variances ont été faites sur les données de biomasse des andains pour comparer les moyennes par classe d'âge. Le test de Tukey a permis de classer les moyennes. Pour l'analyse statistique des stocks de carbone, l'effet des facteurs "classe d'âge", "mode de gestion des feuilles" et "positions" et leurs interactions ont été testés par des analyses de variances de type split-plot tenant compte de l'effet aléatoire des palmiers, des parcelles et des stations de prélèvement du sol. Les interactions ont été détaillées en testant l'effet de chaque facteur par tranches correspondant chacune à une combinaison des niveaux des autres facteurs (tests connus sous le nom de « tests of simple effects » (SAS, 2011).

Des comparaisons multiples de moyennes par le test de Tukey ont permis le classement des moyennes. La variabilité intra parcellaire a été étudiée par estimation de la variance de l'effet des palmiers et de l'effet des stations de prélèvement comparée à la variance de l'effet des parcelles.

4.3 Résultats

4.3.1 Biomasse et taux de couverture des feuilles restituées au sol

La biomasse sèche totale d'andains de feuilles au sol (figure 4.3) varie en fonction de l'âge des palmeraies. Dans les palmeraies adultes (13 - 20 ans) cette biomasse (environ 80 t.ha⁻¹) est près de deux fois supérieure à la biomasse (45 t.ha⁻¹) dans les palmeraies pré-adultes (7 -12 ans) et à celle (48 t.ha⁻¹) dans les palmeraies très âgées (> 20 ans). Il existe une différence hautement significative ($P < 0,001$) entre la biomasse de feuilles au sol dans les palmeraies de 13 à 20 ans et celles des deux autres classes d'âges.

Quant à la couverture du sol par ces andains, il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les taux de couverture du sol des différentes classes d'âges bien qu'il semble y avoir une tendance à l'augmentation du taux de couverture du sol en fonction de l'âge (figure 4.4). On observe un taux moyen de couverture du sol de 10% à partir de l'âge adulte des palmeraies.

4.3.2 Variabilité spatio-temporelle du stock de carbone du sol

4.3.2.1 Etude de profil du sol

L'étude de profil du sol selon un transect andain-interligne (figure 4.5) montre que l'andainage des feuilles a créé un micro relief au pied du palmier, avec une pente d'environ 8% de l'andain vers l'interligne. On observe l'existence sous andain d'une couche F au dessus du sol, constituée de feuilles fragmentées, de turricules et de beaucoup de racines fines en croissance, puis d'un horizon A0, organo-minéral qui n'existe pas dans l'interligne. A la place de l'horizon A1 sous andain, il existe dans l'interligne l'horizon A2 lessivé qui est situé sur l'horizon de transition A2B. La transition entre les horizons A1 et B rouge sous andain est graduelle et passe d'abord par AB_(I) dont l'équivalence n'existe pas dans l'interligne. Dans les deux zones, l'horizon B rouge caractéristique des terres de barre est situé au delà de 40 cm et est séparé des horizons A par les horizons de transition (AB(I) et AB(II) sous andain ; A2B dans l'interligne).

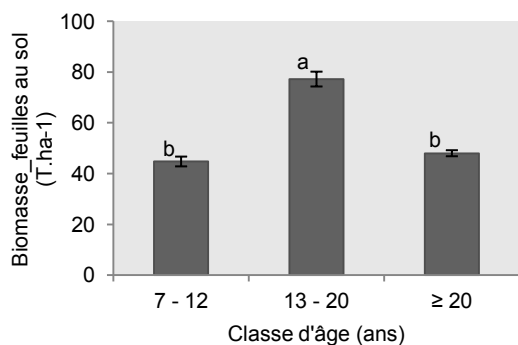


Figure 4.3. Biomasse de feuilles au sol par classe d'âge de palmeraie. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

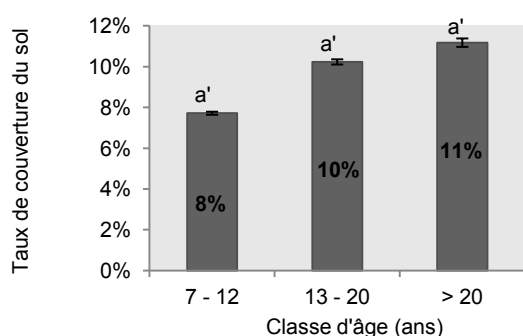


Figure 4.4. Taux de couverture du sol par les feuilles. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards.

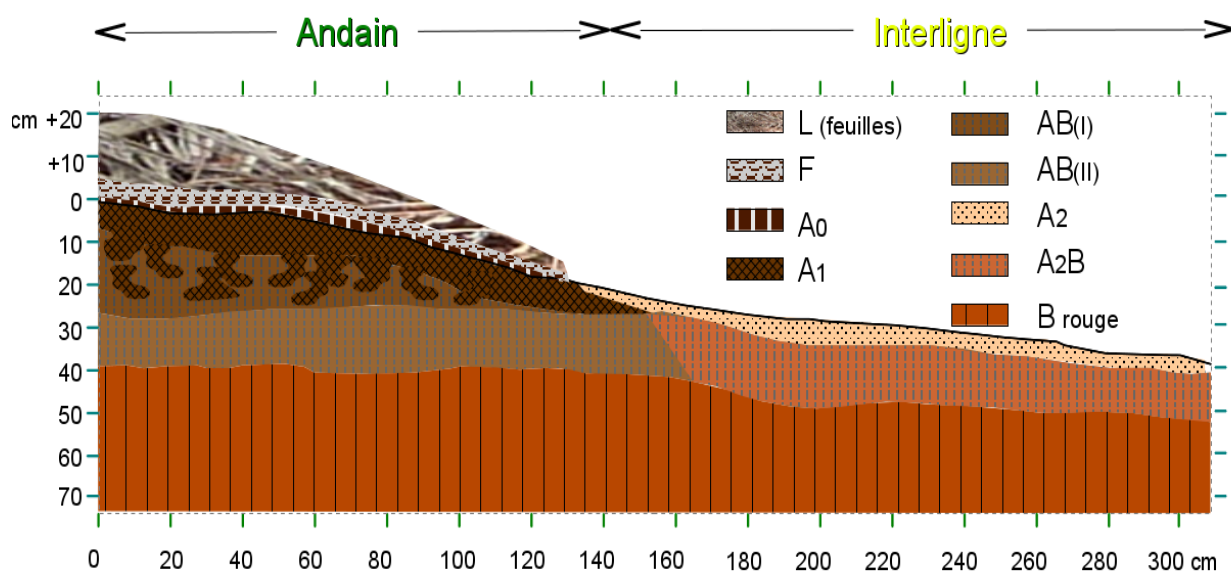


Figure 4.5. Transect pédologique de l'andain vers l'interligne d'une palmeraie adulte RT. L désigne la couche de feuilles de palmiers restituées en andains au sol.

Description du profil du sol sous palmeraie adulte en mode RT des feuilles.

Andain	Interligne
F : > 0 cm : couche de litière d'épaisseur moyenne de 4 cm ; constituée de mélange de feuilles et racines fines fragmentées ; présence importante de la macro faune.	
A0 : 0 - 2 cm : couche mince organo-minérale, de 2 cm d'épaisseur ; couleur noirâtre ; présence d'amas de racines fines de palmier ; beaucoup de turricules ; forte activité biologique ; aspect pâteux, légèrement collant	
A1 : 2 - 10 cm : 5YR 3/2 ; texture sablo-limoneuse ; présence de racines fines et secondaires de palmier ; bonne activité biologique ; aspect mou et frais ; structure grumeuleuse ; forte porosité et bon drainage.	A2 : 0 - 10 cm : 5YR 2,5/2 ; texture sablo-limoneuse ; lessivé en surface (gris clair) ; absence d'amas racinaire en surface ; moins de racines fines ; quelques racines primaires ; aspect frais ; structure particulière.
AB(I) : 10 - 25 cm : 5YR 3/4 ; texture limono-argilo-sableuse ; peu cohérent ; présence d'activité biologique ; structure nette et grumeuleuse ; compact par endroits ; présence de micro et macro pores ; bon drainage ; transition graduelle entre A1 et AB2. Présence importante de racines primaires du palmier. Quelques cavités de macro faune de diamètre ~ 1,5 cm.	
AB(II) : 25 - 40 cm : 7,5YR 3/4 ; texture sablo-argileuse ; plus cohérent que AB1 ; aspect massif dans l'ensemble ; collant ; structure peu nette et polyédrique ; drainage assez bon ; transition nette et continue entre AB2 et B ; beaucoup de racines primaires de palmier ; activité biologique peu intense ;	A2B : 10 - 35 cm : 7,5YR 3/4 ; texture limono-sablo-argileuse à sablo-argileuse ; un peu lessivé dans sa partie supérieure ; aspect sec et collant ; transition nette et continue ; présence de racines fines et primaires du palmier ; drainage assez bon ; structure polyédrique.
B : > 40 cm : 5 YR 4/6 ; texture argilo-sableuse à argileuse ; frais et collant ; structure polyédrique ; faible activité biologique ; drainage assez bon à mauvais ; présence de racines primaires et secondaires de palmier.	B : > 35 cm : 5 YR 4/6 ; texture argilo-sableuse à argileuse ; frais et collant ; structure polyédrique ; faible activité biologique ; drainage assez bon à mauvais ; présence de racines primaires et secondaires de palmier.

Les profils de densité apparente montrent des valeurs croissantes avec la profondeur (figures 4.6a et 4.6b). Pour les deux classes d'âges, les valeurs les plus faibles sont observées sous les andains. Ces valeurs sont très faibles sous andain dans la couche 0-5 cm des palmeraies adultes (13-20 ans). Dans les palmeraies de 7-12 ans, les valeurs de densité apparente dans les interlignes RT et lignes et interlignes RN sont très proches, alors que dans les palmeraies adultes ces valeurs sont plus élevées dans les interlignes RT.

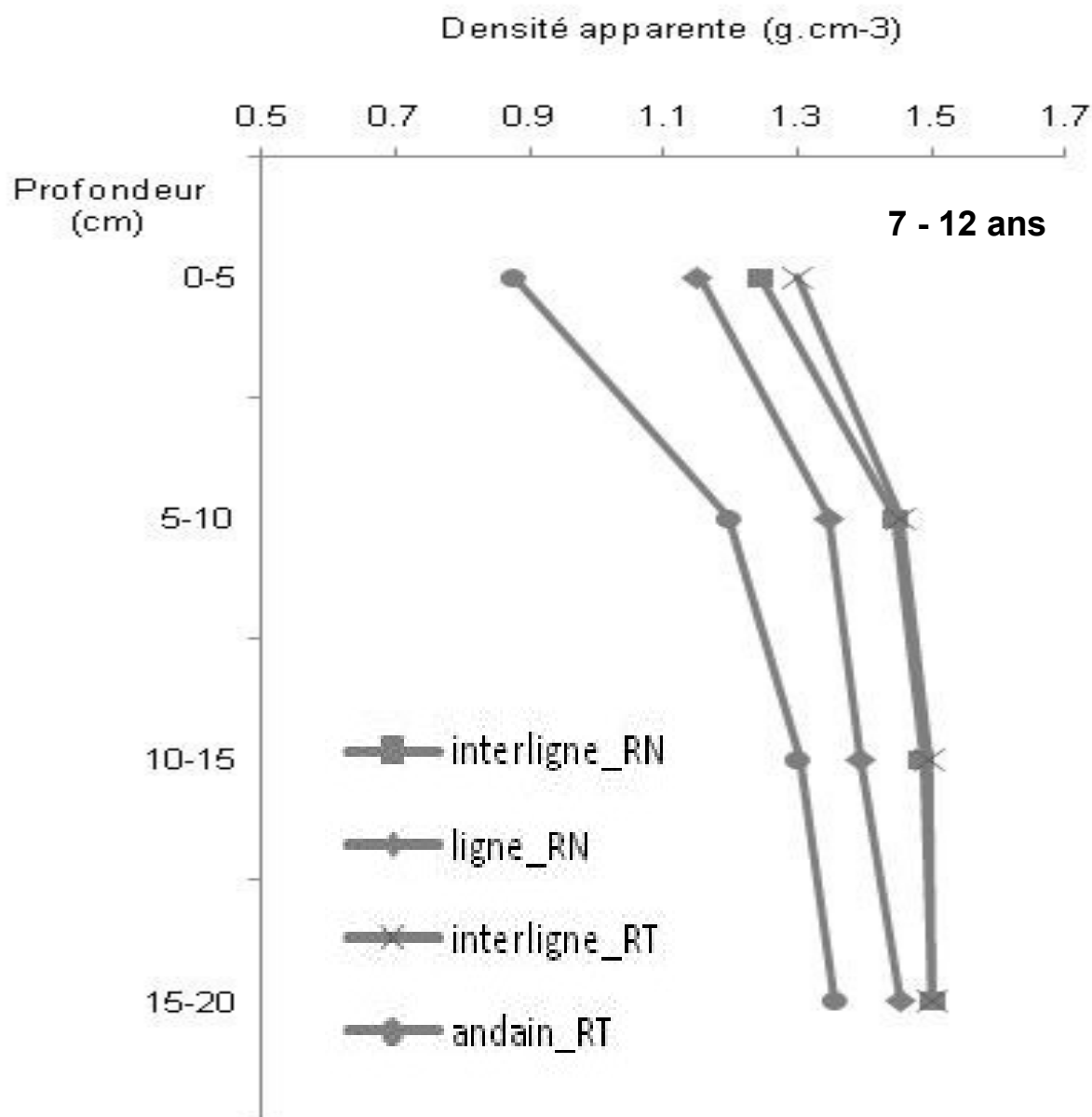


Figure 4.6a. Profil de densité apparente du sol dans les palmeraies de 7 - 12 ans.

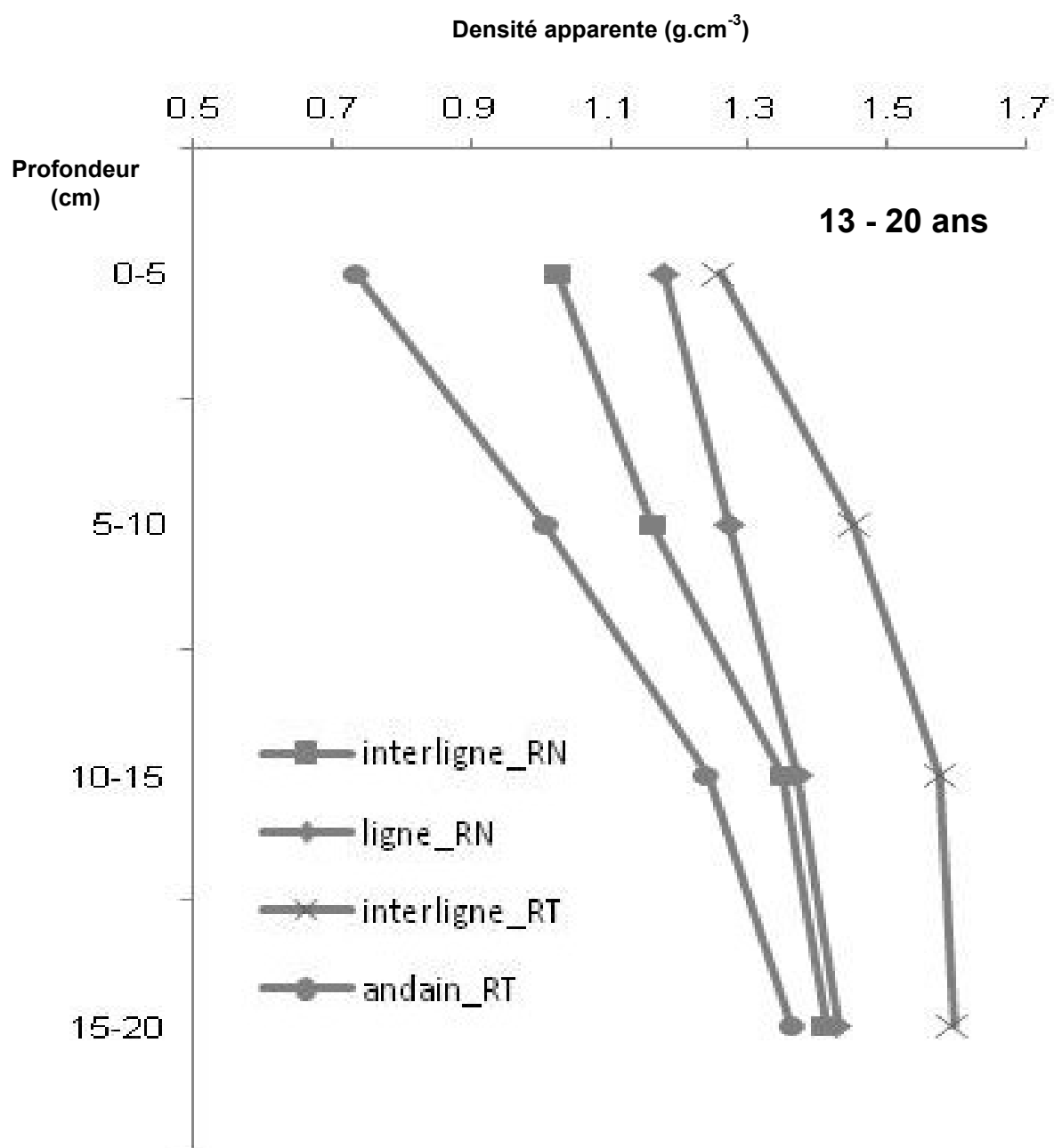


Figure 4.6b. Profil de densité apparente du sol dans les palmeraies de 13 - 20 ans.

4.3.2.2 Stocks de carbone du sol

Les stocks de carbone présentés dans le tableau 4.2 montrent que dans les palmeraies RN il n'existe pas de différence significative entre les stocks de carbone des positions ligne et interligne des parcelles de 4-6 ans et de 7-12 ans. Dans ces palmeraies RN, pour les parcelles de la classe d'âge 13-20 ans, le stock de C dans l'interligne apparaît en moyenne légèrement plus élevé que sur la ligne ($P < 0,05$).

Dans les palmeraies RT il y a une différence hautement significative ($P < 0,001$) entre les stocks de carbone sous andain (27 MgC.ha^{-1}) et dans l'interligne ($\sim 18 \text{ MgC.ha}^{-1}$) à partir de l'âge adulte. Quel que soit le mode de gestion des feuilles, le stock de carbone dans l'interligne varie très peu au cours du temps et reste proche de la valeur moyenne de 20 MgC.ha^{-1} du stock de carbone dans les palmeraies jeunes (état initial du sol à la plantation). Le tableau d'analyse de variance est présenté en annexe 3.

Les estimations des variances présentées dans le tableau 4.3 montrent que la variabilité intra parcellaire (variance de l'effet arbre + variance de l'effet lieu de prélèvement) des stocks de carbone estimée grâce aux 120 échantillons individuels est d'importance comparable à la variabilité inter parcellaire.

Tableau 4.2. Stocks de carbone (Mg.ha^{-1}) pour $200 \text{ kg sol.m}^{-2}$ ($\sim 0\text{-}20 \text{ cm}$) de masse de terre équivalente dans la chronoséquence de palmeraies par position en fonction du mode de gestion des feuilles.

Mode_gestion des feuilles	Position	Chronoséquence (an)			
		4 - 6 (initial)	7 - 12	13 - 20	> 20
RN	Ligne	$16,2^b \pm 2,1$	$20,3^b \pm 2,7$	$15,8^c \pm 2,7$	ND
	Interligne	$16,6^b \pm 2,1$	$19,8^b \pm 2,7$	$20,6^b \pm 2,7$	ND
RT	Andain	ND	$20,2^b \pm 2,7$	$26,9^a \pm 2,0$	$32,3^a \pm 3,9$
	Interligne	ND	$15,7^b \pm 2,7$	$17,5^b \pm 1,9$	$15,2^b \pm 3,3$

RN et RT désignent respectivement les modes de restitution nulle et totale des feuilles. ND indique les valeurs non disponibles (pas de palmeraies villageoises identifiées pour ces âges). Les stocks de carbone sont présentés avec $\pm$ les erreurs standard. Dans chaque ligne et colonne par mode de gestion, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$; test de Tukey).

Tableau 4.3. Valeurs estimées des paramètres de variance des stocks de carbone

Source de variation	Valeur estimée	Erreur type
Parcelle	30,3	11,9
Arbre+lieu de prélèvement	58,2	12,1

4.4 Discussion

4.4.1 Biomasse des andains et leur taux de couverture du sol

La biomasse de feuilles au sol dans les palmeraies adultes (13-20 ans) est d'environ deux fois celle des palmeraies pré-adultes. La restitution annuelle des feuilles pendant une dizaine d'années dans les palmeraies adultes est à l'origine de cette différence. Hartmann (1991) et Aholoukpè et al. (2013b) ont montré respectivement en Côte d'Ivoire et au Bénin que 10 t.ha^{-1} de biomasse de feuilles sont recyclables par an dans les palmeraies, soit 100 t.ha^{-1} en 10 ans. En considérant ces estimations, les 80 t.ha^{-1} de feuilles présentes au sol dans notre étude, après 10 ans d'accumulation, équivalent à une perte par minéralisation de 20 t.ha^{-1} . Cette perte paraît faible car elle montre qu'il faut 5 années pour une minéralisation des 10 t.ha^{-1} restituées en une année. Nous pouvons faire l'hypothèse que les nouvelles arrivées de feuilles posées sur les anciennes feuilles seraient de moins en moins en contact avec le sol et les organismes décomposeurs. Mais on peut également penser que la méthode de mesure des andains aurait surestimé les biomasses. En effet, il n'existe pratiquement pas d'étude ayant estimé la biomasse des andains par mesure directe au champ de toute la masse de feuilles au sol. Cela justifie l'inexistence d'une méthode rigoureusement établie pour l'activité. Ainsi, la méthode utilisée dans notre cas pourrait être un peu biaisée, car il existe une large distribution des masses sèches individuelles autour de la moyenne vu que les écart-types sont élevés et varient de 11 à 29 t.ha^{-1} selon les classes d'âge. La difficulté de réaliser un échantillonnage assez représentatif de l'andain pour la détermination du taux de matière sèche, et la possibilité de la présence de terre apportée par les organismes décomposeurs sur les feuilles en décomposition peut être à l'origine d'une surestimation des valeurs obtenues.

Mais cela n'empêche pas de comparer nos estimations à celles faites pour d'autres agro-systèmes. Ainsi, la biomasse de feuilles de palmier (80 t.ha^{-1}) restituée à l'hectare en dix ans dans nos travaux, est largement supérieure à la litière accumulée (22 t.ha^{-1}) au sol pendant 14 ans dans une plantation d'eucalyptus au Congo (Nouvellon et al., 2011), et à celle ($4,6 \text{ t.ha}^{-1}$) d'une végétation naturelle de savane de Karité (*Vitellaria paradoxa*) et de Néré (*Parkia biglobosa*) au nord du Bénin (Saïdou et al., 2012). Dans une chronoséquence de plantations de cacao au Ghana, Isaac et al. (2005) ont estimé la biomasse de litière au sol à 3,2, 6,9 et $10,4 \text{ t.ha}^{-1}$ pour des plantations de 2, 15 et 25 ans.

En considérant une teneur moyenne de 48% de carbone dans les feuilles du palmier (Jaffré, 1983), nos résultats montrent que les palmeraies villageoises séquestrent dans les andains de feuilles (en restitution totale) 22 tC.ha^{-1} et 38 tC.ha^{-1} en 4 ans et 10 ans de restitution, contre

2,35 tC.ha⁻¹ dans la litière sous la végétation naturelle de savane de Karité et Néré du Nord-Bénin (Saïdou et al. 2012). Barthès et al. (2006) ont estimé à 40 tC.ha⁻¹ le stock de carbone dans la biomasse de mucuna restituée au sol pendant 10 ans dans l'association maïs - mucuna sur terre de barre du sud-Bénin.

La biomasse de feuilles au sol (48 t.ha⁻¹) dans les vieilles palmeraies (> 20 ans) est inférieure à celles des palmeraies adultes du fait de la diminution du nombre de feuilles à élaguer par arbre. En effet, dans cette étude, les palmeraies d'âge supérieur à 20 ans ont toutes au moins 23 ans. A partir de cet âge, les palmiers sont assez hauts, leur entretien devient difficile pour les paysans et leur production de feuilles diminue (Aholoukpè et al., 2013a).

Nos résultats ont montré que le taux de couverture du sol par les feuilles restituées dans les palmeraies pré-adultes est inférieur à celui des autres âges de palmeraies bien que la différence ne soit pas significative au seuil de 5%. Les feuilles élaguées étant restituées suivant un dispositif presque identique à tous les âges de plantation (Aholoukpè et al., 2013a), dans les palmeraies pré-adultes les feuilles ont donc des dimensions (longueur et largeur) inférieures aux feuilles des palmiers d'âge supérieur. En effet, la croissance de la feuille du palmier à huile décrite par de Berchoux et al. (1986), von Uexküll et al. (2003), montre que la longueur et la largeur de la feuille augmentent très rapidement au jeune âge des palmiers (0 à 6 ans) et atteignent la fin de leur croissance entre 10 et 12 ans. La croissance de la feuille du palmier est influencée par l'origine génétique du matériel végétal planté (Ng et al., 2003b ; von Uexküll et al., 2003). Mais le matériel végétal planté dans les palmeraies villageoises du Bénin (Déli x La Mé, ou Déli x Yangambi) ayant des dimensions foliaires presque identiques (de Berchoux et al., 1986), ce facteur n'intervient pas.

4.4.2 Variabilité spatio-temporelle du stock de carbone du sol

La pratique culturale de gestion des feuilles d'élagage a induit une variabilité spatio-temporelle du stock de carbone du sol et a modifié le profil du sol et la densité apparente. La restitution des feuilles en andain a enrichi les horizons de surface en matière organique et a créé des horizons qui ne sont pas équivalents aux horizons dans l'interligne jusqu'à 35-40 cm de profondeur où commence l'horizon B. La formation de l'horizon F de litière de feuilles en décomposition et mélangée à de la terre remontée en surface par les organismes décomposeurs est à l'origine du micro-relief créé au pied du palmier de l'andain vers l'interligne. Il existe sous andain un surelèvement de sol en forme de motte de terre légère créant une pente vers l'interligne. Le foisonnement du sol au niveau des horizons F et A0 a induit une difficulté d'identification de la surface du sol sous andain ; ie le niveau zéro du sol

marquant le début de l'horizon A0. Des prélèvements de sol sous andain nécessitent donc des précautions pour identifier exactement ce niveau zéro du sol.

L'augmentation des valeurs de densité apparente avec la profondeur (figure 4.6a et 4.6b) renseigne sur la compacité progressive du sol vers la profondeur (Djègui, 1992). Elle serait due aux caractéristiques des terres de barre dont le taux d'argile augmente avec la profondeur : 5 à 15 % d'argile dans les 20 à 30 premiers centimètres du sol ; 35 % entre 30 et 60 cm de profondeur et 45 à 50 % au-delà de 60 cm de profondeur (Azontondé, 1991).

La restitution des feuilles a baissé la densité du sol puisque quel que soit l'âge des palmeraies, les valeurs de densité du sol sous les andains sont très inférieures à celles de l'interligne RT et de la ligne et interligne RN qui ne varient pas beaucoup. Mais cet effet reste dans les 15 premiers centimètres du sol, puisqu'à 20 cm les valeurs de densité varient très peu dans tous les cas. Nodichao (2008) avait observé pour les sols sous palmeraie de la même région, des valeurs moyennes de densité apparente variant de 1,4 à 1,6 g.cm⁻³ pour une profondeur de 0-50 cm. L'auteur affirma que la densité apparente variait avec la profondeur sans jamais dépasser la valeur de 1,7g.cm⁻³. Lardy et al. (2002) avaient trouvé des valeurs de densité apparente de sol égales à 0,72 g.cm⁻³ et 0,56 g.cm⁻³ sur 0-10 cm de profondeur, respectivement sous une végétation naturelle de savane et sous une galerie forestière de la région du Cerrado au Brésil.

Dans notre étude, le foisonnement du sol sous andain dû à l'activité biologique intense et le développement important de racines fines, auraient augmenté la porosité du sol et baissé la densité apparente jusqu'à des valeurs très faibles ($\sim 0,7\text{g.L}^{-1}$) à 0-5 cm dans les palmeraies adultes. Les conséquences de cette augmentation de porosité sur la perméabilité et l'aération du sol sont évidentes. A l'opposé, une porosité faible peut réduire l'infiltration de l'eau et exposer le sol à l'érosion (Djègui, 1992 ; Fare et al., 2008 ; Bertolino et al., 2010 ; Fan et al., 2013). La présence de pente orientée de l'andain vers l'interligne (figure 4.5) et la plus faible porosité du sol dans l'interligne pourraient créer dans cette zone des conditions hydrodynamiques favorables au maintien voire au développement d'horizons lessivés.

L'effet de la durée de restitution des feuilles s'observe par des valeurs de densité apparente plus faibles en 10 ans de restitution (palmeraies 13-20 ans) qu'en 4 ans (palmeraies 7-12 ans). Nos résultats confirment ceux de plusieurs études qui ont prouvé l'effet du recyclage des ressources organiques sur les propriétés physiques du sol, notamment la densité apparente et la porosité du sol (Pervaiz et al., 2009 ; Jordan et al., 2010 ; Fasinmirin et Reichert, 2011 ; Kahlon et al., 2013). Selon Boivin et al. (2009), l'augmentation du carbone organique du sol

entraîne habituellement une augmentation de la stabilité du sol, de la capacité de rétention en eau et de la porosité (baisse de la densité apparente).

La restitution des feuilles d'élagage en andain induit un effet positif sur le stock de carbone dans cette zone par rapport à l'interligne. Cet effet est progressif au cours du temps et devient net après une dizaine d'années de recyclage des feuilles (tableau 4.2), où le stock de carbone augmente de plus de 40% par rapport au stock initial sur les 20 premiers centimètres de sol. Ce résultat concorde avec l'importante biomasse d'andain mesurée dans les palmeraies adultes. Le stock de 27 MgC.ha⁻¹ obtenu à 0-20 cm sous andain après 10 ans de restitution des feuilles, est proche des 30 MgC.ha⁻¹ trouvés par Djègui et al. (1992) à 0-35 cm de profondeur de sol sous andain dans les palmeraies adultes de la même région. De même, ce stock est comparable au stock de 22 MgC.ha⁻¹ trouvé par Frazão et al. (2013) sur une profondeur de 0-20 cm sous andain dans les palmeraies industrielles de 25 ans au Brésil. Les andains de feuilles occupent 10% de la superficie d'une palmeraie. En considérant les stocks de carbone sous les andains et dans les interlignes (90% de la superficie d'une palmeraie), on obtient dans une palmeraie adulte en mode RT, un stock moyen d'environ 21 MgC.ha⁻¹ (27*10% + 20*90%) sur un hectare de palmeraie. Cette valeur reste inférieure au stock de 48 MgC.ha⁻¹ estimé à la même profondeur (0-20 cm) dans un sol sous forêt secondaire de Singapour (Ngo et al. 2013) et dans un sol sous végétation naturelle de la savane du Cerrado (46 MgC.ha⁻¹) au Brésil (Lardy et al. 2002). Djègui et al. (1992) avaient trouvé sur une profondeur de 0-35 cm, un stock de 48 MgC.ha⁻¹ dans un sol sous forêt à Pobè au Bénin. Dans des systèmes de cultures en couloir au Nigeria composé de *L. Leucocephala* et de *S. Siamea* avec rotation maïs - niébé, le stock de carbone pour 170 kg sol.m⁻² (~ 0 - 12 cm) de masse de terre équivalente était en moyenne de 11,5 MgC.ha⁻¹ après 12 ans de culture (Diel et al., 2004). Sous la végétation naturelle de savane de Karité et Néré dans le Nord-Bénin, Saïdou et al. (2012) ont trouvé un stock de carbone de 3 MgC.ha⁻¹ sur une profondeur de 0 - 20 cm.

En restitution nulle des feuilles, le stock de carbone dans l'interligne des parcelles adultes paraît légèrement plus élevé que le stock sur la ligne de plantation. L'observation des valeurs individuelles des stocks de chaque parcelle a montré que cette différence est due à une parcelle dont le stock de carbone, plus important, a influé sur la moyenne. Toutefois, cette moyenne de 20,6 MgC.ha⁻¹ obtenue dans l'interligne des parcelles adultes RN ne semble pas hors-norme au vu de la variabilité des stocks de carbone observée dans toutes les situations de restitution nulle des feuilles. Par ailleurs, les différences entre les stocks de carbone des interlignes RT et RN, même si elles ne sont pas statistiquement significatives, seraient dues à

notre dispositif où le nombre de répétitions par âge et par mode de gestion des feuilles n'est pas équilibré.

L'inexistence de variabilité temporelle du stock de carbone du sol dans les plantations RN est due aux conditions de non restitution de la matière organique recyclable. Les valeurs de stocks n'ont pas beaucoup changé par rapport au jeune âge qui représente l'état initial du sol au début des plantations. On pourrait émettre l'hypothèse qu'au fur et à mesure de la croissance des palmiers, le déficit de matière organique dans le sol serait compensé par la décomposition des recrus végétatifs dans les palmeraies (végétation du sous-bois) et le turnover des racines des palmiers et de la végétation du sous-bois.

Il faut remarquer que le stock initial de 20 MgC.ha^{-1} montre que les sols étudiés sont pauvres en matière organique car ce stock est obtenu avec une teneur moyenne de carbone de $8,6 \text{ g.kg}^{-1} (< 10 \text{ g.kg}^{-1})$ sur la profondeur 0-20 cm.

Dans toutes les palmeraies étudiées, la variabilité intra parcellaire des stocks de carbone n'est pas négligeable. Son estimation avec suffisamment de degrés de liberté grâce aux échantillons individuels permet d'accroître la puissance des tests de comparaison entre positions au sein des parcelles. Le nombre d'échantillons de sol est certes plus important mais cela a permis d'avoir plus de certitude en ce qui concerne l'absence de différence observée entre les stocks des lignes et interlignes des parcelles RN. L'existence de variabilité spatiale intra parcellaire des stocks de matière organique dans les sols sous palmeraies du Bénin avait été prouvée par Djègui et al. (1992) qui ont affirmé que cette variabilité spatiale est due au mode de conduite sur billons des cultures vivrières associées au jeune âge de plantation et au mode de plantation en ligne et la restitution en andains des matières végétales résultant de l'élagage des palmiers.

4.5 Conclusion du chapitre 4

Le recyclage des feuilles d'élagage en palmeraies villageoises a modifié le profil du sol, créé des horizons de surface plus riches en matière organique, baissé la densité apparente du sol et induit une variabilité spatio-temporelle du stock de carbone organique. Les sols des palmeraies villageoises du Bénin constituent un véritable "puits de carbone" lorsque les feuilles d'élagage sont restituées au sol. Ces feuilles sous forme d'andains occupent 10% de la superficie plantée et séquestrent en 10 ans de restitution, 38 MgC.ha^{-1} au sol. De même, le recyclage des feuilles d'élagage pendant 10 ans a augmenté le stock de carbone du sol qui a atteint 27 MgC.ha^{-1} sur 0-20 cm de profondeur sous andain. Ce stock s'ajoute à celui des interlignes pour donner un stock total de 21 MgC.ha^{-1} au sol dans la palmeraie. Ce potentiel des sols en tant que "puits de carbone" en mode de restitution totale des feuilles est nettement

supérieur à celui d'autres systèmes agricoles et agro-forestiers de changement d'utilisation des terres sous forêts. Il reste toutefois inférieur au potentiel des sols forestiers présenté dans la littérature. La variabilité temporelle du stock de carbone dans les palmeraies en exportation totale des feuilles est pratiquement nulle ; ce résultat est probablement dû à la compensation des pertes de matière organique dans les palmeraies adultes par les recrues végétatifs et le turn-over racinaire.

Nos travaux ont aussi fait ressortir les difficultés rencontrées pour l'échantillonnage d'un mélange hétérogène de matière organique pour en déterminer le taux de matière sèche. De même, l'étude a été contrainte à un déséquilibre des effectifs des palmeraies de la chronoséquence virtuelle en raison d'un travail en milieu réel.

Conclusion de la deuxième partie

Le diagnostic agro-pédologique a montré que dans le département du Plateau, les terres de barres constituent le type de sol le plus planté avec le palmier à huile. On y rencontre des palmeraies de différents âges. Elles sont jeunes (0-6 ans), pré-adultes (7-12 ans), adultes (13-24 ans) ou vieilles (≥ 25 ans). Elles appartiennent pour la plupart à de petits producteurs dont les moyens financiers très limités ne permettent pas la plantation de grandes superficies ni l'application des engrais minéraux. A l'opposé, les moyens financiers des grands producteurs (minoritaires dans le département) leur permettent de planter de grandes superficies. De façon générale, les palmeraies villageoises ont des caractéristiques communes qui sont l'association quasi systématique des jeunes palmiers avec des cultures vivrières très variées, les précédents culturels constitués pour la plupart de champs de cultures vivrières et une fertilisation minérale mal ou peu respectée. Les pratiques de restitution des sous produits de transformation, limités à quelques grands producteurs et les modes de gestion des feuilles d'élague, distinguent les palmeraies villageoises. La gestion des feuilles d'élague commence à 7 ans d'âge des palmeraies et va d'une restitution quasi-totale à une restitution nulle de ces feuilles au sol.

Ces caractéristiques des palmeraies ont offert la possibilité de choisir une chronoséquence de palmeraies essentiellement différentes de par deux modes contrastés de gestion des feuilles d'élague : la restitution totale et la restitution nulle des feuilles. L'évaluation du stock de matière organique du sol dans cette chronoséquence a montré que les palmeraies villageoises constituent, comparativement à d'autres utilisations non forestières des terres, un véritable "puits de carbone" de par la restitution en andains des feuilles d'élague. Dans ces palmeraies on observe un effet de la restitution totale des feuilles à partir de l'âge adulte où le stock de

carbone sous les andains est significativement supérieur (27MgC.ha^{-1}) à celui des palmeraies préadultes (20MgC.ha^{-1}) en restitution totale. La restitution des feuilles en andains a généré un retour au sol d'environ 80Mg matière sèche. ha^{-1} dans les palmeraies adultes (10 ans de restitution), équivalent à un stock de carbone de 38MgC.ha^{-1} . Dans ces palmeraies adultes en mode de restitution totale des feuilles, le stock de carbone dans le sol sur 0-20 cm de profondeur est de 21MgC.ha^{-1} . Ce stock est supérieur à celui d'autres systèmes agricoles et agro-forestiers ; mais il reste inférieur au potentiel des sols forestiers.

De manière assez inattendue, la restitution nulle n'a pas baissé le stock de carbone du sol au cours du temps ; ce qui peut être dû à un équilibre entre la minéralisation de la matière organique du sol et l'incorporation de la matière organique des adventices, inflorescences males et racines mortes.

L'une des limites à cette étude exploratoire a été la difficulté de vérification de la durée réelle du mode de gestion des feuilles d'élagage. Les informations à ce sujet proviennent exclusivement des paysans en raison de l'inexistence de données sur le suivi des pratiques culturales des propriétaires par les services d'encadrement agricole. De ce fait, on a été contraint de choisir une chronoséquence dont la fiabilité des durées de restitution des feuilles est liée à la mémoire des personnes enquêtées. De même, face à une culture pérenne dont le système racinaire va dans les couches profondes du sol, le choix de 20 cm de profondeur pour l'évaluation du stock de matière organique du sol peut paraître insuffisant.

En définitive, l'étude exploratoire a permis de valider la première hypothèse formulée dans la première partie de cette thèse (H1 : existence dans la zone d'étude de types de palmeraies villageoises se distinguant par des facteurs pédologiques, agronomiques et socio-économiques) et de préciser de quelle manière celle-ci se vérifie. A travers l'évaluation du stock de carbone organique du sol dans une chronoséquence, cette étude exploratoire a également permis de conforter la seconde hypothèse (H2 : induction d'effets significatifs des modes de gestion des feuilles d'élagage sur le sol et la plante, qui varient selon les âges des palmeraies) en validant la sous-hypothèse H2a (effets sur le stock de carbone du sol). Cette étude de chronoséquence a toutefois montré la nécessité d'approfondir les investigations sur la matière organique et les propriétés du sol au-delà de 20 cm de profondeur dans un contexte de gestion contrastée des feuilles d'élagage (restitution nulle ou totale des feuilles). Par ailleurs, il reste à étudier les biomasses et les minéralo-masses de la plante pour tester plus précisément l'hypothèse H2, et évaluer l'état et les performances des palmeraies villageoises pour obtenir des conclusions sur la durabilité de ce système de culture.

C'est pourquoi la troisième partie de ce document sera consacrée à une étude plus approfondie des compartiments «sol et plante» des palmeraies villageoises, en fonction du mode de gestion des feuilles d'élague.

TROISIEME PARTIE

**Effet du mode de gestion des feuilles d'élagage
sur les compartiments aériens et souterrains des
palmeraies : Approche inter et intra parcellaire**

Troisième partie : Effet du mode de gestion des feuilles d'élitage sur les compartiments aériens et souterrains des palmeraies : Approche inter et intra parcellaire

Introduction de la troisième partie

Dans cette troisième partie, les questions ont été approfondies sur l'étude du compartiment "sol et plante" afin de vérifier les hypothèses H2.b.) il existe une variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol due à la gestion des feuilles d'élitage, et H2.c.) les biomasses et minéralomasses du palmier à huile sont modifiées par les modes de gestion des feuilles.

Au vu des résultats de la partie précédente, 12 palmeraies ont été choisies dans la choronoséquence de 22 palmeraies. Elles appartiennent aux classes d'âge pré-adulte et adulte, et représentent les deux modes contrastés de gestion des feuilles : RT et RN. Parmi ces 12 palmeraies, une palmeraie se trouve sur la station de recherche de Pobè. C'est une palmeraie RT qui a été assimilée aux autres palmeraies RT villageoises à cause de la similarité de la gestion des feuilles d'élitage.

Les neuf arbres choisis au départ (cf. chapitre 2 - paragraphe 2.3.1.1, et chapitre 4 - paragraphe 4.2.3) par parcelle ont été maintenus pour la suite des observations dans cette troisième partie. Toutefois, les nombres de palmeraies et d'arbres par parcelle ont été adaptés aux objectifs de chaque étude et au temps imparti pour les travaux à conduire. Le détail sur le choix des palmeraies et des arbres observés sont présentés dans la section "matériels et méthodes" du premier chapitre de cette partie (chapitre 5).

Par rapport au chapitre 4 qui présente juste une évaluation du stock de matière organique du sol (MOS) sur 0-20 cm, le chapitre 5 approfondit les études de sol en étudiant dans une première section le stock de matière organique et les paramètres physico-chimiques du sol sur 0-50 cm, puis dans une deuxième section la biomasse microbienne et la respiration du sol.

Dans le chapitre 6 l'état nutritionnel et les performances des palmeraies en termes de production de régimes et de biomasses végétatives aériennes sont étudiées. Ce chapitre présente les méthodes non destructrices mises au point pour l'estimation des biomasses des feuilles et des troncs des palmeraies. Enfin, le chapitre 7 présente les résultats d'étude du développement du système racinaire des palmeraies villageoises.

Les palmiers observés ont fait l'objet d'analyses génétiques pour identifier leurs origines. Ces origines ont été prises en compte dans les études de biomasse aérienne et racinaire.

Du fait de la connexion entre les compartiments souterrains et aériens des palmeraies et de la présentation des résultats sous forme d'articles (préarticles destinés à publication et articles publiés), des parties de la section "matériels et méthodes" de certains chapitres sont parfois reprises dans d'autres chapitres.

Chapitre 5 : Gestion des feuilles d'élague et caractéristiques biophysico-chimiques du sol

Ce chapitre a été rédigé en deux sections présentées sous forme de pré-articles complétés, le cas échéant, par quelques renvois à d'autres chapitres du présent document de thèse. Le premier pré-article a rapporté les résultats d'étude du stock de matière organique et des propriétés physico-chimiques du sol. Dans le deuxième pré-article, la biomasse microbienne et la respiration du sol ont été étudiées.

5.1 Introduction du chapitre 5

Le rôle du recyclage des ressources organiques (d'origine végétale ou animale) dans l'amélioration de la matière organique et des propriétés du sol est reconnu et démontré dans plusieurs études scientifiques. Dans les agro-systèmes à base de palmier à huile, il existe plusieurs ressources organiques recyclables au sol : les feuilles d'élague, les rafles et autres sous-produits de transformation des régimes, et même les troncs des palmiers lors d'une replantation (Khalid et al., 2000a, b et c). Des auteurs ont montré que la culture du palmier à huile peut impacter le taux de matière organique du sol lorsque sa biomasse aérienne est restituée au sol (Jaffré, 1983 ; Djègui et al., 1992 ; Khalid et al., 2000a).

Dans les palmeraies villageoises du Bénin, le potentiel des ressources organiques recyclables dans l'amélioration de la matière organique et d'autres propriétés du sol a été très peu étudié. La qualité de ces sols est donc très peu connue. Dans ces palmeraies, la diversité des modes de gestion des feuilles d'élague, allant d'une restitution totale à une restitution nulle des feuilles (Aholoukpè et al., 2013a) peut avoir un effet sur les teneurs en matière organique du sol et donc sur l'activité microbienne (Stefanowicz et al., 2012) et sur d'autres paramètres physico-chimiques du sol (Khalid et al., 2000a). Les effets de la gestion des feuilles d'élague des palmeraies villageoises sur la matière organique et sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols méritent donc d'être étudiés. Des investigations sur la contribution du recyclage des feuilles d'élague aux différentes fractions de la matière organique du sol peuvent également permettre d'évaluer le rôle de cette pratique dans la stabilité de la matière organique du sol.

Le présent chapitre tentera de répondre à ces préoccupations à travers les deux sous-chapitres ci-après, rédigés sous forme de pré-article.

5.2 (Pré-article) : Matière organique et propriétés physico-chimiques d'un sol ferrallitique sous palmeraie villageoise du sud-Bénin : effet de la gestion des feuilles d'élagage des palmiers.

5.2.1 Introduction

Il est reconnu dans plusieurs études que la matière organique du sol est le réservoir des éléments nutritifs des plantes et interagit avec les particules minérales pour déterminer l'agrégation et les autres propriétés physico-chimiques du sol (Craswell, 2001 ; Nadwa, 2001 ; Diels et al., 2004 ; Manlay, 2007 ; Rossi et al., 2009). De ce fait, les pratiques de bonne gestion de la matière organique des sols sont encouragées dans les agro-systèmes, notamment sur les sols tropicaux. Selon Merckx et al. (2001) cités par Barthès et al. (2006), la gestion de la matière organique des sols est reconnue comme une pierre angulaire pour la réussite de l'agriculture dans la plupart des régions tropicales, avec ou sans l'application d'engrais minéraux. Frisque (2007) affirme que les pratiques d'amélioration du bilan organique du sol consistent soit à augmenter les apports de matières organiques (enfouissement d'engrais verts et de résidus de récolte, apports de MO exogènes), soit à réduire les pertes de MOS en ralentissant leur minéralisation (techniques de labour réduit, semis direct). Selon Khalid et al. (2000b), dans les systèmes agricoles tropicaux, il existe un intérêt croissant d'amélioration de la productivité du sol par l'utilisation des résidus de récolte qui peut réduire les apports extérieurs d'engrais minéraux.

Dans les agro-systèmes à base de palmier à huile, différentes ressources organiques comme les rafles, les feuilles d'élagage, les sous produits d'usinage et les biomasses des vieux palmiers (dans le cas des replantations) peuvent être recyclés pour la restauration de la matière organique du sol et pour améliorer sa fertilité physique et chimique (Khalid et al., 2000a, b et c ; Corley et al., 2003).

Dans les palmeraies villageoises du Bénin en cours de production, les ressources organiques recyclables sont les résidus des cultures vivrières associées aux jeunes palmiers, les rafles et les feuilles d'élagage des palmiers (Djègui et al. 1992 ; Aholoukpè et al. 2013). Ces feuilles d'élagage qui représentent entre 4 et 8 tonnes de biomasse sèche à l'hectare (Aholoukpè et al. non publiés) font l'objet d'une gestion assez diversifiée allant de i) la restitution totale de ces feuilles au sol sous forme d'andain à ii) l'exportation totale des feuilles d'élagage, qui représente une pratique dominante dans ces plantations villageoises (Aholoukpè et al., 2013). Selon Khalid et al. (2000a), l'exportation de la biomasse du palmier à huile a des implications sur la gestion de la palmeraie en termes de maintien de la matière organique et de la fertilité

du sol. L'épuisement des sols tropicaux en matière organique a été reconnu depuis longtemps comme étant lié à un important processus de dégradation dans ces environnements où la culture est pratiquée sans restitution de la matière organique (Nandwa, 2001). Dès lors une bonne gestion de la biomasse disponible dans ces palmeraies (retournement au sol par décomposition) permettrait une restitution des éléments nutritifs exportés (Khalid et al., 1999). Djègui (1995) a montré le rôle des pratiques culturales adoptées dans les palmeraies du Bénin sur le stock et la variabilité de la matière organique du sol. L'auteur affirme l'existence d'une variabilité spatiale de la MOS liée d'une part aux pratiques culturales propres aux cultures vivrières conduites sur billons dans les jeunes plantations, et d'autre part, au mode de plantation en ligne et de restitution en andains des matières végétales qui résultent de l'élague des palmiers. Le retournement au sol de la biomasse du palmier à huile pourrait constituer de par sa décomposition, un apport supplémentaire d'éléments nutritifs notamment d'azote et de potassium, et constituer une contribution dans l'apport extérieur de fertilisants nécessaires à l'obtention d'une meilleure production. Selon Khalid et al. (2000a), l'utilisation des résidus de récolte de palmier pour améliorer la fertilité du sol dans les palmeraies n'est pas une nouvelle pratique. Mais c'est le potentiel de cette pratique dans la fourniture des nutriments au sol sous palmeraies qui a été peu étudié (Djègui, 1992 ; Law et al., 2009 ; Nelson et al., 2011). Dans cet article, nous étudions l'effet de deux modes de gestion des feuilles élaguées du palmier à huile sur les propriétés physico-chimiques du sol.

5.2.2 Matériels et méthodes

5.2.2.1 Milieu d'étude

L'étude a été conduite dans le département du Plateau situé au Sud-Est du Bénin (figure 5.2.1). Le climat est de type subéquatorial, caractérisé par une alternance de deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches, d'importances inégales. On enregistre une hauteur moyenne de 1300 mm de pluie par an et un déficit hydrique (différence entre évapotranspiration potentielle et pluviosité) variant entre 600 et 800 mm (Nouy et al., 1999). Les sols de cette étude font partie du type de sol le plus cultivé en palmier à huile dans le département (Aholoukpè et al., 2013a). Ils appartiennent à la famille des sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris en argile (Volkoff et Willaime, 1976). Ils sont communément appelés "terre de barre" et ont été décrits par Azontondé (1991), Amadji et Aholoukpè (2008). Dans le système de classification de la FAO, il s'agit de *ferralsol rhodique*, mollique sous forêt et ochrique sous culture, et pour la *Soil Taxonomy* USDA, ce sont des sols *Eutruxox* (Djègui et al. 1992).

La végétation est dominée par des savanes arborées et arbustives, des palmeraies plantées avec le matériel végétal sélectionné appelées "palmeraies sélectionnées", et des palmeraies issues de régénération naturelle (désignées par "palmeraies naturelles"), des jachères arbustives, des îlots de forêts semi-décidues et des galeries forestières (Djègui, 1992).

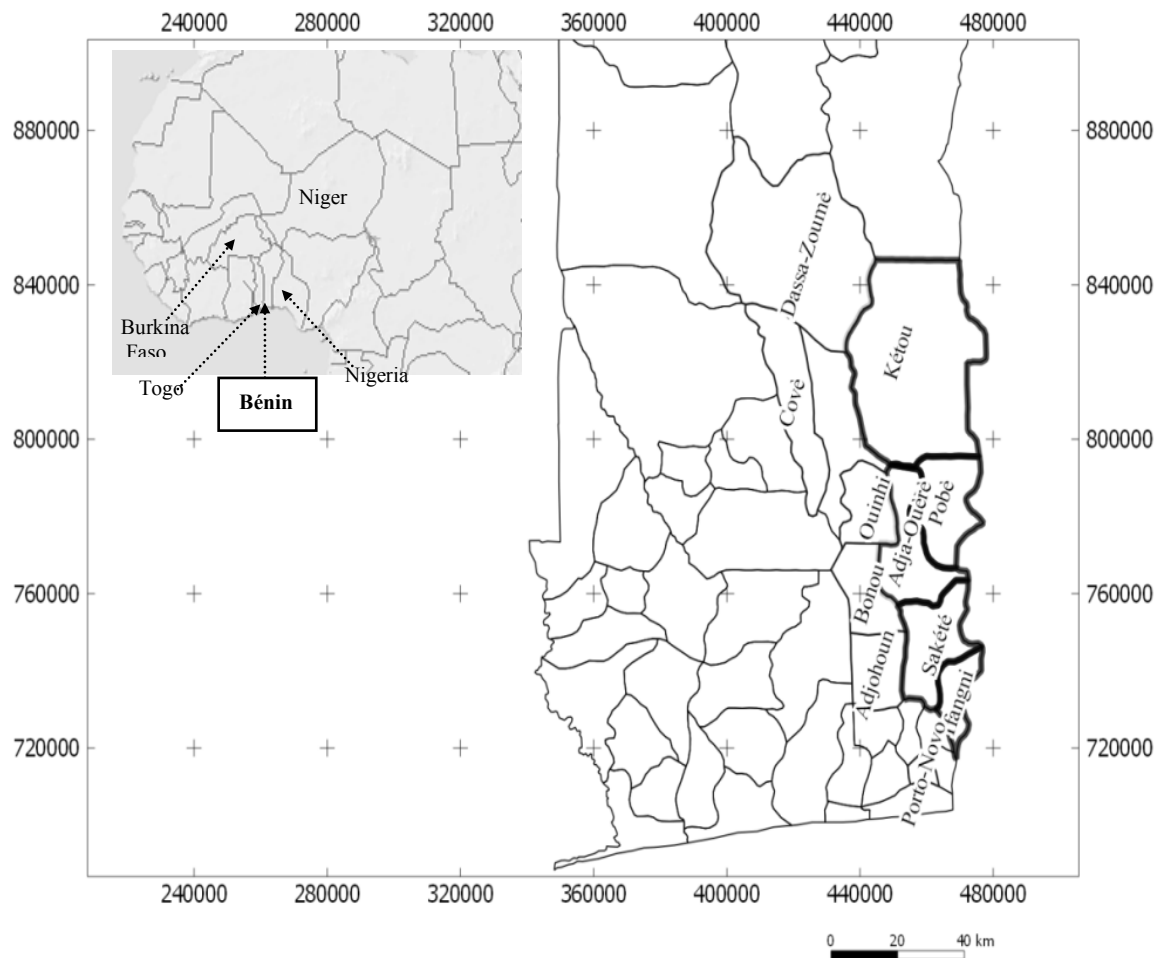


Figure 5.2.1 : La zone d'étude. Les cinq communes du département du Plateau sont en contour gras. Les palmeraies étudiées sont majoritairement situées dans les communes de Sakété et d'Adja-Ouère.

5.2.2.2 Choix des palmeraies

Douze palmeraies villageoises caractérisées par les modes de restitution totale (RT) et de restitution nulle (RN) des feuilles ont fait objet de cette étude. Elles ont été choisies parmi les 22 palmeraies étudiées dans le chapitre 4. Elles appartiennent à deux classes d'âge identifiées durant l'étude de la typologie des palmeraies villageoises : l'âge préadulte (7 - 12 ans) et l'âge adulte (13-20 ans) (Aholoukpè et al., 2013a).

En pratique, les palmeraies pré-adultes choisies ont des âges de 7 à 11 ans et celles adultes ont des âges de 16 à 19 ans. Les observations dans les palmeraies ont été faites au niveau de 6 palmiers choisis de façon aléatoire sur une superficie d'1 ha.

Le nombre de palmeraies a varié selon deux niveaux d'étude :

i) dans un premier niveau, les douze palmeraies ont toutes été retenues pour étudier l'effet du mode de gestion des feuilles sur le stock de carbone et d'azote sur 0 - 50 cm de profondeur du sol. A cet effet, un dispositif factoriel a été adopté et comporte deux facteurs de deux modalités chacun :

✓ Facteur 1 : Mode de gestion des feuilles d'élagage

- restitution totale des feuilles (RT)
- restitution nulle des feuilles (RN)

✓ Facteur 2 : classe d'âge

- préadulte : 7 - 11 ans
- adulte : 16 - 19 ans

On obtient ainsi 4 traitements répétés 3 fois.

ii) dans un second niveau, parmi les douze palmeraies, les trois palmeraies adultes de mode RT ont été retenues pour étudier d'autres paramètres physico-chimiques du sol permettant d'apprécier sa fertilité (pH, cations échangeables, capacité d'échange cationique, et granulométrie) à deux positions de la plantation.

- sur la ligne de plantation sous les andains de feuilles d'élagage,
- dans l'interligne sans feuilles d'élagage.

Pour le deuxième niveau d'étude, seules les parcelles RT adultes ont été retenues en raison du chronogramme établi et en tenant compte des résultats du chapitre 4. Ces résultats avaient montré qu'il n'y avait pas de différence significative ($Pr = 0,359$) entre les stocks de carbone des interlignes des parcelles RT et RN et que l'effet de la restitution des feuilles sur la matière organique du sol est significatif à l'âge adulte. Les interlignes des parcelles RT peuvent donc être assimilées à une situation de restitution nulle pour l'étude des propriétés physico-

chimiques du sol. Du point de vue statistique, chaque position représente un traitement et le nombre de 3 parcelles a été le minimum de répétitions qu'on pouvait retenir pour les palmeraies. En considérant les six palmiers par parcelle, on obtient au minimum 18 répétitions par traitement.

5.2.2.3 Echantillonnage de sol et mesure des paramètres

Le sol a été étudié dans le dispositif de Voronoï qui définit des zones équivalentes autour du palmier (Nodichao, 2008). Du fait que les feuilles d'élague sont restituées en andain sur la ligne de plantation et au milieu de la distance entre deux palmiers, la zone Z3s du Voronoï simplifié (Dassou, 2011) située entre 2,5 et 4,5 m du tronc a été retenue. Cette zone occupe une partie représentative de l'espace couvert par les andains (figure 5.2.2). Ainsi, au niveau de chacun des 6 palmiers retenus par parcelle, les prélèvements ont été faits dans cette zone Z3s sous andain et dans la zone équivalente dans l'interligne, à 5 profondeurs : 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 et 30-50 cm.

Dans les palmeraies RT, les prélèvements ont été faits sous andain et dans l'interligne alors que dans les palmeraies RN, ils n'ont été effectués que dans l'interligne. Ce choix a été fait dans les palmeraies RN pour réduire le nombre d'échantillons en concordance avec le budget disponible. Il est justifié par les résultats du chapitre 4 qui ont montré l'absence de différences significatives entre les stocks de carbone dans la ligne et dans l'interligne des palmeraies RN. Les paramètres physico-chimiques du sol ont été déterminés par la méthode de la spectroscopie proche infra rouge (SPIR) (Barthès et al., 2006 ; Brunet et al., 2007 ; Aholoukpè, 2009) basée sur la prédiction des paramètres avec des modèles de régression établis à partir des résultats d'analyse par méthode conventionnelle d'un nombre réduit d'échantillons de sol.

Les méthodes conventionnelles d'analyse des sols au laboratoire s'appuient sur celles décrites par Pansu et Gautheyrou (2006). Les teneurs en carbone et azote organiques ont été déterminées par la méthode du CHN par combustion sèche totale du sol sous oxygène avec comme gaz vecteur l'hélium pur à 870°C. Le pH du sol a été déterminé par la méthode basée sur une mise en équilibre ionique entre la phase solide et la phase liquide. La mesure du pH se fait dans des conditions déterminées (rapport sol/solution = 1/2,5) de la différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongées dans une solution aqueuse en équilibre avec l'échantillon de sol.

La méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (1N, pH=7) puis un lavage du sol par le chlorure de potassium (1N), ont permis de déterminer les cations échangeables calcium (Ca),

magnésium (Mg) et potassium (K) et la capacité d'échange cationique (CEC). Les particules minérales du sol, argile, limon et sable ont été déterminées par la méthode de la pipette de Robinson.

5.2.2.4 Traitement et Analyses des données

La densité apparente du sol a été déterminée à chaque profondeur par la méthode classique de prélèvement du sol au cylindre de densité puis séchage à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant de sol sec. Les valeurs de densité apparente du sol ont servi à calculer la porosité du sol selon la formule :

Porosité (%) = $(1 - D_a/D_r) \times 100$ où D_a = densité apparente du sol et D_r = densité réelle du sol, généralement voisine de 2,65 (Aho et Kossou, 1997).

Les valeurs de densité apparente du sol et les teneurs en carbone et azote ont été utilisées pour calculer des stocks de carbone et d'azote par masse de terre équivalente (Ellert et Bettany, 1995) selon la procédure présentée dans le chapitre 4.

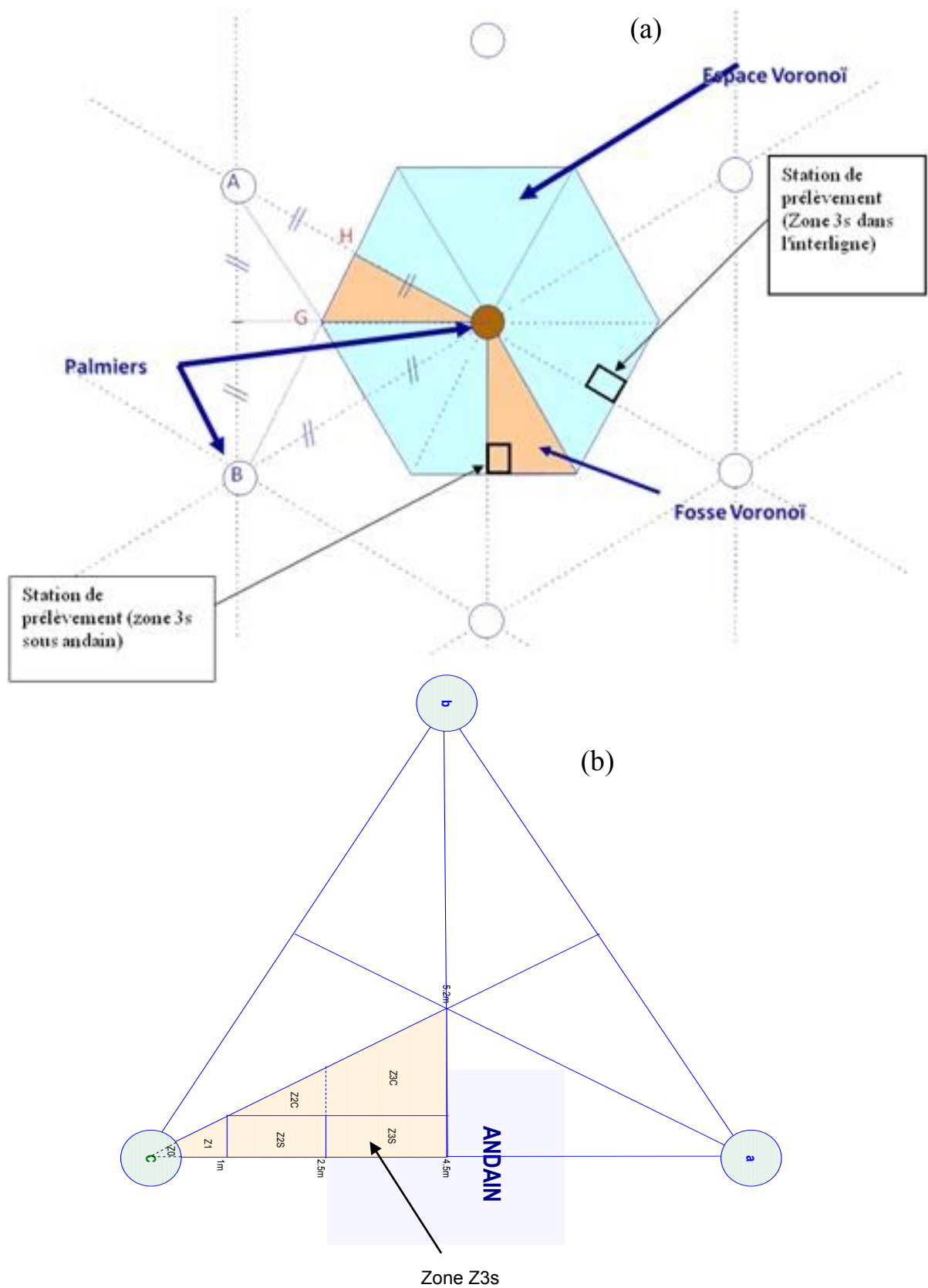
Dans cette étude la MTE fixée est de 650 kg.m^{-2} , proche de la masse totale de terre fine calculée sur la profondeur étudiée (50 cm) sous andain et dans l'interligne.

Les données ont fait l'objet d'un premier traitement avec tableaux croisés dynamiques qui a permis d'observer les premières tendances à l'aide de graphes.

Pour le premier niveau d'étude, (étude des 12 parcelles en mode de restitution RT ou RN), les stocks de carbone et d'azote par masse de terre équivalente ont permis d'étudier la variabilité spatiale de ces deux paramètres à l'échelle de la parcelle et au-delà de la profondeur de 20 cm de sol étudiée précédemment (cf. chapitre 4). L'effet des facteurs "classe d'âge", "mode de gestion des feuilles" et "positions" et leurs interactions ont été testés par des analyses de variances de type split-plot tenant compte de l'effet aléatoire des palmiers, des parcelles et des stations de prélèvement du sol. Les interactions ont été détaillées en testant l'effet de chaque facteur par tranches correspondant chacune à une combinaison des niveaux des autres facteurs (tests connus sous le nom de « tests of simple effects » (SAS, 2011). Des comparaisons multiples de moyennes par le test de Tukey ont permis le classement des moyennes.

Les données collectées dans les parcelles RT seules (deuxième niveau d'étude) ont permis d'apprécier la fertilité du sol sous andain et dans l'interligne. Les valeurs des paramètres physico-chimiques du sol ont été interprétées par rapport à des seuils qui définissent la richesse ou la pauvreté du sol en ces éléments. Les comparaisons ont été faites entre andain et interligne et par profondeur. Des relations ont été établies entre le taux de matière organique

et le taux des particules fines (argile + limons) du sol d'une part et entre la matière organique et la capacité d'échange cationique d'autre part.



5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Stocks de carbone et d'azote dans le sol

Les stocks de carbone et d'azote sur 50 cm de sol sont présentés par position (andain et interligne) dans chaque type de palmeraie appartenant aux deux classes d'âges (figure 5.2.3). Les stocks de carbone et d'azote sous andain sont significativement différents de ceux de l'interligne dans les palmeraies adultes RT 16-19 ans. La différence est très hautement significative ($P < 0,001$). Il n'existe pas de différence significative au seuil de 5% entre les stocks sous andain et dans l'interligne des parcelles RT 7-11 ans, ni entre les interlignes des parcelles RT et RN des deux classes d'âge. Les stocks de carbone sous andain dans les parcelles adultes RT ($\sim 60 \text{ MgC.ha}^{-1}$) sont supérieurs aux stocks de carbone de tous les autres traitements qui varient très peu autour d'une valeur moyenne de 35 MgC.ha^{-1} . Cette tendance s'observe également pour le stock d'azote qui est de 4 MgN.ha^{-1} sous andain dans les parcelles adultes RT contre un stock moyen d'azote de 3 MgN.ha^{-1} pour les autres traitements. Les tableaux d'analyse de variance des stocks de C et N sont présentés en annexe 4.1.

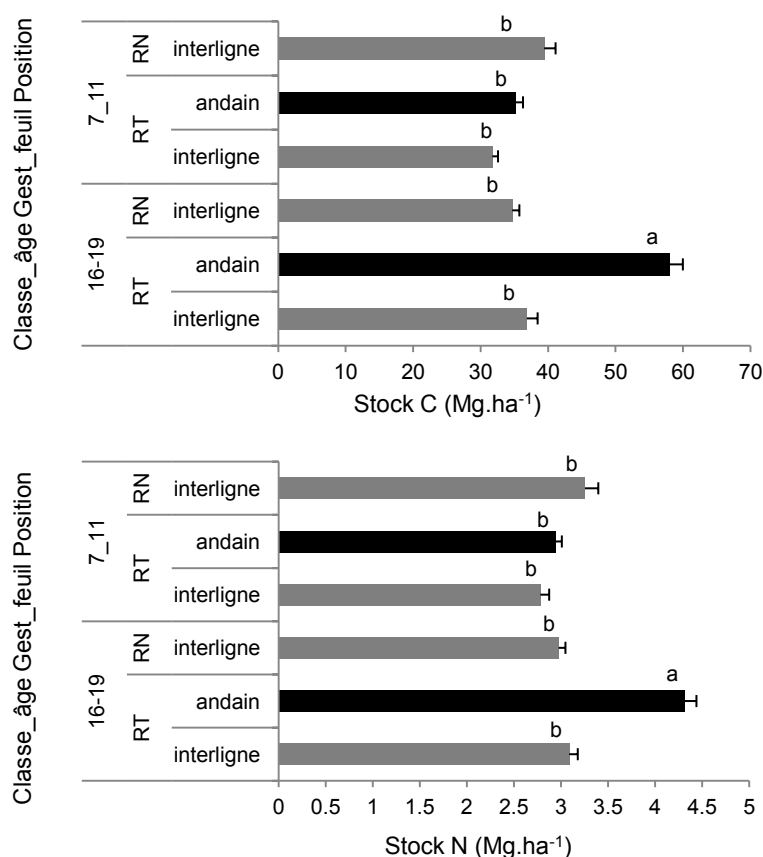


Figure 5.2.3. Stocks de carbone et d'azote pour 650 kg.m^{-2} de MTE ($\sim 0-50 \text{ cm}$) dans les positions andain et interligne des palmeraies RT et RN de 7-11 ans et 16-19 ans. Les moyennes sont présentées avec les barres d'erreur standard. Les lettres a et b indiquent le classement des moyennes selon le test de Tukey ($p < 5\%$).

5.2.3.2 Variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques du sol dans les palmeraies adultes

Les paramètres physico-chimiques du sol, sous andain et dans l'interligne, présentés dans le tableau 5.2.1 montrent que les taux de carbone et d'azote décroissent rapidement avec la profondeur. Ils sont plus élevés sous andain que dans l'interligne jusqu'à 30 cm. Les rapports C/N suivent les mêmes tendances. Le taux de carbone organique sous andain est en moyenne de 20 g.kg⁻¹ dans les 20 premiers centimètres de sol.

Le pH du sol sous andain passe d'un état légèrement acide dans les 20 premiers centimètres, à un pH acide au delà de 20 cm. En revanche, le sol présente un pH acide à toutes les profondeurs dans l'interligne.

La somme des cations échangeables (S) et la capacité d'échange cationique (CEC) sont plus élevées en surface qu'en profondeur du sol sous andain. Elles ont respectivement des valeurs de 11 meq.100g⁻¹ et 9 meq.100g⁻¹ dans la couche 0-5 cm. Au-delà de 10 cm les valeurs de S et CEC du sol sous andain sont similaires à celles des interlignes qui sont faibles et ne varient pas beaucoup selon la profondeur.

Parmi les cations échangeables, seules les teneurs en calcium et en magnésium ont été améliorées dans les couches de sol sous andain par rapport à l'interligne. Le potassium est resté très faible dans tous les cas sauf à 0-5 cm sous andain où on constate une légère amélioration par rapport à l'interligne.

Les résultats d'analyse granulométrique montrent que quelle que soit la position (andain ou interligne), la texture du sol dans les palmeraies passe d'une texture sablo-limono-argileuse entre 0 et 20 cm, à une texture argilo-sablo-limoneuse entre 20 et 50 cm de profondeur. On constate par ailleurs que dans la couche 0-20 cm le taux moyen d'argile sous andain est supérieur à celui dans l'interligne. La situation inverse s'observe pour la couche 20-50 cm.

Tableau 5.2.1. Paramètres physico-chimiques du sol sous andain et dans l'interligne des palmeraies adultes en mode de restitution totale des feuilles.

Zone	Prof	C	N	C/N	pH	Ca	Mg	K	S	CEC	Argile	Limon	Sable
		(g.kg ⁻¹)			(H2O)	(meq.100g ⁻¹)					(%)		
Andain	0 - 5	31.28 (7.33)	2.07 (0.51)	15.22 (1.26)	6.2 (0.7)	7.32 (2.21)	3.42 (1.34)	0.17 (0.04)	10.90 (3.35)	9.00 (1.98)	9.6 (3.5)	11.3 (5.4)	78.3 (6.6)
	5 - 10	19.29 (4.82)	1.26 (0.36)	15.49 (1.32)	6.0 (0.6)	4.42 (1.38)	1.70 (0.57)	0.09 (0.03)	6.21 (1.96)	5.85 (0.83)	7.3 (2.4)	10.7 (4.4)	81.4 (4.4)
	10 - 20	10.12 (2.55)	0.69 (0.16)	14.62 (1.87)	5.9 (0.6)	2.84 (1.06)	0.98 (0.40)	0.05 (0.02)	3.87 (1.46)	4.05 (1.12)	8.2 (3.5)	10.0 (5.1)	81.3 (5.9)
	20 - 30	4.98 (1.33)	0.43 (0.07)	11.49 (2.07)	5.8 (0.6)	2.01 (0.85)	0.74 (0.34)	0.03 (0.01)	2.78 (1.15)	3.40 (1.21)	12.5 (6.9)	10.8 (7.3)	76.2 (10.1)
	30 - 50	3.55 (1.19)	0.36 (0.09)	9.65 (1.71)	5.7 (0.7)	2.03 (0.56)	0.76 (0.40)	0.02 (0.01)	2.82 (1.01)	3.80 (1.52)	15.1 (7.6)	11.3 (9.6)	72.7 (11.7)
Interligne	0 - 5	12.08 (1.60)	0.84 (0.10)	14.48 (1.26)	5.5 (0.3)	2.68 (0.67)	0.87 (0.23)	0.06 (0.01)	3.62 (0.89)	4.71 (0.78)	6.0 (1.6)	10.5 (3.6)	83.2 (4.6)
	5 - 10	9.04 (1.94)	0.64 (0.07)	13.92 (1.73)	5.6 (0.3)	2.40 (0.75)	0.70 (0.21)	0.04 (0.01)	3.14 (0.95)	3.81 (1.13)	6.6 (1.9)	10.3 (4.0)	82.9 (5.2)
	10 - 20	6.19 (1.70)	0.49 (0.08)	12.45 (1.63)	5.7 (0.4)	2.20 (0.77)	0.64 (0.28)	0.03 (0.01)	2.86 (1.00)	3.50 (1.51)	9.1 (3.9)	10.5 (6.7)	79.9 (9.3)
	20 - 30	3.68 (1.34)	0.36 (0.08)	9.89 (2.93)	5.7 (0.4)	1.84 (0.64)	0.68 (0.33)	0.02 (0.01)	2.54 (0.91)	3.35 (1.70)	15.5 (10.0)	8.8 (6.4)	75.1 (12.3)
	30 - 50	3.41 (1.62)	0.37 (0.11)	8.63 (2.52)	5.7 (0.4)	2.22 (0.63)	0.86 (0.43)	0.02 (0.01)	3.10 (1.03)	4.38 (1.54)	16.92 (7.56)	13.0 (9.21)	70.0 (12.3)

Prof : profondeur ; C : carbone ; N : azote ; S : somme cations ; CEC : capacité d'échange cationique. Les valeurs entre parenthèses désignent les écart-types ; n = 18.

5.2.3.3 Relation entre matière organique, particules minérales fines et capacité d'échange cationique du sol

Les figures 5.2.4 présentent les relations entre la matière organique du sol et les particules fines d'une part et entre la matière organique et la CEC d'autre part ; puis entre la CEC et les particules minérales fines. Sous andain comme dans l'interligne, il n'y a pas de relation entre la matière organique et les particules fines du sol (figure 5.2.4 a et a'). La figure 5.2.4b indique une bonne corrélation entre la CEC et le taux de carbone sous andain. Cette relation apparaît aussi dans l'interligne, lorsqu'on écarte les échantillons les plus profonds dont la teneur en particules fines est supérieure à 30% (figure 5.2.4 b'). La CEC est donc influencée par les teneurs en particules fines et par les teneurs en carbone mais ces variables présentent des gradients inverses avec la profondeur.

5.2.3.4 Densité apparente et porosité du sol

Les profils de densité apparente du sol (figure 5.2.5) montrent les mêmes tendances que celles observées dans le chapitre 4. Les valeurs de densité apparente sont croissantes avec la profondeur du sol pour les deux classes d'âge. Sous les andains, les densités apparentes sont évidemment plus faibles que dans les interlignes. Les différences sont importantes jusqu'à 20 cm. Au-delà de cette profondeur, les valeurs de densité sont très proches entre andains et interlignes.

La porosité totale du sol (tableau 5.2.2) diminue en fonction de la profondeur du sol et prend une valeur élevée de 66% dans la couche 0-5 cm sous andain. Tout au long du profil étudié (50 cm de profondeur), la porosité du sol sous andain est supérieure à celle de l'interligne. Les différences sont élevées (10%) à 0-10 cm et moindres (4%) au-delà de 10 cm de profondeur.

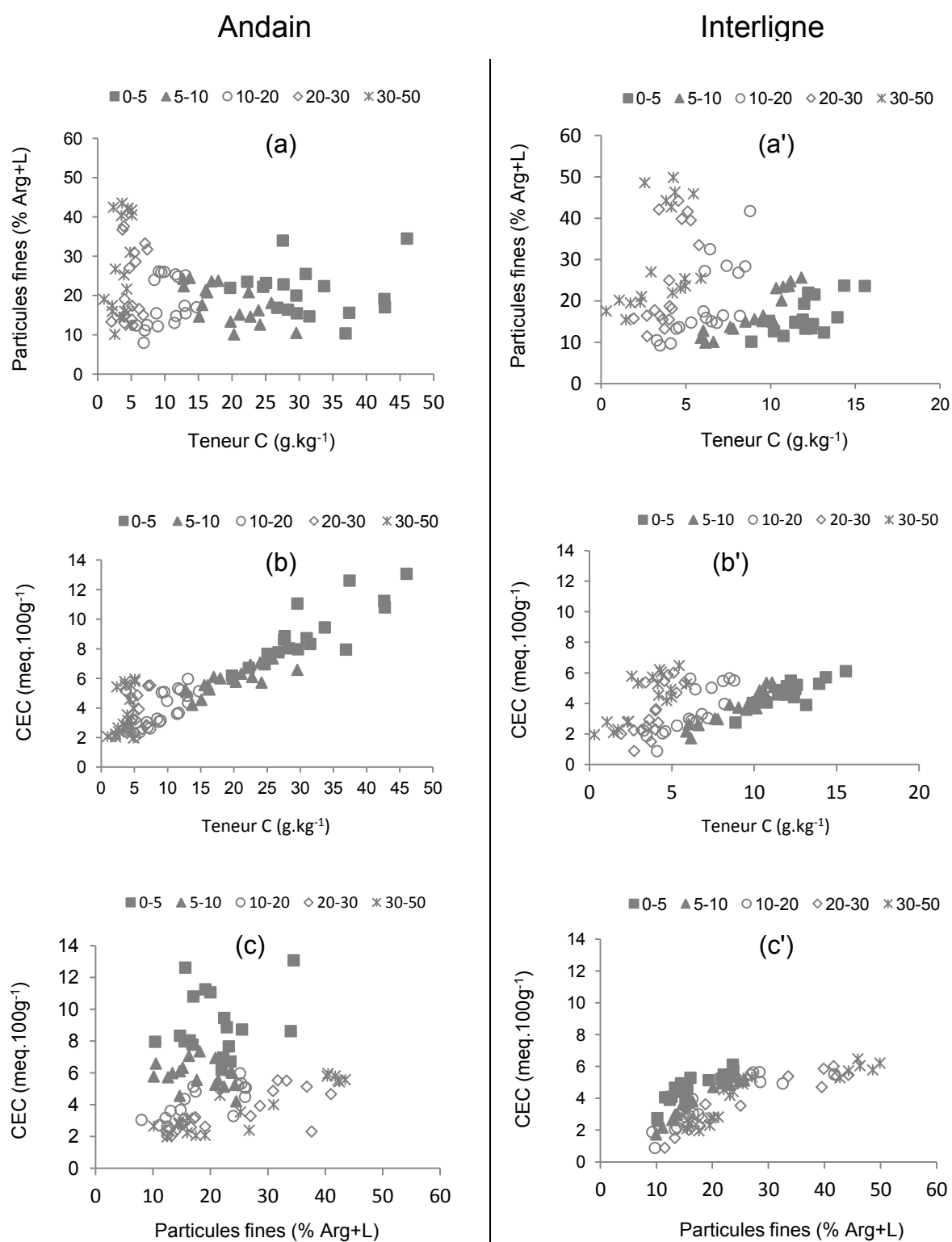


Figure 5.2.4. Relation entre teneur en carbone et particules minérales fines; et entre la capacité d'échange cationique et les particules minérales fines.

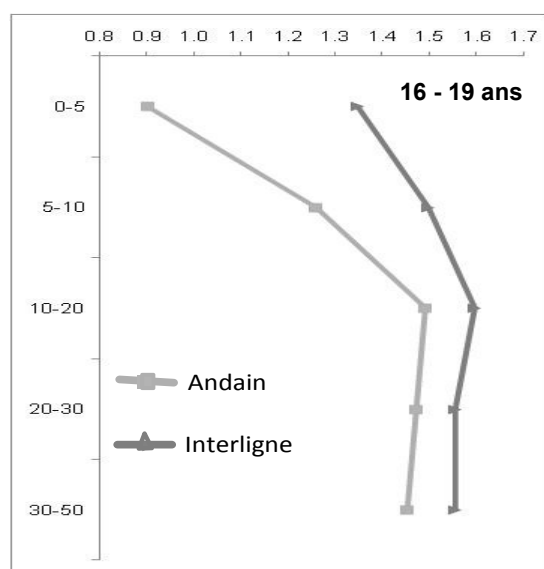
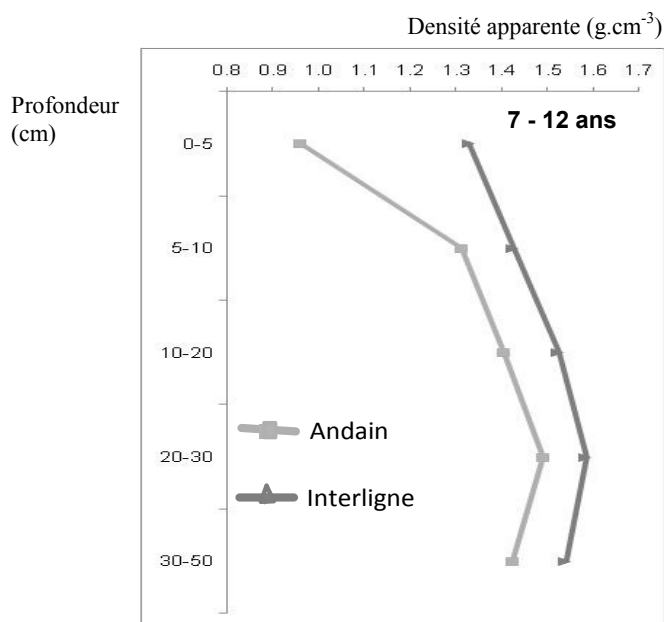


Figure 5.2.5. Evolution de la densité apparente du sol sous andain et dans l'interligne jusqu'à 50 cm de profondeur du sol à 7-11 ans et 16-19 ans.

Tableau 5.2.2. Porosité moyenne du sol (%) par profondeur selon la position.

Profondeur (cm)	Andain	Interligne
0-5	66 ± 4	49 ± 4
5-10	52 ± 7	43 ± 4
10-20	44 ± 3	40 ± 2
20-30	44 ± 2	41 ± 2
30-50	45 ± 2	41 ± 2

Les valeurs moyennes de porosité sont présentées ± leur écartype.

5.2.4 Discussion

L'étude des stocks de carbone et d'azote du sol montre l'existence d'une variabilité spatiale de ces paramètres et confirme les résultats de Djègui (1992) et de Law et al. (2009). Cette variabilité spatiale est liée à la pratique de restitution des feuilles en andain et serait aussi due, selon Djègui (1992), au système de cultures sur billons dans ces palmeraies villageoises au jeune âge. L'étude des stocks de carbone sur la profondeur de 50 cm de sol, a montré une augmentation des stocks due au recyclage des feuilles pendant 10 ans. Ces résultats confirment ceux du chapitre 4 et sont conformes aux résultats de Frazão (2012) et de Djègui et al. (1992). Ils prouvent le rôle du recyclage des ressources organiques dans l'amélioration du statut organique des sols et le renforcement du "puits de carbone" que représente le sol (Arrouays, 2002, 2003 ; Bernoux et al., 2011). Dans notre étude, les effets positifs du recyclage des feuilles du palmier à huile sur le stock organique du sol ne sont perceptibles qu'à l'âge adulte (13-20 ans) des palmeraies, puisque nos résultats n'ont pas montré une différence significative entre les stocks sous andains et ceux des interlignes dans les palmeraies préadultes (7-11 ans). Dans des palmeraies de 8 ans en restitution totale des feuilles, Frazão (2012) n'a pas trouvé non plus une différence significative entre les stocks de carbone sous andain et dans l'interligne. Une différence d'effet entre andain et interligne pourrait cependant exister à des durées de recyclage moins longues que 10 ans de restitution. Pour le vérifier, il faudrait étudier des classes d'âge intermédiaire entre 7-11 et 16-19 ans. L'augmentation temporelle des stocks organiques due au recyclage des ressources organiques peut être controversée car, selon le passé cultural, on peut assister à une baisse des stocks au cours du temps. Isaac et al. (2005) l'ont montré dans des plantations de cacao ayant remplacé des forêts au Ghana, où les stocks de carbone étaient de 23 et 18 MgC.ha⁻¹ respectivement dans les plantations de 2 et 15 ans. Au Brésil, le stock de carbone du sol sous andain des palmeraies de 4 ans sur terre prairiale étaient de 36 MgC.ha⁻¹ contre 30 MgC.ha⁻¹ sous les andains des palmeraies de 25 ans ayant remplacé des forêts (Frazão, 2012). A partir d'une méta-analyse, Marco et al. (2010) ont montré que la conversion en plantation d'une savane ou d'une forêt naturelle dense provoque une réduction du stock de carbone sur les vingt premiers centimètres, respectivement de 6,09 et de 16,5 kgC.m⁻². Cependant Reinhardt et al. (2007) rapportent que lorsque les palmeraies ne sont pas directement plantées après une forêt primaire, le stock de carbone du sol peut augmenter à travers le recyclage de la biomasse sur pied. Ainsi, l'augmentation des stocks de carbone et d'azote obtenue dans notre étude n'est pas simplement due à la restitution pendant 10 ans des feuilles d'élague du palmier, mais aussi au fait que les palmeraies étudiées ont été installés pour la plupart après la pratique de systèmes

de cultures continues d'association de maïs - manioc (Aholoukpè et al. 2013a). Ces précédents culturaux ont appauvri le sol au point de mettre en évidence l'effet positif du recyclage des feuilles d'élagage.

L'inexistence de variabilité temporelle des stocks dans les palmeraies en mode de restitution nulle confirme par ailleurs les résultats du chapitre 4. Elle s'explique par les apports de matière organique dus à la décomposition du recru végétatif important qui se développe progressivement au cours du temps sous les palmeraies. De plus, le système racinaire important (30 à 40 t.biomasse.ha⁻¹) qui se met en place chez les palmiers adultes a une contribution non négligeable au stock de matière organique de par le turn-over racinaire (Ng et al., 2003).

Les stocks de 60 MgC.ha⁻¹ et 4 MgN.ha⁻¹ obtenus pour le carbone et l'azote sous andain (10% de la palmeraie) s'ajoutent aux stocks dans les interlignes (90% de la palmeraie) pour donner des stocks totaux de 38 MgC.ha⁻¹ et 3 MgN.ha⁻¹ sur 0-50 cm de sol de toute la palmeraie, en raison du fait que les andains occupent 10% de la superficie (résultats chapitre 4). Ces stocks ont induit un effet positif sur les paramètres physico-chimiques du sol. Cet effet est resté en surface comme le montrent les résultats du tableau 5.2.1. Les paramètres physico-chimiques du sol ont été améliorés sous andain par rapport aux interlignes. L'effet diminue avec la profondeur et s'annule au-delà de 20 cm. Les teneurs sous andain indiquent une couche 0-5 cm de sol très riche en matière organique (teneur C > 30 g.kg⁻¹) et en azote (2 g.kg⁻¹). Les teneurs en C et N sont 2,5 fois plus élevées sous les andains par rapport aux interlignes. Le gain n'est plus que de 15 et 5 % en moyenne pondérée de la tranche 20-50 pour C et N par rapport aux teneurs des interlignes.

Le rapport C/N élevé en surface témoigne d'une mauvaise décomposition de la matière organique jusqu'à 20 cm de profondeur sous andain, due à l'accumulation périodique des feuilles restituées. Les valeurs du rapport C/N dans les vingt premiers centimètres sont les mêmes que celles trouvées par Frazão (2012) sous une forêt naturelle au Brésil sur la même profondeur. Mais elles sont toutes supérieures aux rapports C/N trouvés par Djègui (1992), sous une forêt dans la région d'étude. Dans notre étude, il faut remarquer les apports importants d'azote dus au recyclage des feuilles en andains. Les teneurs en azote jusqu'à 20 cm de profondeur sont largement supérieures aux teneurs en azote de 0,5 gN.kg⁻¹ sous l'association maïs - niébé à la profondeur 0-20 cm du sol sur une terre de barre de la région (Amadji et Aholoukpè, 2008). La décomposition des feuilles du palmier à huile restituées au sol contribue donc à un apport substantiel d'azote dans le sol.

L'amélioration de la somme des cations échangeables est due à une amélioration des teneurs en calcium et en magnésium puisque les teneurs en potassium sous l'andain et dans l'interligne ne sont différentes que dans la couche 0-10 cm sous andain. L'effet du recyclage des feuilles sur le potassium a été généralement faible. Djègui (1992) avait trouvé les mêmes résultats dans les palmeraies du Bénin et avait conclu que le complexe argilo-humique est saturé principalement par le calcium et le magnésium qui représente plus de 90% de la somme des cations échangeables. L'auteur avait aussi trouvé des teneurs très faibles en potassium, variant de 0,02 à 0,05 meq.100g⁻¹ de sol entre 0 et 50 cm de profondeur.

L'effet du recyclage des feuilles sur la CEC diminue rapidement avec la profondeur : il est 2 fois plus élevé en surface et n'apparaît plus au-delà de 20 cm. De la même façon l'amélioration du pH, est pour ainsi dire nulle au-delà de 20 cm.

Le recyclage des feuilles a par ailleurs induit dans la couche 0-20 cm sous les andains, un taux moyen d'argile plus élevé que dans l'interligne. Cette situation serait due à l'action des termites qui transportent les particules fines de la profondeur vers la surface, lors de la décomposition des feuilles.

On peut donc retenir que la couche 0-20 cm de sol est un bon indicateur des changements induits par la restitution de la matière organique recyclable.

L'effet positif du recyclage des ressources organiques des palmeraies sur les propriétés physico-chimiques du sol a été également démontré par Goh et Hardter (2003) et par Nelson et al. (2011). Ces derniers ont trouvé une augmentation du pH du sol, des cations échangeables et de la capacité d'échange cationique suite aux apports de rafles au sol dans les palmeraies en Papouasie-Nouvelle-Guinée. Selon Soltner (1992), Gobat et al. (1998), la matière organique du sol en se dégradant et en se minéralisant, influence la qualité chimique du sol et fournit les éléments nutritifs (azote, phosphore, calcium, magnésium...) aux plantes. Elle améliore la capacité d'échange cationique des sols et assure le rôle de stockage des éléments nutritifs. La retention des éléments nutritifs sur le complexe argilo-humique, due à une amélioration de la CEC, peut jouer un rôle important dans la réduction des pertes d'éléments par lessivage des horizons sableux de surface vers les horizons plus profonds.

Dans cette étude, les apports importants d'azote au sol par le recyclage des feuilles en andain, auraient induit une grande disponibilité d'azote sous forme nitrique (NO₃⁻) dans le milieu. La nutrition azotée par les racines se ferait plus sous la forme nitrique que sous la forme ammoniacale (NH₄⁺) et aurait facilité la libération d'ions hydroxydes (OH⁻) par les racines pour l'équilibre cations-anions dans le cytoplasme des cellules racinaires (Hinsinger et al. 2003).

Dans un essai de fertilisation minérale et d'amendement organique en Papouasie-Nouvelle-Guinée, Nelson et al. (2011) ont trouvé des différences entre les valeurs du pH du sol dans les zones autour du palmier (rond, et andain). Le pH du sol était plus élevé sous les andains de feuilles ($\text{pH} = 6$) que dans les ronds ($\text{pH} = 5$) n'ayant reçu que la fertilisation minérale. Les auteurs concluent que la différence de pH entre les zones serait due à des différences dans les transformations et les flux d'azote ou à des différences de pH tampon des sols.

Les teneurs moyennes de carbone et d'azote dans les interlignes des palmeraies étudiées indiquent que le sol est pauvre en matière organique dans ces interlignes. Ces teneurs sont très proches des valeurs moyennes (9 gC.kg^{-1} et $0,5 \text{ gN.kg}^{-1}$) trouvées par Amadji et al. (2008) sur 0-20 cm d'une terre de barre de la même région sous cultures vivrières continues. Dans un système traditionnel de culture de maïs sur une terre de barre du sud-Bénin, sans aucun apport de fumure, Barthès et al. (2006) ont constaté que la teneur moyenne en carbone n'a pas trop varié pendant 12 ans de culture et est restée autour d'une valeur moyenne de 4 gC.kg^{-1} sur 0-50 cm. Les valeurs de CEC ($< 5 \text{ meq.100g}^{-1}$) obtenues dans les interlignes sans restitution de feuilles d'élagage, sont qualifiées de très faibles par Nelson et Ninghu (2010).

Ces résultats donnent à penser que l'amélioration des paramètres physico-chimiques du sol par le recyclage des feuilles d'élagage, même si elle reste limitée aux couches de sol de surface, peut jouer un rôle dans la nutrition minérale des palmiers. Car comme l'ont affirmé plusieurs auteurs, en particulier Bernoux et al. (2011), les matières organiques lorsqu'elles se minéralisent, assurent la mise à disposition des éléments nutritifs dont la plante a besoin.

Mais Goh et al. (1997) cités par Paramanathan (2003) en évaluant l'aptitude des sols sous palmeraies à fournir les éléments nutritifs aux palmiers ont conclu que lorsque le sol présentait un $\text{pH} > 5,5$, une teneur en carbone $> 25 \text{ g.kg}^{-1}$ et une teneur en azote $> 2,5 \text{ g.kg}^{-1}$, son aptitude à fournir les éléments nutritifs était excellente. Ces seuils s'accompagnent généralement d'une CEC très élevée ($> 18 \text{ meq.100g}^{-1}$) et d'une forte disponibilité du potassium ($> 0,3 \text{ meq.100g}^{-1}$). Nos résultats indiquent que nous ne sommes pas dans cette configuration puisque les faibles valeurs de CEC ($\sim 7 \text{ meq.100g}^{-1}$) et les très faibles valeurs de potassium ($< 0,06 \text{ meq.100g}^{-1}$) confèrent au sol une mauvaise aptitude à fournir les éléments nutritifs aux palmiers (Goh et al., 1997 ; cités par Paramanathan, 2003).

La bonne corrélation linéaire entre CEC et teneur en carbone du sol observée dans notre étude (figure 5.2.4.b et b') prouve qu'il existe une relation étroite entre teneur en matière organique et la capacité d'échange cationique du sol sur les 10 et 20 premiers

centimètres de sol respectivement dans les interlignes et sous les andains. Au-delà de ces profondeurs où le taux de matière organique a chuté de plus de la moitié (tableau 5.2.1), la CEC varie en fonction du taux de particules minérales fines (figure 5.2.4.c et c'). Djègui (1992) a aussi observé que dans les sols où les taux de particules organiques sont faibles, le rôle des éléments minéraux fins semble devenir prépondérant.

On retient donc que la minéralisation de la matière organique des sols dans les palmeraies villageoises, entraîne une stabilisation d'une partie de cette matière organique (l'humus) qui renforce la CEC en surface. Le sol sous andain retient alors mieux les cations échangeables, ce qui s'est traduit par l'augmentation des teneurs de ces cations en surface.

Le recyclage des feuilles a induit des effets sur les propriétés physiques du sol étudiées. Comme abordé dans le chapitre 4, la densité apparente et la porosité totale du sol ont été modifiées sous andain par rapport à l'interligne sans feuille d'élagage. Ces modifications ont des conséquences évidentes sur la perméabilité du sol, l'aération et la sensibilité du sol à l'érosion (Djègui, 1992).

5.2.5 Conclusion

Dans les palmeraies villageoises du Bénin, il existe une variabilité du stock de carbone organique due à la pratique de gestion des feuilles d'élagage. La restitution en andain des feuilles augmente significativement le stock de carbone à l'âge adulte des palmeraies et améliore les paramètres physico-chimiques du sol. Ces effets sont toutefois limités aux 20 premiers centimètres du sol sous andain où les teneurs moyennes de 20 g.kg⁻¹ pour le carbone, de 1,5 g.kg⁻¹ pour l'azote et d'environ 7 meq.100g⁻¹ sol pour la somme des cations échangeables et la CEC sont supérieures à celles des interlignes des palmeraies. Sous andain, la somme des cations est plus élevée et le complexe d'échange est saturé sur les 10 premiers centimètres du sol. Sur ces 10 premiers centimètres, le pH du sol sous andain s'est aussi amélioré de 0,5 unité et le sol est passé d'un état acide (pH = 5,5) à un état légèrement acide (pH = 6).

5.3 (Pré-article) : La gestion des feuilles du palmier à huile affecte l'activité microbienne et le statut de la matière organique d'un sol tropical du Bénin - Afrique de l'Ouest.

5.3.1 Introduction

Le palmier à huile est la plante oléagineuse pérenne la plus productive en corps gras par unité de surface et par an dans les zones tropicales et subtropicales humides écologiquement favorables (Barcelos, 1998 ; Corley et Tinker 2003). Elle est la première plante oléagineuse au monde en termes de production d'huile (Corley et Tinker 2003), et fait partie des cinq filières souvent essentielles à l'économie des pays des zones tropicales humides. Au Bénin, la culture du palmier à huile contribue pour une grande part aux revenus des ménages (Fournier, 2000). On assiste, depuis environ une vingtaine d'années, à une extension remarquable de cette culture en milieu villageois. Les superficies plantées ont connu une nette progression et sont passées de 867 ha en 1997 à plus de 16 000 ha en 2012 (Adjadi, 2012). Ces palmeraies villageoises appartiennent pour la plupart à de petits producteurs qui exportent les feuilles d'élagage et n'appliquent pas les techniques culturales adéquates pour une durabilité du systèmes de production (Aholoukpè et al., 2013a). Or la nature de l'agro-système et la restitution de matière végétale influencent grandement la qualité des sols, leur teneur en matière organique et de ce fait l'activité microbienne (Stefanowicz et al., 2012).

Si l'on considère que le palmier à huile est "un puits de carbone" du point de vue de sa biomasse aérienne (Jaffré, 1983 ; Henson et al., 1999 ; Germer and Sauerborn, 2008 ; Lamade and Bouillet, 2005) il pourrait aussi avoir un impact direct sur le taux de carbone du sol lorsque sa biomasse aérienne est restituée au sol (Egbe et al., 2012). Dans les palmeraies villageoises du Bénin, Aholoukpè et al. (2013a) ont identifié cinq modes de gestion des feuilles du palmier à huile, allant de la restitution totale des feuilles en andain sur la ligne de plantation, à l'exportation totale (restitution nulle) de ces feuilles. Dans le cas de la restitution en andain, Djègui (1992) constata une activité biologique, un développement de racines fines et des teneurs en matière organique du sol supérieurs sous les andains par rapport aux interlignes de culture.

Par contre la qualité de la matière organique du sol des palmeraies n'est pas connue. Cette qualité peut se caractériser par un fractionnement physique qui permet de séparer les substances organiques en fonction de leur taille et de les localiser par rapport aux particules minérales du sol. Selon Feller et Fritsch (1991), le fractionnement de la matière organique est

utile et intéressant pour décrire les différentes fractions de matières organiques stockées dans le sol. Il permet d'approcher les formes de la matière organique du sol, en particulier les résidus végétaux plus ou moins reconnaissables, qui seront rapidement minéralisés, et les matières organiques amorphes, transformées par les microorganismes, qui associées aux argiles ont un taux de renouvellement plus lents. Le fractionnement de la matière organique du sol est également intéressant pour l'étude de la structure du sol et de sa stabilité (Bongiovanni & Lobartini, 2006). Il existe une influence du type de sol et de l'utilisation du sol sur la répartition du carbone organique dans le sol, dans les fractions particulières ou associées aux particules minérales fines du sol (Feller et Fritsch, 1991 ; d'Annunzio et al., 2008).

Par ailleurs l'activité des microorganismes selon le mode de gestion des palmeraies est aussi mal connue. Les microorganismes sont les agents biologiques de la production des éléments de nutrition. Ils dégradent et minéralisent les résidus végétaux et les matières organiques, et produisent généralement les éléments minéraux solubles assimilables par les végétaux et par les microorganismes eux-mêmes. Dans les cycles biogéochimiques très localisés, qui se déroulent dans une boucle «plantes-sols-micro-organismes», ils assurent le recyclage des éléments nutritifs sur des échelles de temps plus ou moins courtes. Les cycles dans les milieux tropicaux sont plus courts que dans les milieux tempérés et boréaux (Pédro, 2007).

Afin d'élucider les interactions des mécanismes de contrôle des flux entrée/sortie de nutriments et d'énergie dans l'écosystème du sol, une quantification fiable de la biomasse microbienne est nécessaire. Des informations précieuses sur la croissance de la biomasse, le temps, le taux de mortalité des microorganismes, et leur efficacité d'utilisation du carbone et d'azote peuvent être illustrées par des données sur la quantité de C et d'N microbien et sur leur activité. Cette activité est mesurée par la respiration microbienne et donc par les émissions de CO₂ du sol (Evans & Wallenstein, 2011 ; Österreicher-Cunha et al., 2012). Elle est sous l'influence de plusieurs facteurs abiotiques et biotiques que sont le climat, l'humidité et la température du sol, le travail du sol, les pratiques culturales etc. (Liski et al., 1999 ; Tiessen et al., 2005). Dans ce contexte, les pratiques culturales de gestion de la matière organique du sol ont un grand rôle dans la vie biologique des sols qui est souvent évaluée à travers les flux de CO₂ (Ngao et al., 2005 ; Nouvellon et al., 2011). Selon Banerjee et al. (2006), il y a une relation étroite entre les teneurs en MO et l'activité biologique des sols.

En définitive, la particularité des palmeraies villageoises du Bénin qui consiste à exporter tout ou partie de la biomasse des feuilles recyclables pose la question de la durabilité du système et conduit à des études sur le sol des palmeraies en relation avec sa matière organique et son

activité microbienne. Dans cette étude, l'effet de la restitution de feuilles d'élagage en andains dans des palmeraies sur le statut organique et l'activité biologique des sols sera quantifié.

5.3.2 Matériels et méthodes

5.3.2.1 Objet d'étude et collecte d'échantillons de sol

L'étude s'est déroulée dans les palmeraies villageoises du sud-est du Bénin (2°30' - 2°45' E, 6°35' - 7°45' N), caractérisées par divers modes de gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile (Aholoukpè et al. (2013a). Quatre palmeraies en modes suffisamment opposés de gestion des feuilles d'élagage ont été choisies : 2 palmeraies de restitution totale des feuilles en andains (RT) et 2 palmeraies de restitution nulle des feuilles (RN). Les palmeraies sont adultes, âgées en moyenne de 17 ans, et la gestion des feuilles d'élagage a duré une dizaine d'années. Dans les palmeraies RT, les feuilles élaguées sont restituées en andain sur les lignes de plantation ; les interlignes sont occupées par des recrues végétatifs (figure 5.3.1). Les palmeraies adultes ont été retenues pour avoir un temps relativement long de gestion des feuilles d'élagage afin d'apprécier l'activité microbienne et les formes de matière organique du sol à cet âge. Dans chaque palmeraie, 3 palmiers ont été choisis de façon aléatoire pour les observations.

Des échantillons de sol ont été collectés dans une zone de l'espace de Voronoï défini autour de chaque palmier (Jourdan et Rey, 1997 ; Nodichao 2008) (figure 5.3.2). Cette zone est située à une distance entre 3 m et 4,5 m du palmier et couvre une surface au sol représentée par : 1,8 m x 0,70 m. Des échantillons composites de sol ont été prélevés à 0-5, 5-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur. Ils ont été séchés à l'air puis tamisés à 2 mm.

Dans les palmeraies RT, l'échantillonnage du sol a été fait sous les andains et dans les interlignes alors que dans les palmeraies RN, il n'a été fait que dans l'interligne. Ce choix a été fait dans les palmeraies RN en référence aux résultats obtenus dans le chapitre 4 qui ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les stocks de carbone organique dans la ligne et dans l'interligne des palmeraies RN. Il a permis d'avoir un nombre minimal d'échantillons pour éviter de grands biais statistiques tout en satisfaisant aux exigences de planning et de budget. Les études d'activité microbienne ont été effectuées dans les deux types de palmeraies (RT et RN) et à toutes les profondeurs du sol. Celles de caractérisation de la qualité de la matière organique du sol ont été faites dans les parcelles RT afin de réduire le temps relativement long du fractionnement physique de cette matière organique. Pour ce

fractionnement, les deux profondeurs extrêmes de l'échantillonnage (0-5 cm et 20-30 cm) ont été retenues et les andains ont été comparés aux interlignes (sans feuilles d'élagage).

5.3.2.2 Etude de l'activité microbienne

Détermination de la biomasse microbienne

Elle a été effectuée selon la méthode de Brookes et al. (1982) à partir d'échantillons de sols fumigés et non fumigés. Tous les échantillons ont été pré-incubés à 20°C pendant 7 jours. Pour la fumigation, un bécher de trichlorométhane est placé dans un dessiccateur sous vide avec les échantillons à fumer pendant 24 heures à 20-25°C à l'abri de la lumière. 5 g de sol sont mis en contact avec 25 ml de K₂SO₄ à 0,05 N pour une solubilisation du carbone organique total. Le mélange (sol + solution K₂SO₄) est agité pendant 1 h puis centrifugé et filtré. L'extrait est dosé à l'aide d'un analyseur de carbone Shimadzu type TOC-V pour la détermination du carbone organique (mg.L⁻¹). La quantité de carbone organique d'origine microbienne extrait est obtenue par la différence entre le carbone organique extrait du sol témoin non fumigé (carbone essentiellement non microbien) et le carbone organique total extrait du sol fumigé (issu de carbone microbien extractible par fumigation + non microbien). La biomasse microbienne est proportionnelle au carbone microbien (Durenkamp, et al., 2010).

Détermination de la respiration microbienne

Cette analyse réalisée sur les échantillons séchés, à l'air libre, a permis d'étudier l'activité respiratoire potentielle des micro-organismes du sol. La respiration microbienne a été effectuée par incubation en conditions de température et d'humidité contrôlées. Le CO₂ émis par le sol a été piégé par la soude et dosé par titrimétrie selon la méthode de Gorissen (1996). 45 g de sol pré-incubés pendant 7 jours à 20°C sont déposés dans des boîtes à tare ; la valeur de l'humidité de chaque échantillon est ajustée à sa capacité au champ (pF=4,2). Les boîtes à tares sont ensuite placées pendant 28 jours dans des bocal hermétiques à 28°C en présence de flacons d'eau déminéralisée pour maintenir une atmosphère humide, et de 10 ml de soude à 0,5 N. Le CO₂ dégagé est piégé sous forme de carbonate de sodium (Na₂CO₃) qui précipite à son tour sous forme de carbonate de baryum (BaCO₃) après ajout du chlorure de baryum (BaCl₂). La soude en excès (n'ayant pas réagi) est dosée par une solution d'acide chlorhydrique à 0,5 N jusqu'au point de titration (pH = 8,6). Le CO₂ dégagé est calculé par la formule suivante : $\text{mgCO}_2.\text{g}^{-1} = 44 \cdot x^* / \text{poids du sol (g)}$; où 44 représente la masse molaire du

CO₂ et x le nombre de moles de CO₂ piégé par la soude, i.e le CO₂ dégagé par respiration. Les mesures ont été faites 3, 7, 14, 21 et 28 jours après incubation.

5.3.2.3 Caractérisation granulométrique de la matière organique du sol

Fractionnement granulométrique

Cette analyse a été réalisée par la méthode de Feller (1979). Une dispersion maximale sans destruction de la matière organique a été réalisée en agitant 15 g de sol pendant 6 h dans 100 ml d'eau contenant 10 ml d'hexamétaphosphate de sodium 0,5 N.

Le tamisage successif à l'eau a permis de séparer la matière organique en classes de tailles (>200µm, 50-200µm). L'eau contenant les particules fines a été passée à l'ultrason pour désagréger les agrégats de sol inférieurs à 50 µm. Les fractions les plus fines (0-20µm) ont été obtenues par sédimentation. Elles ont ensuite été séchées à l'étuve à 40°C et pesées. La distribution des fractions dans le sol a été exprimée en mg.fraction.g⁻¹.sol.

Détermination des teneurs en C et N des fractions

La mesure est basée sur la détermination simultanée de C et de N par combustion sèche totale sous oxygène (O₂) avec comme gaz vecteur l'hélium pur à 870°C.

L'échantillon contenu dans une petite capsule d'étain est introduit automatiquement dans un réacteur constitué d'un tube vertical en quartz dans lequel circule en continu de l'hélium. A ce stade, les gaz obtenus sont sous la forme : CO₂, N_xO_y. Ces gaz passent sur un deuxième catalyseur à 650°C constitué de cuivre qui va réduire les oxydes d'azote et retenir l'excédent d'oxygène (annexe1). A l'introduction de l'échantillon, le courant d'hélium est enrichi par une quantité d'oxygène pur, provoquant une combustion « flash ». Les gaz de combustion entraînés par le courant d'hélium passent sur un catalyseur d'oxyde de cobalt et d'oxyde de chrome. L'ensemble des gaz N₂ et CO₂ est séparé sur une colonne de chromatographie en phase gazeuse et quantifié par un détecteur à conductibilité thermique (Hassink et al, 1993).

Les concentrations en carbone et en azote de chaque fraction sont exprimées en mgC.g⁻¹.fraction. La contribution de chaque fraction à la teneur en carbone ou azote totale du sol est exprimée en mgC.g⁻¹ de sol.

5.3.2.4 Traitement et analyse des données

La respiration microbienne est exprimée en C minéralisé cumulé (mgC-CO₂ g⁻¹ sol) sur une période donnée (3, 7, 14, 21 et 28 jours). Les caractéristiques de la matière organique du sol ont été présentées pour six fractions : les fractions grossières organiques (FO > 200µm et FO50-200 µm) et minérales (FM > 200µm et FM50-200µm), les fractions organo-minérales

(F20-20 μm et F0-20 μm). La répartition massique des fractions, les teneurs en carbone et en azote dans les fractions et dans le sol ont été analysées. Les tests d'analyse de variance et de Tukey (HSD) ont permis de comparer et de classer les moyennes afin d'analyser la significativité des différences obtenues. Le logiciel R 2.15.2 (R development core team, 2012) a été utilisé pour les analyses statistiques.



Andain de feuilles de palmiers

Figure 5.3.1. Photo d'une palmeraie en mode de restitution totale des feuilles en andain.

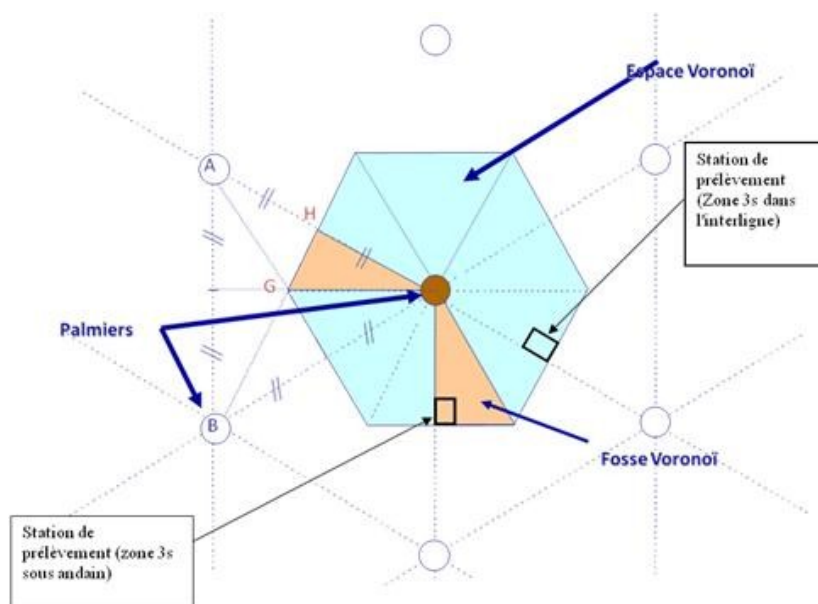


Figure 5.3.2. Dispositif de Voronoï de prélèvement du sol. (Jourdan et Rey, 1997 ; Nodichao 2008).

5.3.3 Résultats

5.3.3.1 Mode de gestion des feuilles et activité microbienne

Le tableau 5.3.1 présente la biomasse microbienne par profondeur de sol dans les andains et interlignes des palmeraies RT et RN. Dans les palmeraies RT, la biomasse microbienne est significativement plus élevée ($P < 0,05$) sous les andains que dans l'interligne à 0-5 et 5-10 cm de profondeur du sol. La différence n'est pas significative entre andains et interlignes pour les autres profondeurs de sol.

Quel que soit le mode de gestion des feuilles, Il existe une différence significative entre la biomasse microbienne des profondeurs étudiées sous les andains et dans les interlignes. Les résultats montrent par ailleurs qu'entre les interlignes RT et RN, les biomasses microbiennes ne sont pas significativement différentes pour chaque profondeur de sol.

Les figures 5.3.3 A, B et C montrent la cinétique de respiration microbienne pendant 28 jours d'incubation des échantillons de sol. Dans les parcelles RT, la respiration microbienne est significativement plus élevée dans l'horizon de surface 0-5 cm que dans les autres horizons, des andains et des interlignes (figure 5.3.3 A et B). Par ailleurs, pour chacune des profondeurs 0-5, 5-10 et 10-20 cm, le dégagement de CO_2 est significativement plus élevé dans les échantillons de sol prélevés sous andain que dans ceux prélevés dans les interlignes des parcelles RT et RN (figures 5.3.3 A, B et C). Il n'y a pas de différence significative selon la profondeur dans les interlignes des parcelles RN, mais la respiration dans l'horizon de surface 0-5 cm y reste au moins aussi élevée que dans les autres horizons (figure 5.3.3 C). Les différences de respiration microbienne entre interligne RT et interligne RN restent relativement peu marquées (figures 5.3.3 B et 5.3.3 C).

La figure 5.3.4 montre l'existence d'une corrélation positive significative entre la biomasse microbienne et la respiration du sol. Cette corrélation reste cependant faible, ce qui suggère que d'autres facteurs microbiologiques que la biomasse microbienne (les types de microorganismes et leurs métabolismes, notamment) peuvent intervenir dans les différences de respiration du sol.

Tableau 5.3.1 : Biomasse microbienne (mgC.g^{-1} sol $\pm$ erreur standard) par mode de gestion des feuilles et par position (andain, interligne) à chaque profondeur du sol.

Position	Profondeur (cm)	Restitution Totale des feuilles	Restitution nulle des feuilles
Andain	0-5	441,9 $\pm$ 178,7 ^a	-
	5-10	181,3 $\pm$ 29,2 ^b	-
	10-20	110,0 $\pm$ 19,7 ^c	-
	20-30	53,2 $\pm$ 13,0 ^c	-
Interligne	0-5	175,0 $\pm$ 15,3 ^b	177,0 $\pm$ 23,6 ^b
	5-10	91,9 $\pm$ 13,0 ^c	89,1 $\pm$ 11,7 ^c
	10-20	52,9 $\pm$ 13,4 ^c	52,2 $\pm$ 10,3 ^c
	20-30	37,8 $\pm$ 16,4 ^c	30,5 $\pm$ 8,8 ^c

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$; test de Tukey)

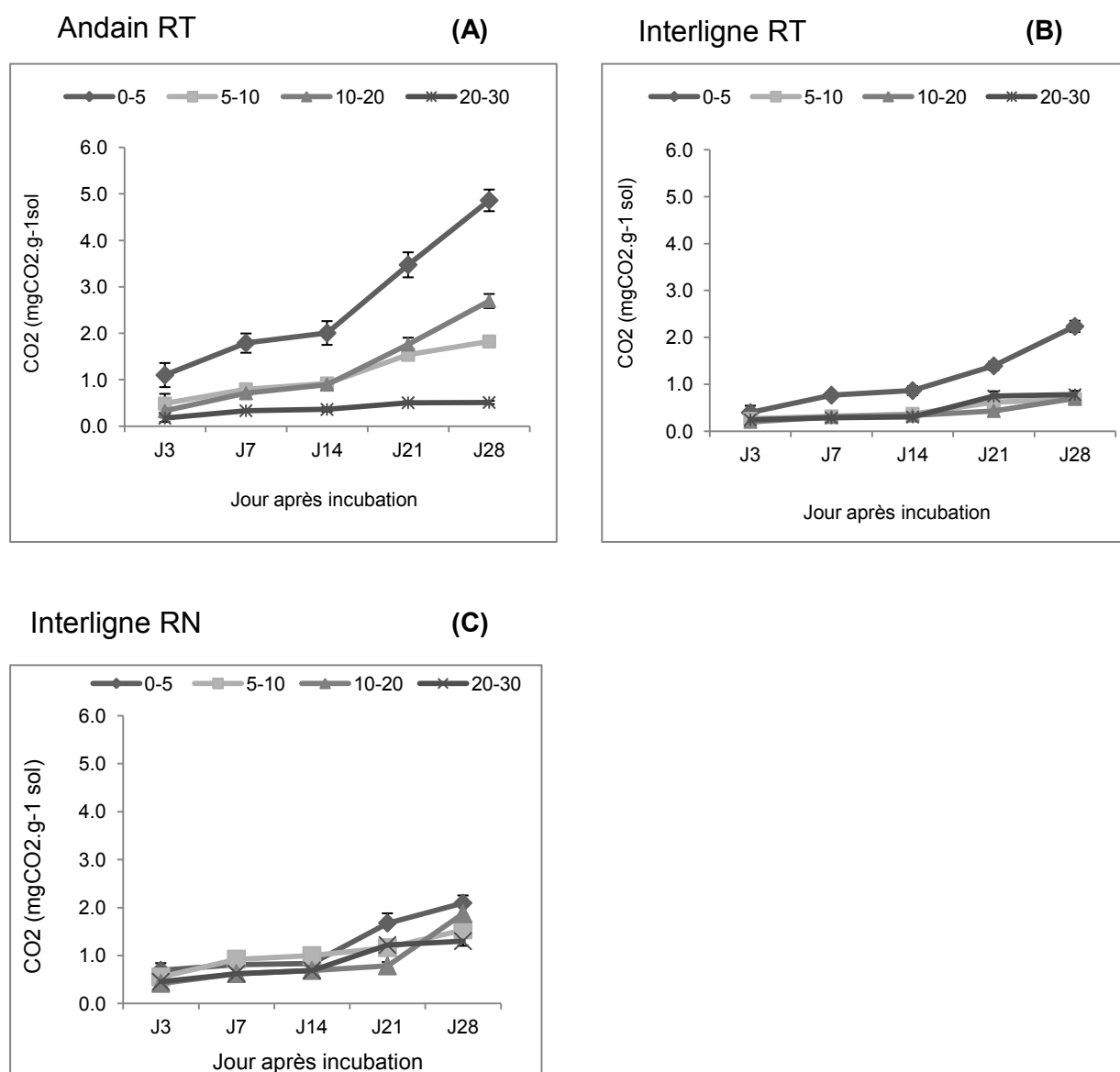


Figure 5.3.3 : Cinétique de respiration du sol pendant 28 jours à 28°C, mesurée à intervalle régulier. Chaque point représente la moyenne cumulée de la respiration, notée à un jour de la cinétique (j3, j7, j14, j21 et j28) en mg de CO₂ par g de sol.

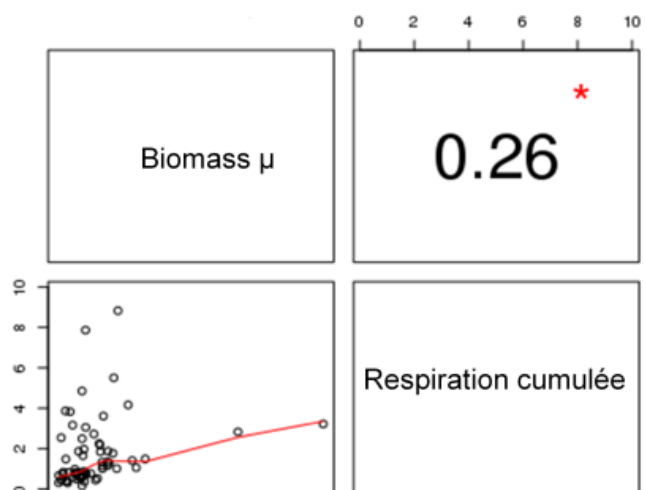


Figure 5.3.4. Corrélation de Pearson entre la biomasse microbienne et la respiration cumulée du sol

5.3.3.2 Caractéristiques granulométriques de la matière organique du sol

Les figures 5.3.5 A et 5.3.5 B montrent des différences significatives entre taux de carbone et d'azote du sol sous les andains et les interlignes à 0-5 cm. La différence entre les deux positions n'est pas significative à 20-30 cm.

La répartition massique des différentes fractions du sol est présentée dans le tableau 5.3.2, de même que les teneurs en carbone et en azote dans les fractions et dans le sol. Les bilans massiques obtenus (colonnes "Massfrac", ligne "Total") sont corrects ($1000 \text{ mg.g}^{-1} \pm 20 \text{ mg.g}^{-1}$) ; la proportion de fractions organiques et organo-minérales (fractions FO et F) dans le sol sous andain à 0-5 cm est de 34% et dépasse de 10% celle des fractions organiques sous andain à 20-30 cm et celle dans les interlignes à 0-5 et 20-30 cm.

Les masses des fractions organiques grossières (colonnes Massfrac, lignes FO 50-200 μm et FO > 200 μm) et de la fraction organo-minérale 20-50 μm (colonnes Massfrac, lignes F20-50 μm) sous andain et dans l'interligne sont significativement plus importantes ($P < 0,05$) en surface (0-5 cm) qu'en profondeur. Pour une même profondeur, la différence n'est significative au seuil de 5% entre andains et interlignes que pour les fractions organiques grossières (cf Colonnes massfrac, lignes FO > 200 μm) à 0-5 cm.

Il n'y a pas de différence significative de concentration en C des fractions entre les sols sous andain et dans l'interligne (cf. colonnes Cfrac). Les concentrations en C des fractions organiques grossières (colonnes Cfrac, lignes FO > 200 μm) sont significativement supérieures à celles dans les fractions organiques (colonnes Cfrac, lignes FO 50-200 μm) et organo-minérales plus fines (colonnes Crac, lignes F20-50 μm et F0-20 μm). Pour une même profondeur, et une même fraction les ratios C/N sont les mêmes dans les deux positions

andain et interligne. Ces ratios C/N sont plus élevés dans la fraction organique grossière (cf lignes FO > 200 μm).

Les quantités de carbone et d'azote (cf. colonnes Csol et Nsol) contenus dans les fractions organiques grossières (lignes FO 50-200 μm et FO > 200 μm) dans le sol sous andain à 0-5 cm sont significativement supérieures à ceux sous les andains à 20-30 cm et dans les interlignes à 0-5 et 20-30 cm. Mais elles ne sont pas significativement différentes entre andains et interlignes à 20-30 cm. Par ailleurs, il n'existe pas de différence significative entre les contenus en carbone et en azote des fractions fines équivalentes sous les andains et dans les interlignes. Toutefois, les fractions fines (colonnes Csol, lignes FO-20 μm) sous andains à 0-5 cm contiennent plus de carbone (10,4mgC.g⁻¹ sol) que les fractions fines des interlignes (7,1 mgC.g⁻¹ sol) à la même profondeur. La figure 5.3.6 présente les images des différentes fractions du sol.

Tableau 5.3.2 : distribution massique des fractions dans le sol, teneurs en carbone et en azote dans les fractions et dans le sol.

Prof	Fraction	Andain						Interligne					
		Massfrac (mgfrac.g ⁻¹ sol)	Cfrac mgC.g ⁻¹ frac	Nfrac mgC.g ⁻¹ frac	Csol mgC.g ⁻¹ sol	Nsol mgC.g ⁻¹ sol	C/N	Massfrac (mgfrac.g ⁻¹ sol)	Cfrac mgC.g ⁻¹ frac	Nfrac mgC.g ⁻¹ frac	Csol mgC.g ⁻¹ sol	Nsol mgC.g ⁻¹ sol	C/N
0 - 5	FO>200µm	37,0±5,8 ^a	266,6±28,0 ^a	10,5±0,8	10,1±2,3 ^a	0,4±0,1 ^{ab}	25,8	8,6±1,5 ^b	298,8±16,5 ^a	10,4±1,2	2,5±0,5 ^b	0,1±0,0 ^b	27,3
	FO50-200µm	41,7±3,4 ^a	159,1±16,0 ^b	10,5±1,0	6,6±0,9 ^a	0,4±0,1 ^{ab}	15,3	42,0±23,5 ^a	144,9±12,5 ^b	9,5±1,5	5,9±3,4 ^a	0,4±0,2 ^{ab}	15,6
	F20-50µm	39,3±9,2 ^a	100,8±12,2 ^b	7,2±0,9	4,3±1,5 ^{ab}	0,3±0,1 ^{ab}	14,0	21,4±2,1 ^a	87,6±19,2 ^b	6,2±1,0	1,7±0,1 ^b	0,1±0,0 ^b	13,5
	F0-20µm	225,6±24,0	47,2±2,9 ^c	3,6±0,8	10,4±0,7 ^a	0,8±0,2 ^a	13,9	162,6±9,7	43,8±3,4 ^c	4,2±0,5	7,1±0,6 ^a	0,7±0,1 ^a	10,5
	FM>200µm	405,3±23,5	0,6±0,2	0,1±0,0	0,3±0,1	0,0±0,0	5,8	490,5±18,7	0,4±0,1	0,2±0,0	0,2±0,1	0,1±0,0	2,8
	FM50-200µm	264,7±11,9	0,8±0,2	0,1±0,0	0,2±0,0	0,0±0,0	6,8	266,5±36,8	0,5±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0	0,0±0,0	3,1
	Total	1013,5			31,8	2,0		9917			17,5	1,4	
20-30	FO>200µm	8,4±6,6 ^b	270,0±42,1 ^a	8,3±0,7	2,7±2,1 ^b	0,1±0,1 ^b	33,3	12,4±10,8 ^b	321,5±37,7 ^a	9,7±1,4	4,1±3,6 ^{ab}	0,2±0,2 ^b	22,2
	FO50-200µm	3,4±0,6 ^b	138,3±19,3 ^b	7,9±1,4	0,4±0,1 ^c	0,0±0,0 ^{bc}	18,4	1,7±0,2 ^b	129,3±34,6 ^b	6,4±0,9	0,2±0,1 ^c	0,0±0,0 ^c	21,2
	F20-50µm	13,6±1,4 ^b	27,4±2,1 ^c	1,7±0,2	0,4±0,0 ^c	0,0±0,0 ^{bc}	16,4	14,3±3,6 ^b	21,6±1,0 ^c	1,3±0,1	0,2±0,0 ^c	0,0±0,0 ^c	16,3
	F0-20µm	213,3±37,7	22,6±2,9 ^c	2,3±0,3	3,9±0,3 ^{ab}	0,4±0,0 ^{ab}	9,8	233,6±38,6	14,6±1,5 ^c	1,8±0,1	2,9±0,3 ^b	0,4±0,1 ^{ab}	8,0
	FM>200µm	547,8±39,6	2,0±1,6	0,2±0,1	1,1±0,9	0,1±0,1	9,1	503,9±56,0	0,4±0,1	0,2±0,0	0,2±0,0	0,1±0,0	2,3
	FM50-200µm	234,6±15,7	0,5±0,0	0,1±0,0	0,1±0,0	0,0±0,0	4,9	233,3±27,0	0,5±0,1	0,2±0,0	0,1±0,0	0,0±0,0	3,0
	Total	1021,0			8,5	0,7		999,2			7,8	0,7	

Prof=profondeur du sol en cm ; FO = fraction organique ; FM = fraction minérale ; F = fraction organo-minérale ; %FO = proportion de FO dans le total des fractions ; Massfrac = masse de la fraction en mgfraction.g⁻¹ de sol ; Cfrac = teneur en carbone dans la fraction en mgC.g⁻¹ de fraction ; Nfrac = teneur en azote dans la fraction en mgN.g⁻¹ de fraction ; Csol et Nsol désignent respectivement les teneurs en carbone et en azote de la fraction dans le sol ; exprimées en mgC.g⁻¹ de sol et mgN.g⁻¹ de sol. Les valeurs sont présentées ± les erreurs standard. Les valeurs suivies de la même lettre pour la même variable ne sont pas significativement différentes (test de Tukey).

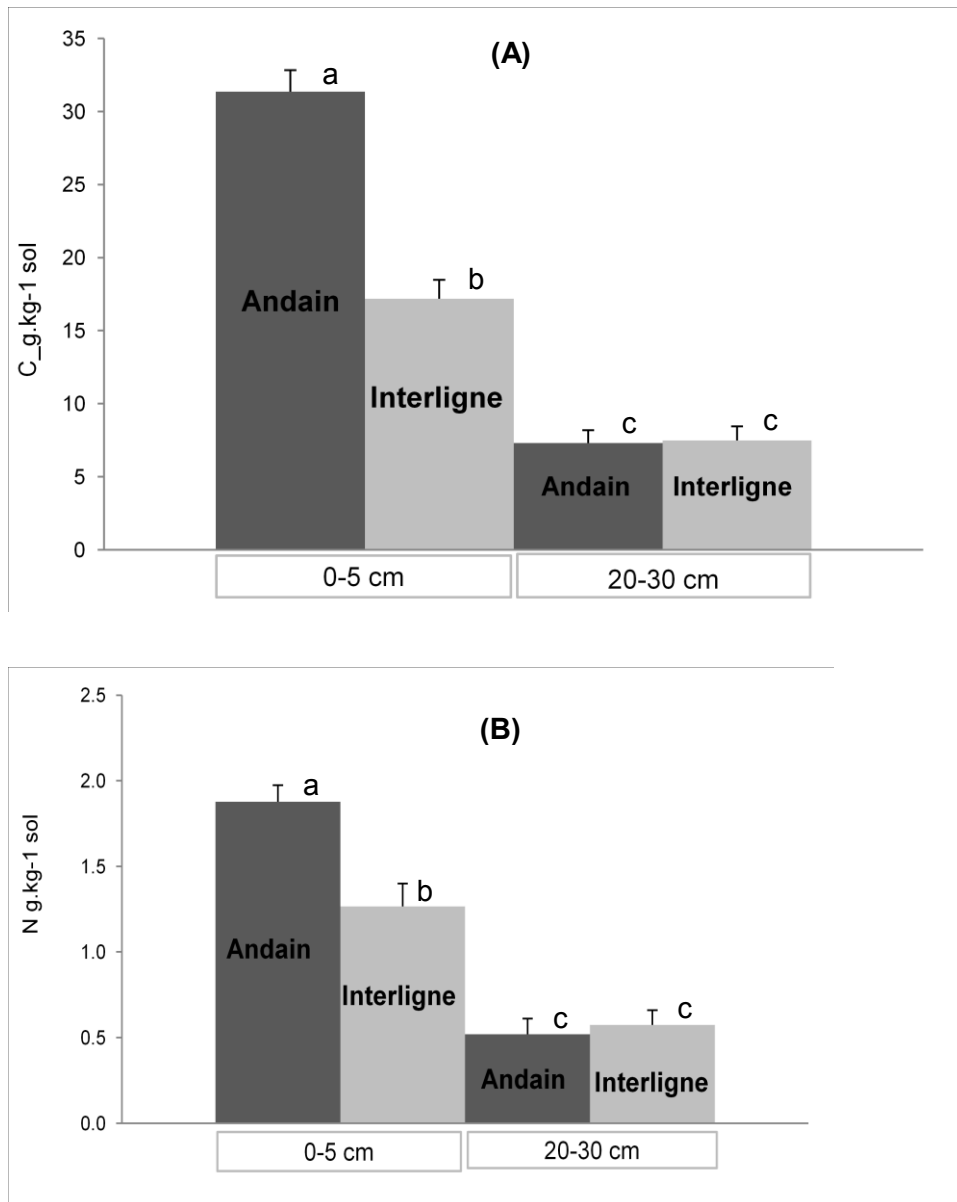


Figure 5.3.5 : Teneur en carbone et en azote totaux dans le sol par position et par profondeur. Par variable, les histogrammes avec la même lettre indiquent une différence non significative ($P < 0,05$; test de Tukey).

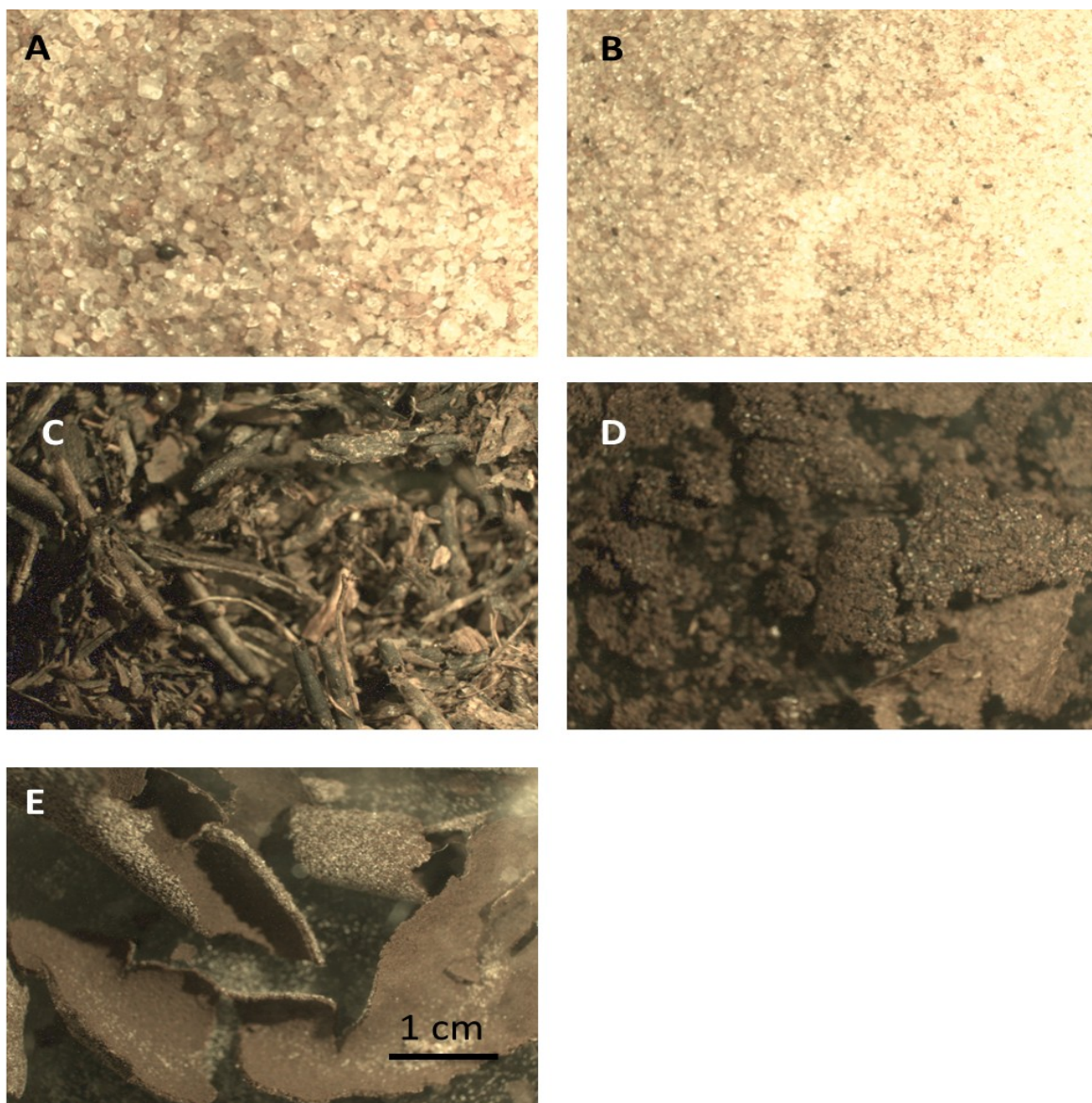


Figure 5.3.6. Images des fractions organiques et minérales du sol. Observation à la loupe binoculaire au grossissement 10x25 de différentes fractions d'un prélèvement de sol en surface (0-5 cm) sous andain.

A = fractions minérales sableuse de taille supérieure à 200 μm ; **B** = fractions minérales sableuses de taille : 50-200 μm ; **C** = fractions organiques de taille supérieure à 200 μm constituées de débris végétaux ; **D** = fractions organiques de taille : 50-200 μm ; **E** = fractions organo-minérales fines de taille : 20-50 μm . L'échelle est la même pour toute la figure.

5.3.4. Discussion

L'activité microbienne des sols a été fortement influencée par la présence de la matière organique. La restitution des feuilles du palmier à huile a augmenté significativement la biomasse microbienne sur les 10 premiers centimètres de sol sous andains, par rapport aux autres profondeurs dans les andains et les interlignes. Cet effet semble être en corrélation avec la respiration microbienne qui est plus élevée en surface qu'en profondeur et plus élevée sous les andains que dans les interlignes. La richesse du milieu en matière organique est favorable à l'augmentation de la biomasse microbienne dans le sol qui est responsable du dégagement important du CO₂ (Sowerby et al., 2000). Raich et Naderhoffer (1989) cités par Luo et Zhou (2006) ont montré dans différents écosystèmes forestiers que les apports annuels de litière au sol sont en corrélation positive avec la respiration microbienne du sol. La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes d'un sol sont en relation directe avec la présence de la matière organique (Frisque, 2007). La décomposition des feuilles restituées en andain diminue la densité du sol (résultats du chapitre 4) et augmente sa porosité (Djègui, 1992). Ces caractéristiques confortent à la fois la capacité de rétention en eau du sol et les conditions aérobies qui seraient favorables aux microbes du sol pour une minéralisation rapide de la matière organique (Bertolino et al., 2010 ; Gu & Riley, 2010 ; Fan et al., 2013).

La relation entre dégagement du CO₂ et profondeur du sol indique une activité de minéralisation de la matière organique par les microorganismes, plus rapide en surface qu'en profondeur. Ces résultats concordent avec ceux de Fang et Moncrieff (2005) qui ont observé une diminution du dégagement du CO₂ du sol de près de 50% entre 0-8 et 24-32 cm dans différents agro-systèmes. Dans notre étude, la respiration microbienne a baissé de 90% et de 60% respectivement dans les andains et les interlignes des parcelles RT, de 0-5 à 20-30 cm de profondeur du sol. Malgré cet important dégagement de CO₂ en surface, indiquant une bonne activité microbienne à 0-5 cm, le ratio C/N du sol reste élevé dans cet horizon et pourrait s'expliquer par la quantité élevée de matière organique fraîche restituée régulièrement au sol. La plus faible respiration en profondeur pourrait s'expliquer par la présence moins importante des bactéries aérobies associées à un substrat moins riche en C et N (Banerjee et al., 2006). Cette faible respiration (< 1 mgCO₂.g⁻¹.sol) reste dans le même ordre de grandeur que celle (en moyenne 0,2 mgCO₂.g⁻¹.sol) trouvée par Pallo et al. (2008) dans un sol ferrallitique très pauvre du Burkina-Faso. Il resterait toutefois à identifier la nature des micro-organismes du sol et caractériser leur métabolisme car une importante biomasse microbienne n'induit pas toujours une respiration microbienne élevée. Dans cette étude, on a observé une faible

relation, néanmoins significative ($r = 0,26$ pour $n = 66$ $p < 0,05$), entre la biomasse microbienne et la respiration microbienne (figure 5.3.4). Il existerait donc une part importante de l'activité microbienne qui ne serait pas directement liée à la biomasse. Selon certains auteurs, la respiration microbienne n'est pas toujours corrélée avec le carbone microbien. Elle serait plus liée à l'activité cellulaire qu'à la biomasse microbienne (Fang et Moncrieff, 2005 ; Kuzyakov, et al. 2009 ; Yan et Marschner, 2012).

Les caractéristiques de la matière organique du sol (tableau 5.3.3) montrent une proportion élevée de fractions organiques grossières sous les andains de feuilles. La présence importante de ces débris végétaux peut également expliquer la forte activité microbienne en surface.

Le fractionnement granulométrique a consisté en une répartition de la matière organique en classes de taille (Feller, 1979). Ces classes de taille sont souvent liées à la nature de la matière organique : débris, matière organique plus ou moins transformée, matière organique associée à des argiles (Feller, 1979 ; Feller et Fritsch, 1991). Le rapport C/N des fractions est en ce sens illustratif du changement de nature de la matière organique avec la taille. Le C/N décroît avec la taille des fractions, se rapprochant du C/N microbien dans les fractions les plus fines. Il indique une transformation microbienne des matières organiques depuis les débris jusqu'à la matière organique associée aux argiles. Les ratios C/N des fractions ne sont pas différents entre andain et interligne, et indiquent a priori une même qualité de matière organique dans les deux positions. Les tendances obtenues dans notre étude pour les ratios C/N sont similaires aux résultats de d'Annunzio et al. (2008) qui ont trouvé dans les sols sous *Eucalyptus*, des ratios C/N de 26, 23, 17 et 13 respectivement pour les fractions de taille $> 200\mu\text{m}$, $50\text{-}200\mu\text{m}$, $20\text{-}50\mu\text{m}$ et $0\text{-}20\mu\text{m}$.

Les fractions organiques sous les andains sont constituées essentiellement de débris végétaux à divers degrés d'altération et composées de débris foliaires, racinaires et fongiques plus ou moins reconnaissables. Les débris organiques sont plus humifiés dans la fraction $0\text{-}20\mu\text{m}$ que dans la fraction $50\text{-}200\mu\text{m}$ et que dans la fraction $>200\mu\text{m}$, d'après l'évolution du ratio C/N. Ceci confirme les observations faites par Feller et al. (1994). Les différences entre les taux de fractions organiques des andains et des interlignes indiquent une différence entre les taux de fractions minérales des deux positions.

Les teneurs en carbone et en azote des différentes fractions dans le sol sont significativement plus élevées sous les andains que dans les interlignes pour les fractions organiques grossières. Dans les fractions fines du sol sous les andains ces teneurs sont supérieures à celles des interlignes ; mais la différence n'est pas significative au seuil de 5%. Dans la couche $0\text{-}5\text{ cm}$ la teneur en carbone dans les fractions fines dépassent de $3\text{ mgC.g}^{-1}\text{sol}$ les teneurs des fractions

fin des interlignes. **On peut conclure qu'après 10 ans de restitution des feuilles d'élagage, il y a une augmentation de plus de 45% du stock de carbone dans les fractions fines de la couche 0-5 cm dans l'andain par rapport à l'interligne.** Cette augmentation est de 34% dans la couche 20-30 cm. **Ces résultats confirment l'amélioration du complexe argilo-humique et de la capacité d'échange cationique par le recyclage des feuilles, telle que trouvée dans le chapitre précédent.** La contrainte liée à la méthode du fractionnement de la matière organique qui est consommatrice de temps, n'a pas permis de faire cette étude à des profondeurs successives. La prise en compte de profondeurs successives depuis la surface et une durée plus longue de restitution des feuilles pourrait mieux préciser ces résultats dans le profil du sol et améliorer la qualité de la matière organique en profondeur.

Les différences significatives obtenues entre andain et interligne à 0-5 cm pour les taux de carbone et azote totaux du sol (figure 5.3.5) sont dues aux parts importantes de carbone et d'azote des fractions organiques du sol (tableau 5.3.3). Ces résultats montrent que les feuilles de palmier à huile restituées au sol ont enrichi le sol sous andain en azote ($\sim 2\text{mgN.g}^{-1}$). Cela s'explique par les forts taux d'azote ($> 2\%$) dans les feuilles (précisément dans les folioles) du palmier, rapportés par plusieurs auteurs (Caliman et al., 1994 ; Khalid et al., 1999 ; 2000...). Ces résultats qui montrent une amélioration sous andain des caractéristiques de la matière organique confortent l'augmentation de l'activité microbienne et montrent le rôle des micro-organismes dans la minéralisation de la matière organique du sol (Gold et Alic., 1993 ; Gobat et al., 1998).

5.3.5 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont démontré que le mode de gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile influence l'activité microbienne du sol et la qualité de la matière organique.

Une différence entre la restitution totale et la restitution nulle des feuilles a été mise en évidence pour la biomasse et la respiration microbienne du sol : l'activité microbienne du sol est plus importante sous les andains que dans les interlignes et en surface qu'en profondeur. Cette différence est fortement liée à la qualité granulométrique de la matière organique. En effet, la restitution totale des feuilles a significativement augmenté les fractions organiques grossières sous les andains par rapport aux interlignes. Ces fractions organiques grossières sont constituées de matière organique minéralisable.

Cependant, les teneurs et quantités de carbone organique dans les fractions organo-minérales fines sous andain sont aussi plus élevées que celles des interlignes. Ceci suggère également une stabilisation d'une partie de la matière organique sous andain.

La prise en compte de profondeurs successives dans le profil du sol et d'une durée de restitution plus longue permettrait de mieux préciser ces résultats.

5.4 Conclusion du chapitre 5

Le chapitre 5 a répondu à l'objectif d'étudier au-delà de la profondeur de 20 cm prise en compte dans le chapitre 4, l'effet de la gestion des feuilles d'élagage sur des caractéristiques bio-physico-chimiques du sol.

La gestion des feuilles a induit une variabilité spatiale et temporelle des stocks de carbone et d'azote sur 0-50 cm, qui ont significativement augmenté à l'âge adulte en mode RT (60MgC.ha^{-1} et 4 MgN.ha^{-1}) par rapport au mode RN (35MgC.ha^{-1} et 3MgC.ha^{-1}). **Comme déjà observé dans le chapitre 4, il est par ailleurs intéressant de noter que la restitution nulle des feuilles n'a pas baissé les stocks de matière organique du sol au cours du temps.**

La restitution en andain a également induit un effet sur d'autres paramètres physico-chimiques et biologiques du sol. Mais cet effet est resté seulement dans les 20 premiers centimètres de profondeur. Le sol a été enrichi en carbone (20gC.kg^{-1}), et en azote ($1,5\text{gN.kg}^{-1}$) qui ont pris des valeurs très élevées (30gC.kg^{-1} et 2g.kg^{-1}) à 0-5 cm. le pH du sol a augmenté de 0,5 unité par rapport à la restitution nulle des feuilles. La somme des cations échangeables et la CEC ont été améliorées. Dans les 20 premiers centimètres du sol, la CEC est plus liée à la matière organique du sol qu'aux particules minérales

L'activité biologique qui s'est intensifiée suite à la restitution des feuilles a modifié le statut de la matière organique du sol. Les fractions fines du sol se sont davantage enrichies en carbone en mode RT qu'en mode RN, stabilisant davantage une partie de la MOS sous andain que dans l'interligne. Mais sous andain, une part importante du carbone se retrouve également dans des fractions grossières facilement minéralisables. Les ratios C/N du sol sont restés très élevés à cause des apports périodiques de feuilles en andains. Ceci confirme un rôle de "puits de carbone" du sol des palmeraies villageoises en mode RT, mais montre aussi qu'une partie du carbone stocké reste facilement minéralisable.

L'amélioration de la fertilité du sol due au recyclage des feuilles d'élagage pourrait avoir un effet direct sur le développement du palmier et sa nutrition minérale. Ces deux aspects ont été étudiés dans les chapitres qui suivent. Le chapitre 6 rapporte les résultats des effets de la gestion des feuilles sur les biomasses et minéralo-masses aériennes, et le chapitre 7 rapporte les résultats de ces effets sur le développement du système racinaire.

Tableau de synthèse des observations de sol faites en palmeraies adultes (13-20 ans). RT = restitution totale et RN = restitution nulle

Paramètres physico-chimiques

Profondeurs	Paramètres	Gestion des feuilles		Effet recyclage des feuilles	Observations
		Andain = RT	Interligne = RN	(RT-RN)/RN*100	
(MTE) 0-50 cm	Stock C (Mg.ha ⁻¹)	58	37	57%	Amélioration significative des paramètres physico-chimiques du sol due au recyclage des feuilles
	Stock N (Mg.ha ⁻¹)	4	3	33%	
0-20 cm	C (g.kg ⁻¹)	20	9	122%	
	N (g.kg ⁻¹)	1,3	0,7	86%	
	pH	6	5,5	9%	
	Ca (meq.100g ⁻¹)	4,9	2,4	104%	
	Mg (meq.100g ⁻¹)	2	0,7	186%	
	K (meq.100g ⁻¹)	0,1	0,04	150%	
20-30	C (g.kg ⁻¹)	5	3,7	35%	Pas d'effet significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres physico-chimiques du sol
	N (g.kg ⁻¹)	0,4	0,4	0%	
	pH	5,8	5,7	2%	
	Ca (meq.100g ⁻¹)	2	1,8	11%	
	Mg (meq.100g ⁻¹)	0,7	0,7	0%	
	K (meq.100g ⁻¹)	0,03	0,02	50%	
30-50	C (g.kg ⁻¹)	3,6	3,4	6%	Pas d'effet significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres physico-chimiques du sol
	N (g.kg ⁻¹)	0,4	0,4	0%	
	pH	5,7	5,7	0%	
	Ca (meq.100g ⁻¹)	2	2,2	-9%	
	Mg (meq.100g ⁻¹)	0,8	0,9	-11%	
	K (meq.100g ⁻¹)	0,02	0,02	0%	

Tableau de synthèse des observations de sol faites en palmeraies adultes (13-20 ans). RT = restitution totale ; RN = restitution nulle ; FO = fraction organiques ; F = fraction organo-minérales

Caractéristiques de la matière organique du sol et paramètres microbiologiques

Profondeurs (cm)	Paramètres	Gestion des feuilles		Effet recyclage des feuilles	Observations
		Andain = RT	Interligne = RN	(RT-RN)/RN*100	
0-20	Respiration microbienne (mgCO ₂ .g ⁻¹)	3,1	1,2	158%	Amélioration significative des paramètres microbiologiques du sol due au recyclage des feuilles
	Biomasse microbienne (mgC.g ⁻¹ sol)	244,4	106,6	129%	
20-30	Respiration microbienne (mgCO ₂ .g ⁻¹)	0,5	0,8	-38%	Pas d'effet significatif du recyclage des feuilles sur les paramètres microbiologiques du sol
	Biomasse microbienne (mgC.g ⁻¹ sol)	53,2	37,8	41%	
0-5	Quantité FO et F (mg.g ⁻¹ sol)	343,5	234,7	46%	Amélioration significative des caractéristiques de la matière organique du sol due au recyclage des feuilles
	Csol FO grossière (50-200 et > 200 µm) (mgC.g ⁻¹ sol)	8,4	4,2	100%	
	Csol FO fines (0-20µm) (mgC.g ⁻¹ sol)	10,4	7,1	46%	
20-30	Quantité FO et F (mg.g ⁻¹ sol)	238,7	262	-9%	Pas d'effet significatif du recyclage des feuilles sur les caractéristiques de la matière organique du sol
	Csol FO grossière (50-200 et > 200 µm) (mgC.g ⁻¹ sol)	1,5	2,1	-29%	
	Csol FO fines (0-20µm) (mgC.g ⁻¹ sol)	3,9	2,9	34%	

Chapitre 6 : Gestion des feuilles d'élitage et biomasses et minéralo masses des compartiments aériens des palmeraies

Comme annoncé dans la stratégie de recherche, la phase d'étude du système sol-plante comprend celle des biomasses et minéralo-masses aériennes de la plante qui est présentée dans ce chapitre 6. A cet effet, des méthodes non destructrices d'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc du palmier à huile ont été établies. Elles sont présentées dans deux sous-chapitres (6.2 et 6.3), et leur application (estimation des biomasses des organes aériens) est décrite dans un sous-chapitre suivant (6.4) qui présente aussi certaines données complémentaires (estimation des minéralo masses et analyse de l'origine génétique du matériel végétal étudié). Dans la mesure où les sous-chapitres 6.2, 6.3 et 6.4 contiennent, conformément à leur forme d'article leur propre section d'introduction et de conclusion, l'introduction et la conclusion du chapitre 6 constituent des résumés condensés de ces sections.

6.1 Introduction du chapitre 6

La demande sans cesse croissante de l'huile de palme dans le monde est à la base de la forte expansion de la culture du palmier à huile dans les zones tropicales humides (Oil World Annual, 2010). Dans le contexte actuel de gestion durable des terres pour lutter contre le changement climatique, cette culture est critiquée par des auteurs. Car lorsqu'elle remplace des forêts, elle entraîne de fortes émissions de carbone sous forme de CO₂ vers l'atmosphère (Morel et al., 2011; Wakker, 1999). Elle pourrait également entraîner des manques à gagner par rapport aux forêts en termes de séquestration du carbone atmosphérique. Selon d'autres auteurs la culture du palmier à huile pourrait stocker des quantités importantes de carbone dans sa biomasse aérienne constituée majoritairement par le tronc, les feuilles et les régimes de fruit. Lorsque les palmeraies ne remplacent pas des forêts, comme c'est le cas de la plupart des palmeraies villageoises du Bénin (Aholoukpè et al., 2013a), elles peuvent jouer un rôle dans la séquestration du carbone atmosphérique, par rapport à d'autres systèmes agroforestiers. Il existe donc le besoin de quantifier la biomasse aérienne des palmeraies pour répondre à ces interrogations. De même, le contexte particulier de gestion des feuilles d'élitage des palmeraies villageoises du Bénin, qui induit des modifications des paramètres de fertilité du sol, pourrait impacter la nutrition minérale et la production de biomasse des palmiers.

Si l'estimation de la biomasse de régimes de fruit se fait aisément par pesée de la production, l'estimation de la biomasse du tronc et des feuilles se fait par des méthodes lourdes d'abattage des arbres, très difficiles à appliquer, ou par des méthodes d'estimation basées sur l'utilisation d'équations allométriques. Dans ce dernier cas, les seules équations de Corley et al. (1971) pour l'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc, ont été établies dans une écologie donnée et avec des palmiers dont les origines génétiques ne sont pas précisées.

Des équations allométriques établies dans les conditions du Bénin pourront servir à estimer la biomasse aérienne des palmeraies. Dans le cadre de notre étude, ces équations, une fois établies, seront associées aux méthodes conventionnelles d'estimation de la production de régimes et d'analyse des végétaux au laboratoire pour évaluer les biomasses et minéralo-masse aériennes des palmeraies villageoises.

Dans la suite de ce chapitre, des équations allométriques ont été établies pour l'estimation de la biomasse des feuilles du palmier à huile. Les résultats sont présentés dans le sous-chapitre 6-2 sous la forme d'un article publié en anglais dans une revue à facteur d'impact. Les références de cet article sont présentées ci-après.

Les équations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc sont présentées dans le sous-chapitre 6.3. Le sous chapitre 6.4 présente l'effet des modes de gestion des feuilles d'élagage sur les biomasses. Il présente également une estimation complémentaire des minéralo-masses (après détermination des teneurs en éléments minéraux des organes aériens de la plante par analyse de tissus végétaux au laboratoire) et des résultats complémentaires d'analyses de l'origine génétique du matériel végétal étudié, qui permettent de considérer cette origine comme une des causes possibles des éventuelles différences de biomasse.

6.2 Article publié: Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass.

Forest Ecology and Management 292 (2013) 122–129



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Forest Ecology and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/foreco



Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass

H. Aholoukpè^{a,e,f,*}, B. Dubos^b, A. Flori^c, P. Deleporte^d, G. Amadji^e, J.L. Chotte^f, D. Blavet^f

^a Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Bénin

^b CIRAD, UPR Performance des Systèmes de Culture des Plantes pérennes, F-34398 Montpellier, France

^c CIRAD, UMR Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes, F-34398 Montpellier, France

^d CIRAD, UMR Eco&Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes) INRA-IRD-SupAgro-Cirad, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

^e Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, BP 526 FSA/UA, Cotonou, Bénin

^f IRD, UMR Eco&Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes) INRA-IRD-SupAgro-Cirad, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

6.2.1 Introduction

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is the oleaginous plant that has the highest productivity. Following Corley and Tinker (2003) and Härdter and Fairhurst (2003), oil palm can potentially satisfy the fat needs of the world population. Since the 1990s, palm plantations are in expansion in humid tropical areas, and land under oil palm increased to 12.6 million hectares in 2010 (Oil World Annual, 2010) with annual palm oil production exceeding 32 million tons (Germer and Sauerborn, 2008). Mielke (2011) suggests that global demand for palm oil will be about 62 to 63 million tons in 2015.

The expansion of oil palm generates environmental conflicts when plantations encroach on high conservation value forest. Environmental threats include both loss of biodiversity and emission of greenhouse gases, including carbon (CO₂), during forest destruction (Germer and Sauerborn, 2008; Morel et al., 2011; Wakker, 1999). However, some authors claim that palm plantation can be a carbon sink (Germer and Sauerborn, 2008; Henson et al., 1999; Jaffré, 1983; Lamade and Bouillet, 2005).

Aboveground biomass appears as an important compartment to be considered for a better assessment of the environmental and agronomical impacts of oil palm plantation. In palm

plantation 96% of total annual dry matter production is stored in the aboveground biomass (trunk, fronds and bunches) (Corley and Tinker, 2003). When palm plantation does not immediately follow a primary forest, oil palm can increase the carbon stored in the soil through recycling of the aboveground biomass (Reinhardt et al., 2007; Klaarenbeek, 2009; Hartmann 1991, Jaffré, 1983). In the adult stage, maintenance pruning of palm trees and continuous recycling of fronds contributes to recycling annual dry matter, which was estimated at 10 t.ha⁻¹.yr⁻¹ in Ivory Coast (Hartmann 1991). For replanting, usually after about 25-30 years, palm trees of the previous generation are felled and trunk and fronds can be recycled in the field for progressively providing organic matter to the soil (Khalid et al., 2000; Yamada et al., 2010). Other possible uses of oil palm above ground biomass, as biofuel, plywood, timber etc., could also avoid increasing greenhouse gases (Reinhardt et al., 2007; Pleanjai et al., 2007).

Few data are available in the literature about the estimation of oil palm aboveground biomass. Among the components of oil palm aboveground biomass, the bunches biomass can be easily estimated by weighing samples at harvest. In contrast, the estimation of trunk and fronds biomass is less direct, and there is a need to develop robust and low cost methods that could be generalized for their estimation. Jaffré (1983) in Ivory Coast and Syahrudin (2005) in Sumatra measured the aboveground biomass of an oil palm plantation by destructive method (felling of the palm trees) whose application would involve financial losses for farmers. Dufrene (1990) estimated in Ivory Coast the dry biomass of fronds and trunk with an ecophysiological model that requires time consuming measurements. These methods cannot be used routinely to assess aboveground biomass of oil palm in private, industrial or smallholder plantations. In contrast, Corley et al. (1971) established in Malaysia allometric equations to predict oil palm frond and trunk biomass without felling the palm, and Khalid et al. (1999) applied these allometric equations in the same country for estimating the aboveground biomass. The equation⁶ of Corley et al. (1971) was based on the petiole cross section measured on fronds. However, previous studies (Dufrene et al. unpublished) had suggested that there could be a good relationship between frond biomass and some measurements on the rachis that avoid the destruction of the palm tree. Moreover, Corley's equations still remain to be tested in other conditions (climate, soil, genotype, cultural practices...).

⁶ $W = 0.1023 P + 0.2062$; where W = frond dry weight (kg) and P = petiole width x depth (cm²)

Thus, the aim of our study was to establish alternative allometric equations including new variables for predicting trunk and frond biomass and compare them to the one indicated by Corley et al. (1971).

Experimentations were carried out in Benin, West Africa, where oil palm plantations are in expansion with various genotypes and is therefore an interesting area for such a study. The present paper is focused on frond biomass, whereas the findings about trunk biomass will be reported in a subsequent paper.

6.2.2 Materials and Methods

6.2.2.1 Study area

The study was conducted in the Oil Palm Research Center of the *Institut National de Recherches Agricoles du Bénin* (INRAB), located at Pobè in southeast Benin (2°15"- 2°45"E and 6°-7°45 "N) and in neighboring smallholders plantations. In the study area, average annual rainfall is 1300 mm with a bimodal distribution that characterizes a sub-equatorial climate. This area is located on a plateau at an average altitude of 200 to 300 m. The soils are ferrallitic (oxisols according to USDA soil taxonomy). These soils are weakly desaturated, red, deep, and originate from sandy-clayey sediments of the Continental terminal (Azontondé, 1991).

6.2.2.2 Plant material and sampling

Oil palm (*Eleais guineensis*, Jacq.) is a monocotyledon belonging to the Palmaceae family. The fronds form a crown with a very regular phylotaxis (Ng et al., 2003) in which the position of the frond in the crown determines its rank (Fig. 6.2.1a). From the center of the crown to the periphery, there are unopened (spears) and opened (functional) fronds. The youngest fully opened frond is given a rank of one and older fronds are accorded progressively higher numbers, until 30 or 40 depending on the season and cropping practices. From four years old on, oil palm produces 18 to 24 fronds per tree per year. The palm frond takes about 30 months to develop; it may be photosynthetically active for 2 years, and then it dies (de Berchoux et al., 1986). Oil palm fronds are 7–8 m in length and comprise the following components: a petiole (1.5 m in length), extended by a rachis (5.5 - 6.5 m in length) on which the leaflets are inserted. The petiole cross section where the first leaflets are located (called point C) is at the junction between petiole and rachis (Fig. 6.2.1b). The area (width x thickness) of the petiole cross section has been proposed to predict frond biomass (Corley et al., 1971, Ng et al., 2003).

In this study, the selected oil palm plantations included trees of different genetic origins and ages (Table 6.2.1). The palm trees were 4 to 47 years old. Twenty-one of them were selected in the various plots of the research center. The four remaining were selected in smallholders plantations neighboring the research center.

Planting density was 143 trees per hectare. The research center's plantations had the same agronomical management (fertilizers, maintenance pruning and weeding practices) as most of industrial plantations in others regions. Agronomical management was less known in the smallholder plantations.

Most of the palm trees are from the widely distributed Deli X La Mé genetic origin marketed by Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement (Cirad) and INRAB to the palm planters in Benin and others regions. Two trees belonging to Deli x Yangambi origin whose vegetative development (height and petiole cross section) is supposed to be larger (Nouy et al., 1991) were also sampled. Three pure Deli and one pure Yangambi trees from old seed gardens where sampled too.

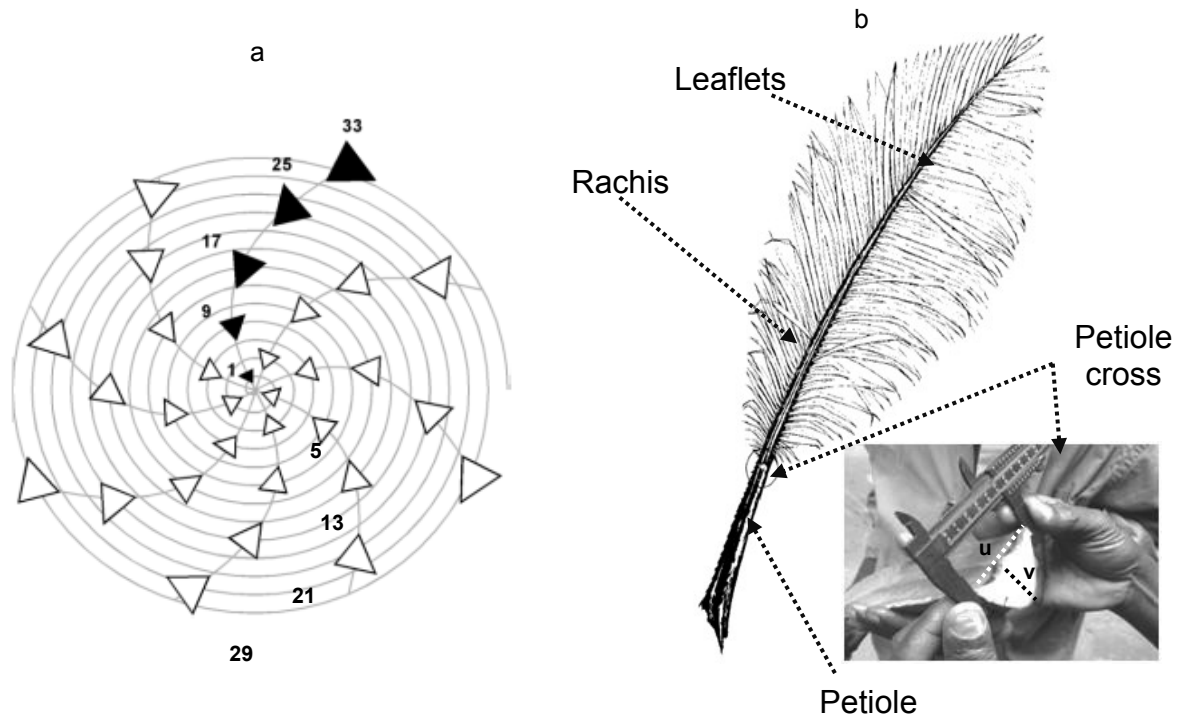


Figure 6.2.1. Spiral arrangement of fronds in palm tree crown and components of an oil palm frond. (a) Spiral arrangement of fronds. Numbers 1, 9, 17, 25, 33 and 5, 13, 21, 29 indicate frond positions respectively on spirals 1 and 5. Adapted from Ng et al. (2003). (b) Components of a frond. Letters u and v indicate respectively width and thickness of the petiole cross section. Adapted from Corley et al. (1971).

The choice of the trees was made in accordance to the felling planning established by the breeding division of the research center and it was not possible to avoid some dependency between the age of the trees and the genetic origins. The few trees that are not from Deli x La Mé origin are also the oldest ones.

Table 6.2.1. Characteristics of studied oil palm trees and some collected data

Code of tree	Age (year)	Height under F33 (m)	Genetic Origin	Localization	Management practices	Relation established		Mean biomass of mature fronds (kg)
Ben1	13	2.3	DLM	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)		3.9
Ben2	27	6.47	DLM	Pb. St.	Ind. plant.	DWfrond = f(DWrachis)		3.2
Ben3	13	2.6	DLM	Pb. St.	Gen. trial	DWfrond = f(DWrachis)		3.3
Ben4	12	4.0	DLM	Pb. St.	Gen. trial	DWfrond = f(DWrachis)		4.0
Ben5	16	4.3	DLM	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)		3.0
Ben6	38	7.6	Dp	Pb. St.	Seed garden	DWfrond = f(DWrachis)		3.4
Ben7	38	12.0	Dp	Pb. St.	Seed garden	DWfrond = f(DWrachis)		4.5
Ben8	16	3.8	DLM	Pb. St.	Ind. plant.	DWfrond = f(DWrachis)		4.5
Ben9	16	4.6	DLM	Pb. St.	Ind. plant.	DWfrond = f(DWrachis)		4.1
Ben10	16	4.3	DLM	Pb. St.	Ind. plant.	DWfrond = f(DWrachis)		4.2
Ben11	16	3.4	DLM	Pb. St.	Ind. plant.	DWfrond = f(DWrachis)		4.9
Ben12	29	8.7	DLM	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	3.1
Ben13	29	7.7	DLM	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	2.1
Ben14	29	9.2	DLM	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	3.5
Ben15	47	13.3	Dp	Pb. St.	Seed garden	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	3.6
Ben16	43	10.9	DY	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	3.8
Ben17	43	10.5	DY	Pb. St.	Agro. trial	DWfrond = f(DWrachis)	DWrachis = f(Rachis linear density)	4.4
Ben18	32	7.3	DLM	Pb. St.	Ind. plant.		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben19	41	10.4	Yp	Pb. St.	Seed garden		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben20	14	4.3	DLM	Pb. St.	Gen. trial		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben21	14	2.6	DLM	Pb. St.	Gen. trial		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben22	7	1.1	DLM	Sm. field	Sm. plant		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben23	7	1.2	DLM	Sm. field	Sm. plant		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben24	7	0.8	DLM	Sm. field	Sm. plant		DWrachis = f(Rachis linear density)	
Ben25	4	0.5	DLM	Sm. field	Sm. plant		DWrachis = f(Rachis linear density)	

Ben = Benin, DLM = Deli x La Mé genotype, Dp = Pure Deli genotype, DY = Deli x Yangambi genotype, Yp = Pure Yangambi genotype, DW = dry weight. Pb. St. and Sm. field refer to Pobè station and Smallholders field which indicate the localization of the studied plantation. Agro. trial, Ind. trial, Gen. trial, Sm. plant indicate respectively agronomical trial, industrial trial, genetic trial and smallholders plantations. F33 indicates the frond at rank 33.

6.2.2.3 Measurements

Due to the axial insertion of oil palm fronds in the crown, it is almost impossible to extract the entire petiole of a frond on a standing palm tree. To get precise measurements of the overall biomass of the fronds, 17 palm trees were felled and dissected to obtain the following informations:

- total number of fronds;
- dry weight of the petioles, rachis and leaflets obtained by weighing total fresh weight and determining dry matter content of each part on a subsample oven dried at 65° C to a constant weight;
- thickness and width of the petiole cross section;
- petiole and rachis length.

For a first group of 11 palms among these 17 palm trees, all the fronds from rank 1 to 9 were observed. For fronds with a higher rank, only those located on the two opposite spirals 1 and 5 (Fig. 6.2.1) were observed. In this group of palms, 217 fronds ranking up to 40 were observed.

For the second group of 6 felled trees, the same measurements were achieved but only on three randomly chosen mature fronds (ranked between 10 and 40). In this group, a total number of 18 fronds was observed. In addition, dry weight of a fragment of rachis (0.30 m) sampled mid way along the rachis was measured to evaluate the linear density (or mass-per-length) of the rachis.

A third group of 8 palms was observed without felling, thus without any observation of petiole dry weight. Three mature fronds were cut leaving a small part of the petiole (roughly 40 cm) in the crown. For the taller palms, a ladder was used to climb the trees. In this group, a total number of 24 fronds was observed. The following measurements were made on the sampled fronds:

- length of the rachis
- dry weight of the rachis and leaflets
- thickness and width of the petiole cross section
- dry weight of a fragment of 0.30 m length sampled mid way along the rachis.

6.2.2.4 Establishment and comparison of allometric equations

The following steps were undertaken to process data:

1. Analysis of the effect of frond rank on its biomass, based on data collected from the first group of palm trees (11 palms).

2. Calculation of within-tree variability of the dry weight of mature fronds (fully measured on the 17 felled trees) and choice of a number of fronds to be sampled to ensure a suitable precision.

3. Establishment of a linear regression (equation 1) to estimate rachis dry weight (DW_{rachis}) as a function of its length (L_{rachis}) and its linear density: $DW_{rachis} = f(\text{Rachis length and linear density})$. The rachis linear density was determined by: dry weight of the fragment (DW_{frag}) of 0.30 m per its length (L_{frag}). The 42 fronds of the second and third group of trees (6 felled trees + 8 standing trees) were used for this regression.

4. Establishment of a linear regression (equation 2) to estimate dry weight (i.e. the biomass) of the whole frond from the dry weight of the rachis: $DW_{frond} = f(DW_{rachis})$. Comparison of this equation with Corley's equation. 234 fronds fully measured on the 17 felled trees were used in this regression.

5. Establishment of a linear regression (equation 3) to estimate the mean dry weight of a mature frond ($MDW_{frondmat}$) from the biomasses of 3 mature fronds (of ranks 17, 21 and 25) calculated by equations 1 and 2.

SAS software was used for analysis of variance and linear regressions. The coefficient of determination R^2 was used to evaluate the regression models.

6.2.3 Results

6.2.3.1 *Difference in frond biomass as a function of frond rank.*

Figure 6.2.2 shows the trends obtained for six trees belonging to the first group of palm trees studied. These trends are representative of the model obtained for the first 11 trees studied. The model represents the status of all fronds at a given moment and indicates that oil palm frond biomass (DW_{frond}) increases until about rank 9. Beyond rank 10, the biomasses are distributed randomly around a mean value characteristic of the tree. Thus, the fronds are mature and most of them lie in an interval of $\pm 0.5\text{kg}$ around the mean value.

The results of analysis of variance of mature fronds biomass (rank > 10) are presented in Table 6.2.2 and show that between-trees variability of mature fronds biomass is highly significant (Pvalue < 0.0001). However, the variability of mature fronds biomass does not appear significantly linked to the age (Pvalue = 0.391) and to the genotypes (Pvalue = 0.206) of the oil palms studied. For instance the mean value for the two Deli x Yangambi trees (3.8 kg and 4.4kg) are similar to most of the values obtained for Deli x La Mé trees (Table 6.2.1).

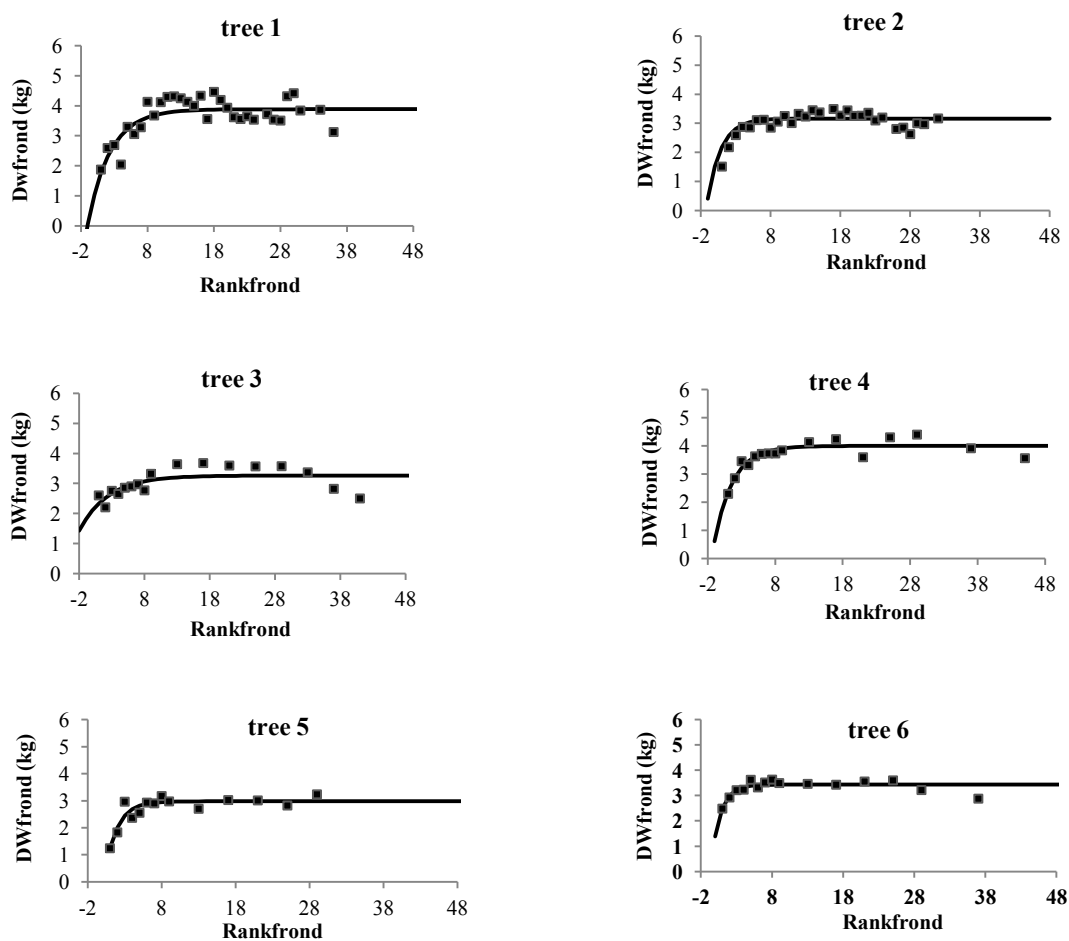


Figure 6.2.2. Difference in frond biomass as a function of frond rank.

Tableau 6.2.2. Results of analysis of variance of mature leaf biomass (asymptote of the curves in Fig 6.2.2) : 11 felled trees.

Source	DF	F Value	Pr>F	Residual Standard Deviation (kg)
Tree	10	23.33	<0.0001	0.383
Class Age	2	0.947	0.391	0.653
Genotype	1	1.614	0.206	0.651

6.2.3.2 Allometric equation for estimating frond biomass

6.2.3.2.1 Estimation of the rachis biomass

A good linear regression without bias (fig.6.2.3) was obtained between, on the one hand, rachis biomass (DW_{rachis}) and, on the other hand, the linear density and the length (L_{rachis}) of the rachis biomass. The dry weight of the rachis was estimated by the equation 1 (Eq.1):

$$\text{Eq.1: } DW_{rachis} = 1.133 \times \frac{DW_{frag}}{L_{frag}} \times L_{rachis} \quad (n=42; R^2=0.94; SD=0.08 \text{ Kg})$$

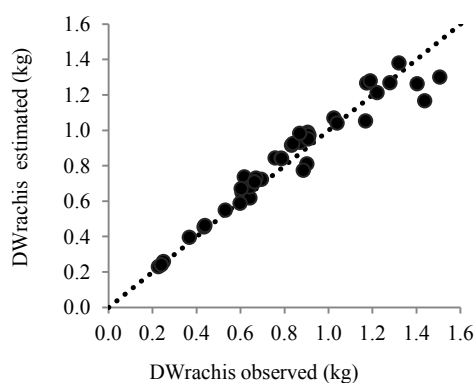


Figure 6.2.3. Estimated versus observed rachis biomass. The 1:1 line is shown.

6.2.3.2.2 Linear regression between total dry weight of the frond and the dry weight of the rachis

The total dry weight of the frond equals the total dry weight of the rachis, leaflets and petiole. The linear regression of measured frond dry weight and measured rachis dry weight (Fig. 6.2.4a) led to equation 2 (Eq.2). This linear regression compared to that defined using the petiole cross section (PCS) (Fig. 6.2.4b) shows that the rachis dry weight provides more information on frond dry weight ($R^2=0.62$; Standard Error = 0.694kg) than the petiole cross section ($R^2=0.22$).

$$\text{Eq.2: } DW_{frond} = 1.147 + 2.135 * DW_{rachis}$$

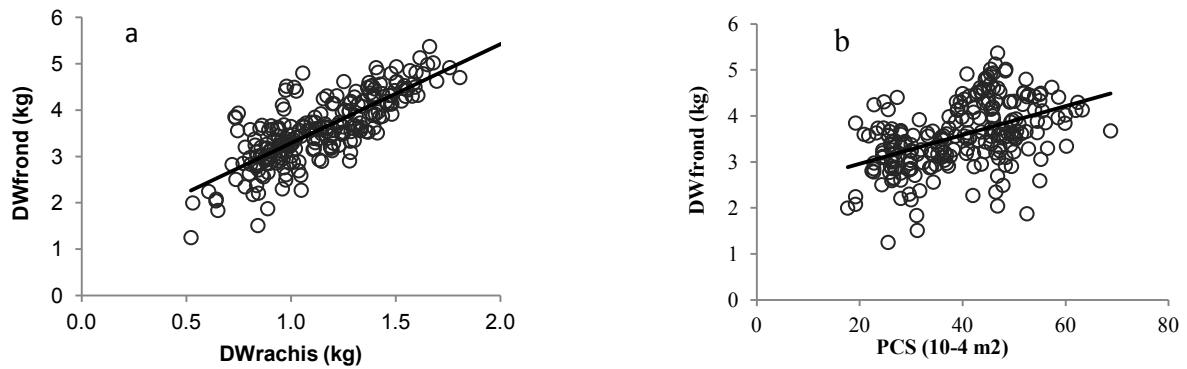


Figure 6.2.4. (a). Linear regression between measured frond dry weight and measured rachis dry weight. (b). Linear regression between measured frond dry weight and the petiole cross section. DWfrond and DWrachis indicate frond dry weight and rachis dry weight respectively. PCS indicates the petiole cross section. The regression curve is shown.

Equation 2 was fitted using the directly measured rachis dry weights for the 17 felled trees and not using rachis dry weights estimated by Equation 1. This was because sampling of the fragment (0.30m) of the rachis began only from the twelfth tree. As equation 1 is quite accurate ($R^2 = 0.94$), the possible additional error when applying equation 2 to estimated rachis values should be minor.

Also, figure 6.2.5a and 6.2.5b show the residuals of studied genotypes and oil palm ages effects on equation 2. The analysis of variance of these residuals did not show a significant effect of the genotypes (Pvalue = 0.066) but showed an effect of the age (Pvalue = 0.001). However the differences due to the age are low (0.1kg) as compared to the standard error (0.694kg) of the equation and to the mean biomass of a frond (3.58kg).

6.2. 3.2.3 Estimation of the mean biomass of a mature frond for one palm

The mean biomass of an individual mature frond of oil palm is estimated by equation 3 (Eq.3)

$$\text{Eq.3: } MDW_{\text{frondmat}} = 1.147 + 2.135 * [1/3 * (DW_{\text{rachis17}} + DW_{\text{rachis21}} + DW_{\text{rachis25}})]$$

Where DW_{rachis17} , DW_{rachis21} and DW_{rachis25} are determined with equation 1 and represent the dry weight of rachis 17, 21 and 25 respectively.

A good linear regression ($R^2 = 0.82$, Standard Error = 0.22 Kg) was obtained (Fig. 6.2.6) between mean dry weight of all mature fronds in a palm tree and a mean dry weight of 3 sampled mature fronds

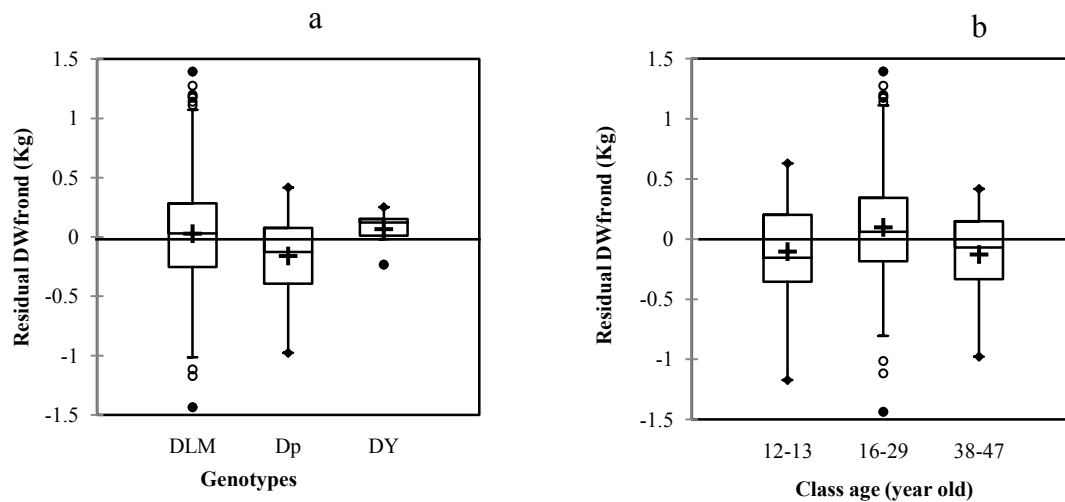


Figure 6.2.5. (a) Box plots of Eq. (2) residuals as a function of genotypes. DLM and DY indicate Deli x La Mé and Deli x Yangambi genetic origins respectively. Dp indicates pure Deli genetic origin. (b). Box plots of Eq. (2) residuals as a function of age. Class age 12–13 YO, Class age 16–29 YO, Class age 38–47 YO indicate palms age between interval 12–13, 16– 29 and 38–47 year old respectively.

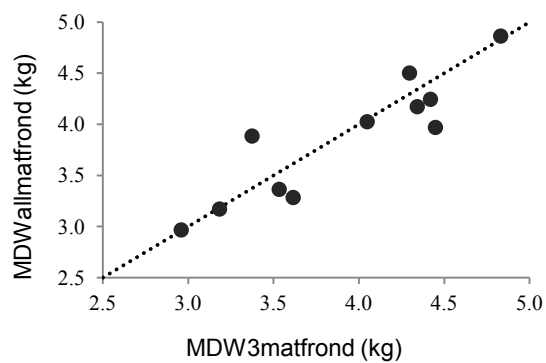


Figure 6.2.6. Mean dry weight of all mature fronds versus mean dry weight of three

6.2.4 Discussion

6.2.4.1 Differences in frond biomass according to rank

The almost identical maximum biomass of all fronds that developed at different times on a tree, indicates that all fronds should follow the same approximately linear development until the end of their growth (Fig. 6.2.2). Beyond rank 10 oil palm fronds are mature and their biomasses lie around a mean constant value, irrespective of studied genotypes and ages. The mature frond biomass appears therefore as a basic information for the characterization of the palm tree crown.

The observed pattern of the fronds development could be due to the allocation process of carbohydrates in the oil palm fronds (Legros et al., 2009). During the development of the fronds until rank 9, carbohydrates produced by photosynthesis would be allocated to new fronds until they reach their final biomass. When the fronds are mature (beyond rank 10), their photosynthetic functions would contribute to accumulating carbohydrates in other plant organs.

6.2.4.2 Predicting oil palm frond biomass

Fig. 6.2.4a and 6.2.4b show that frond biomass is better predicted from rachis biomass than from the petiole cross section proposed by Corley et al. (1971). The linear regression in Fig. 6.2.4a gives the basic equation (Eq.2) for estimating frond biomass from rachis biomass. Rachis biomass can be estimated from simple measurements: the linear density and the length of the rachis (Fig. 6.2.3). As the rachis does not have a constant sectional area, its linear density was obtained by multiplying the linear density of the fragment of 0.30 m by 1.133

(see equation 1). The two parameters linear density and length of the rachis can be easily measured without felling the tree. This explains why our method is called non-lethal as it is not detrimental to the life of palm tree. It is therefore suitable for diagnosis in smallholder plantations where felling is impossible because of the economic importance of the plant to the farmer. The field and laboratory operations involved by using of linear density and length of the rachis are lighter than those involved by weighing the whole fronds. This method also reduces possible errors associated with measurement of the petiole cross section.

In this study, contrary to the findings of Corley's study in Malaysia, frond biomass is poorly predicted by using the petiole cross section ($R^2 = 0.22$). This could be due to the difference between the genotypes (not specified in Corley's study) used in the two studies, and to the difference between the ecologies of the study areas (Henry et al. 2011). This less accurate

prediction could also be due to the difficulty of determining the exact position of the frond petiole cross section and the difficulty of accurately measuring of its dimensions (width and thickness). The proposed method uses the linear density of the rachis as an additional predictor variable in addition to pure dimensional predictors like frond length or petiole section area. This information about the specific weight of the frond tissues makes the prediction more accurate.

Our work was conducted using a wide range of palm tree ages and several genetic materials. It appears that the equation 2 developed is applicable in the ecology of the study area and is not influenced by the studied genetic material. This means that the variables used in the equation 2 take account of the effects of the studied genotypes. The standard error value (0.1 Kg) of the effect of the age on equation 2 is much lower than the mean biomass of a frond (3.58 Kg) and shows that there is a low influence of the ages of the studied palm trees. However, equation 2 has been established with adult palm trees and it should be tested on a young population of palms. According to de Berchoux et al. (1986), frond length increases significantly as a function of age of the trees until 10 to 13 years old. The established equations could also be tested in others regions, especially on palm varieties different to those studied in Benin. As the proposed method takes into account information about the specific weight of the frond tissues, it is likely that the equations should be valid in various conditions for palms with other morphologies.

6.2.4.3 Possible application of the established allometric equations

In the conditions of the study, individual frond biomass depends only on its position until it reaches the end of its growth (around rank 10). It is shown in footnote⁷ that the frond biomass produced by a palm tree each year is equal to the dry weight of its mature fronds multiplied by the number of fronds per year and does not depend on the shape of the frond growth curve. Thus, knowledge of the average weight of mature fronds using equation 3 is eminently applicable for estimating the frond biomass produced per year by an oil palm tree. The number of fronds produced per year is of the order of 20 (Dufrene et al., 1990; Hartmann, 1991). According to Ng et al. (2003), young oil palm trees at 2-3 years of age may produce up to 40 fronds per year, but at 4 to 6 years of age, frond production decreases rapidly and levels off between 18 to 24 fronds per palm tree per year.

⁷ Let C_i be the frond weight growth rate in rank i (in kg per unit of time). The biomass stored in fronds in the crown for a year with A time units is : $\sum_{i=i_0}^{i_f} C_i \times A$, where i_0 and i_f are the beginning and the end ranks of frond growth. If during this period, F fronds are produced by the palm tree, the biomass stored in the fronds is equal to $F \times \sum_{i=i_0}^{i_f} (C_i \times A/F)$. The quantity A/F is the time during which a frond is still at one rank. Thus, each $C_i \times A/F$ corresponds to the weight accumulated by the frond at each rank. And the sum is the total weight accumulated by the frond during its growth, that is to say its adult weight

The annual production of frond biomass could easily be estimated using equation 3 which involves simple measurements of the rachis of at least three mature fronds without the need to fell the palm tree. Table 6.2.2 shows that standard deviation of mature fronds dry weight was 0.38 kg within one crown. The standard error (0.22 Kg) of the estimation of the mean biomass of a mature frond from three mature fronds indicates that, for practical reasons, it's easy to choose three mature fronds ranked higher than 10 on the same or opposite spiral, (eg. fronds 17, 21 and 25). The choice of at least three mature fronds in the crown for the application of this equation ensures a certain degree of precision (fig. 6.2.6), which can then be improved depending on the objectives of diagnosis. For field application, cutting fronds below the point C with bush-knife for young palms or Malaysian-knife (used by harvesters) for the taller palms would be necessary to harvest the entire rachis.

Another application of the equations established could be the possibility to predict total fronds biomass at any given moment in the palm tree cycle. To do that, assessment of the biomass of young fronds with ranks below 10 could be done by linear interpolation between the biomass of fronds considered to have a negligible biomass (rank 0) and mature fronds at rank 10. The Biomass of all mature fronds is then added to get the total fronds biomass in the crown of a standing palm. This can be used to estimate the corresponding carbon stock and compare with that estimated by others authors as Jaffré (1983) and Khalid et al. (1999). Thenkabail et al. (2004) developed oil palm biomass models to calculate carbon stock levels of the West African oil palm plantations. The fact that carbon stored by palm tree can be estimated offers the possibility to assess its environmental contribution in the current context of forests conversion into oil palm plantations.

Estimating of carbon stock from stored tree biomass has been often advocated in forestry (Peltier et al., 2007; van Breugel et al., 2011; Singh et al., 2011).

For the second application of the established equations, it is however important to note that at each stage of its cycle, oil palm has a characteristic number of fronds. And some unpredictable events such as wind damage or severe insect attacks may cause loss of fronds in the crown. These missing fronds can lead to a bias in periodic monitoring of the amount of carbon stored by the plant. During harvest, pruning of fronds that support the bunches is a standard practice whose importance and frequency are related to production cycles. In this case, fronds that are pruned are usually over frond rank 30. Fronds lost due to wind or insect damage are generally of lower rank (rank < 25), and this should be taken into account when predicting carbon stored at a given time in the palm trees cycle. For both applications (annual

production of fronds biomass or total frond biomass in the crown at a given time), several palms must be evaluated to get results at the population level. As the between-trees variability in a population cannot easily be extrapolated from other studies, the number of trees to consider and the sampling design must be adapted to each case. Moreover, the non-lethal method and the low cost of observation allows any experimenter to choose a larger sample size to estimate the annual production of fronds biomass or the total biomass stored in an population with a precision as good as desired.

6.2.5 Conclusion

A basic allometric equation was developed to estimate oil palm frond biomass without felling the tree. This equation is mainly based on two simple measurements: linear density and the length of rachis. The use of these two variables of the rachis provides more information on frond biomass than the petiole cross section used in a previous allometric equation. The linear density and the length of rachis could also offer large possibilities to adapt the equations for others genotypes and ecologies.

The results showed that the mean biomass of a mature frond of the oil palm crown could be predicted from the mean biomass of three mature fronds. This does not exclude the choice of over three mature fronds to get more accurate prediction.

The knowledge of the mean biomass of a mature frond could allow estimation of the annual production of fronds biomass. It could also contribute to estimate the fronds biomass stored at a given moment in a palm plantation.

Acknowledgements

The authors wish to thank the institutions involved in the realization of this work for their material and financial support, particularly the Oil Palm research Center (Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes CRAPP-Pobè/INRAB) and PalmElit which is a subsidiary of CIRAD Montpellier, France. The authors also thank all the technicians in the Agronomy Division of Crapp-Pobè, for their support during field work.

The authors are grateful to the anonymous reviewers who helped to improve this paper and to Dr. Philippe Thaler for proofreading of the revised version.

6.3 Pré-article : Estimation de la biomasse aérienne du palmier à huile : Equations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc.

6.3.1 Introduction

L'estimation de la biomasse des systèmes forestiers et agro-forestiers est nécessaire pour des usages commerciaux (biocarburant, bois, fibre...), des planifications de développement national, des études scientifiques de la productivité des agro-écosystèmes, (flux de carbone et des nutriments) et pour l'évaluation des changements d'utilisation des terres cultivées sur le cycle global du carbone (Henry et al., 2010). Dans ce cadre, l'évaluation du flux de carbone dans les systèmes forestiers et agro-forestiers en relation avec le contexte actuel de changement climatique a été étudiée par plusieurs scientifiques (Arrouays et al., 2002 ; van Breugel et al., 2011; Coe et al., 2011 ; Houghton, 2005 ; Liddell et al., 2007). Selon Le Toan et al. (2011), la biomasse a été identifiée par la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (UNFCCC) comme la variable essentielle dont on a besoin pour réduire les incertitudes sur notre connaissance du système climatique.

La culture du palmier à huile en forte expansion dans les zones tropicales humides (Oil World Annual, 2010) génère des conflits environnementaux lorsque les plantations empiètent sur les forêts à haute valeur de conservation. Les menaces environnementales concernent la perte de la biodiversité et le déstockage du carbone relâché dans l'atmosphère sous forme de CO₂ lors de la destruction des forêts (Germer and Sauerborn, 2008 ; Morel et al., 2011 ; Wakker, 1999). Toutefois, certains auteurs soutiennent que les plantations de palmier à huile peuvent constituer un puits de carbone par accumulation de la biomasse aérienne et racinaire (Germer and Sauerborn, 2008 ; Henson et al., 1999 ; Jaffré, 1983 ; Lamade and Bouillet, 2005).

Vu que 96% de la production annuelle de biomasse du palmier à huile serait stockée dans sa partie aérienne (tronc, feuilles et régimes) (Corley and Tinker, 2003), l'estimation de la biomasse aérienne du palmier à huile constitue une étape importante dans l'évaluation des impacts environnementaux et agronomiques des palmeraies.

Parmi les méthodes d'estimation de la biomasse des systèmes forestiers et agro-forestiers, celles basées sur des mesures directes ou sur des modèles complexes d'écophysiologie (Jaffré et al., 1983 ; Syahrudin, 2005 ; Dufrêne, 1990) sont destructrices et consommatrices de temps. Les méthodes de mesures indirectes basées sur des équations allométriques peu coûteuses et facilement utilisables dans plusieurs écologies sont de plus en plus mises au point

(Djomo et al., 2010 ; Ebuy et al., 2011 ; Henry et al., 2010 ; Henry et al., 2011 ; Sampaio et al., 2010). Parmi ces nombreuses équations établies, Henry et al. (2011) estiment qu'il n'en n'existe pas encore assez pour l'Afrique sub-saharienne.

Pour l'estimation de la biomasse de la feuille du palmier à huile, Aholoukpè et al. (2013b) ont établi une équation allométrique⁸ en la comparant avec la méthode de Corley et al. (1971) dans les conditions (climat, sol, géotypes, pratiques culturales) du Bénin, différentes de celles de l'étude de Corley.

Corley et al. (1971) ont également établi en Malaisie une équation d'estimation de la densité du tronc du palmier en fonction de son âge. Henson et al. (2003) ont estimé la biomasse du tronc du palmier en Australie à partir du volume du tronc et de sa densité calculée avec l'équation de Corley (1971). Le volume du tronc du palmier a été estimé par Henson et al. (2003) à partir de la hauteur (du collet jusqu'à la base de la feuille 33) et du diamètre moyen du tronc. Les auteurs ont montré une variation de la biomasse du tronc du palmier en fonction de la densité de plantation.

Cet article présente la suite des travaux de Aholoukpè et al. (2013) sur la mise au point d'équations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc du palmier à huile à partir de variables facilement mesurables. Les principales questions abordées sont : i) existe-t-il des variations de densité le long du tronc? ii) comment estimer la densité globale du tronc par une méthode non destructrice et iii) comment utiliser la densité du tronc pour estimer sa biomasse.

6.3.2 Matériels et Méthodes

6.3.2.1 Site d'étude

L'étude a été conduite sur la station de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) située à Pobè au sud-est du Bénin (2°15' - 2°45'E et 6° - 7°45'N). La pluviométrie annuelle moyenne est de 1300 mm dont la répartition est de type bimodal caractéristique du climat subéquatorial. La station est située sur une zone de plateau d'altitude moyenne de 200 à 300 m dans la partie la plus septentrionale. Elle est occupée majoritairement par des sols ferrallitiques ou oxisols selon l'USDA Soil taxonomy. Ces sols, connus localement sous le nom de « Terre de barre », sont faiblement désaturés, rouges, profonds, formés sur du sédiment meuble sablo-argileux du Continental Terminal.

⁸ $DW_{frond} = 1.147 + 2.135 * DW_{rachis}$; where DW_{frond} and DW_{rachis} are respectively the frond and the rachis biomass

6.3.2.2 Matériel végétal et échantillonnage

Le palmier à huile (*Eleais guineensis*, Jacq) est une *Monocotylédone* de la famille des *Palmaceae*. Son tronc est renflé à la base, son diamètre diminue rapidement sur les deux premiers mètres et prend ensuite la forme d'un cylindre légèrement conique (figure 6.3.1). A la différence des dicotylédones on n'observe pas de croissance en diamètre au delà de la phase juvénile. La croissance en hauteur du tronc est liée à l'origine génétique du palmier (Ng et al., 2003a) et varie de 30 à 75 cm par an (de Berchoux et al. 1986 ; Ng et al., 2003b). Jusqu'à 3,5 ans après plantation, la tige du jeune plant s'épaissit (0,40 à 0,60 m de diamètre) pour former la base du tronc du palmier alors que la croissance en hauteur est faible.

L'échantillonnage des palmiers a été fait dans différentes palmeraies de la station de recherche. Vingt arbres ont été choisis. Ils sont de diverses origines génétiques, et de différents âges et hauteurs (Tableau 6.3.1). La densité de plantation dans les palmeraies est de 143 arbres par hectare. Les pratiques culturales de gestion des palmeraies (fertilisation, élagage d'entretien, fauchage et rabattage des mauvaises herbes) utilisées sur la station de recherche sont identiques à celles des plantations industrielles d'autres régions.

Le choix des arbres a été fait en accord avec le programme d'abattage des arbres établi par la division "Sélection" de la station. Il n'était donc pas possible d'éviter des déséquilibres liés à l'âge et aux origines génétiques.

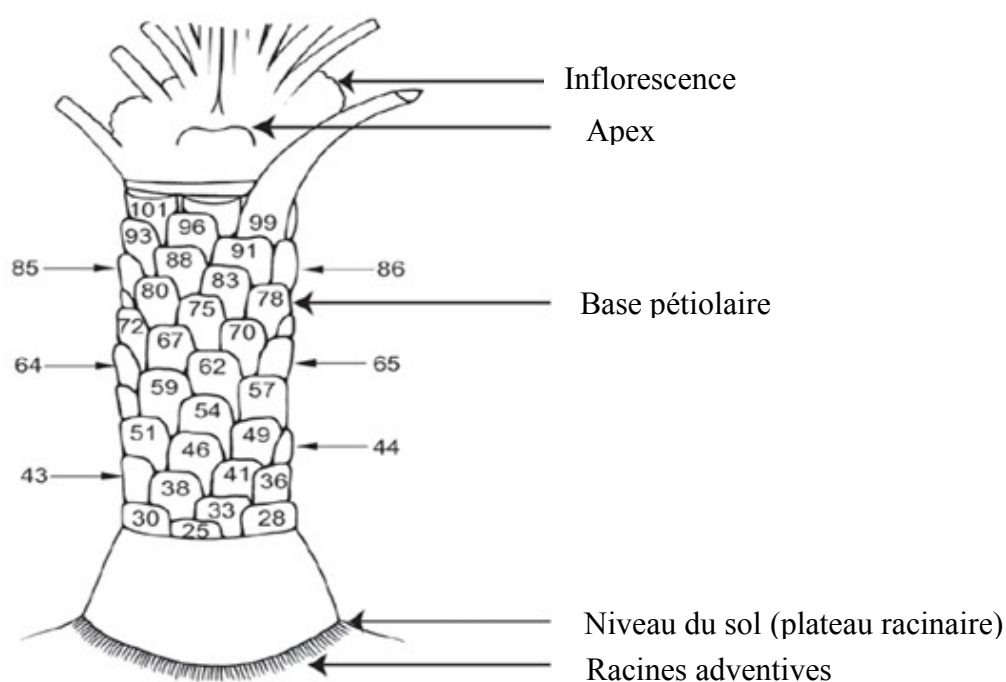


Figure 6.3. 1. Schéma du tronc du palmier, tiré de Ng et al. (2003b)

Tableau 6.3.1 : Caractéristiques des palmiers étudiés

Code des arbres	Age (an)	Hauteur sous F33 [H33](m)	Génotype	Type de plantation
Vingt palmiers mesurés pour l'établissement des équations				
Ben5	16	4.3	DLM	Essai agronomique
Ben6	38	7.6	Dp	Champ semencier
Ben7	38	12.0	Dp	Champ semencier
Ben8	16	3.8	DLM	Plantation industrielle
Ben9	16	4.6	DLM	Plantation industrielle
Ben10	16	4.3	DLM	Plantation industrielle
Ben11	16	3.4	DLM	Plantation industrielle
Ben12	29	8.7	DLM	Essai agronomique
Ben13	29	7.7	DLM	Essai agronomique
Ben14	29	9.2	DLM	Essai agronomique
Ben15	47	13.3	Dp	Essai agronomique
Ben16	43	10.9	DY	Essai agronomique
Ben17	43	10.5	DY	Essai agronomique
Ben26	30	6.8	DLM	Essai agronomique
Ben27	30	6.4	DLM	Essai agronomique
Ben28	37	8.05	Yoc	Essai agronomique
Ben29	32	7.6	DY	Essai agronomique
Ben30	32	9.1	DY	Essai agronomique
Ben31	26	8.7	DLM	Essai agronomique
Ben32	26	8.6	DLM	Essai agronomique

Ben= Benin, DLM = génotype issu de Deli x La Mé, Dp = génotype Deli pur, DY = génotype issu de Deli x Yangambi, Yp = génotype Yangambi pur, Yoc = génotype Yocouboé, F33 indique la feuille de rang 33.

6.3.2.3 Mesures

Les mesures ont été effectuées sur deux groupes d'arbres : un premier groupe de 13 arbres et un deuxième groupe de 7 arbres. Sur les arbres du premier groupe, les opérations suivantes ont été effectuées :

1. Mesure de la hauteur des arbres (H33) à partir du collet jusqu'à l'aisselle de la feuille 33 (Corley et al., 1971 ; Henson et al., 2003),
2. Abattage de l'arbre et détachement de toutes les bases pétiolaires (chicots),
3. Dissection du tronc en rondelles de 10 cm d'épaisseur à différentes hauteurs :
 - tous les 25 cm jusqu'à 1 m puis tous les 50 cm jusqu'à 1 m de H33 et tous les 25 cm dans le dernier mètre de la hauteur de l'arbre,
 - une rondelle est prélevée au niveau 0 juste au dessus du plateau racinaire.

Sur le deuxième groupe de 7 arbres toutes les opérations précédentes ont été effectuées. La seule différence se trouve au niveau des hauteurs de prélèvement des rondelles sur le tronc :

- prélèvement de rondelles tous les 50 cm à partir de la base jusqu'à 200 cm ; puis prélèvement d'une rondelle au milieu de la position à 200 cm et H33 ; et prélèvement d'une rondelle à 100 cm de la H33.
4. Mesures sur chaque rondelle
 - diamètre moyen de la rondelle,
 - masse sèche de chaque rondelle obtenue à partir de la masse fraîche de la rondelle et de la masse sèche d'une tranche de la rondelle séchée à l'étuve à 65°C jusqu'à obtention d'un poids sec constant,
 - mesure du diamètre et de l'épaisseur de la rondelle pour le calcul du volume
 - prélèvement de carottes sur deux diamètres de la rondelle à l'aide d'une tarière de Pressler de volume connu,
 - masse sèche des carottes obtenue après séchage à l'étuve à 65°C jusqu'à obtention d'un poids sec constant.

6.3.2.4 Etablissement et comparaison d'équations allométriques

L'établissement et la comparaison des équations allométriques ont fait objet des opérations suivantes :

- calcul de la densité de la rondelle par la méthode de référence selon la formule :
$$\text{densité ref} = \text{masse sèche de la rondelle} / \text{volume de la rondelle}$$

- analyse de l'évolution de la densité par méthode de référence en fonction de la hauteur du tronc,
- analyse de l'évolution de la section de chaque rondelle en fonction de la hauteur du tronc,
- calcul de la densité de la rondelle par carottage selon la formule :
masse sèche rondelle/volume carotte
- établissement d'une régression linéaire entre la densité de la rondelle obtenue par la méthode de référence et celle de carottage,
- calcul de la masse linéique de chaque rondelle par utilisation de la densité estimée et de sa section,
- analyse de l'évolution de la masse linéique du tronc (MLT) en fonction de la hauteur du tronc,
- Plusieurs modèles ont été testés et le plus parsimonieux a été retenu. La biomasse du tronc a été estimée en tenant compte des mesures de diamètres à la base (d_0), à 1,5m ($d_{1.5}$) et de la hauteur d'un tronçon de l'arbre (figure 6.3.2).
- régression linéaire entre la biomasse estimée et la biomasse mesurée du tronc.

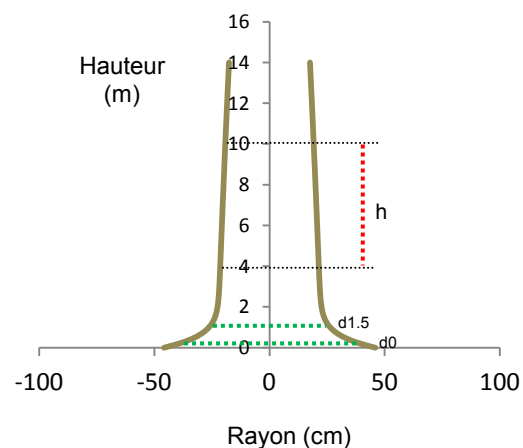


Figure 6.3.2. Mesures sur le palmier pour l'estimation de la biomasse du tronc.

6.3.3 Résultats

6.3.3.1 Evolution de la densité et de la section du tronc en fonction de sa hauteur

La densité du tronc augmente en fonction de la hauteur jusqu'à 1,5 m, et prend une valeur plus ou moins constante jusqu'en haut de l'arbre à environ 1 m de la feuille 33, puis décroît dans le dernier mètre de la hauteur de l'arbre (figure 6.3.3A). La densité du tronc est dépendante de l'arbre, tout comme la section du tronc (figure 6.3.3B) qui décroît en fonction de la hauteur. La section présente des valeurs élevées dans le premier mètre du tronc, puis diminue très rapidement jusqu'à 1,5m. Au-delà de la hauteur de 1,5m, la section du tronc diminue lentement jusqu'à la base de la feuille 33. Les figures 6.3.3A et 6.3.3B indiquent que la section du tronc diminue moins vite que la densité n'augmente en fonction de la hauteur. De plus, les variations de la section au sein d'un arbre sont moindres que celles de la densité.

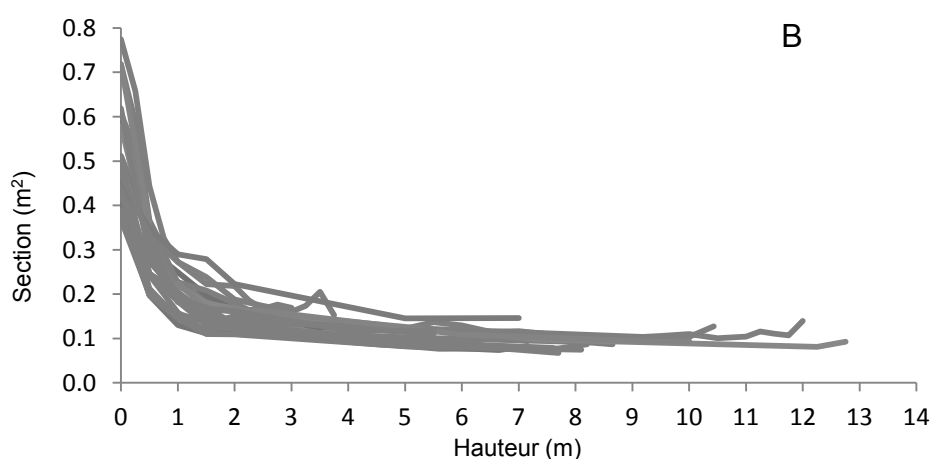
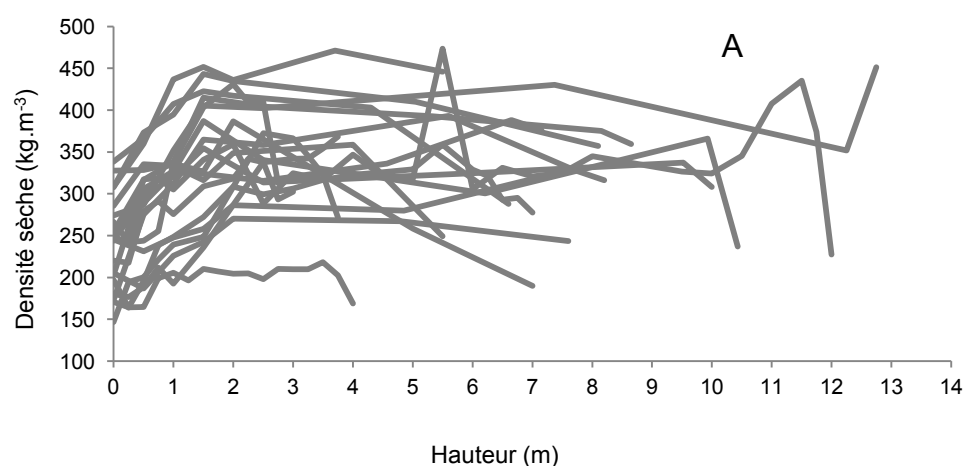


Figure 6.3.3. Evolution de la densité du tronc (A), de la section (B) en fonction de la hauteur du palmier. Par convention la base du palmier est au point 0. La hauteur est mesurée de la base vers l'apex.

6.3.3.2 Régression linéaire entre la méthode de référence et celle de carottage pour l'estimation de la densité du tronc

La densité de chaque rondelle obtenue par la méthode de référence s'estime bien ($R^2 = 0.988$, erreur standard résiduelle = 35 kg.m^{-3} ; $n = 205$) à partir de la densité de la carotte prélevée dans la même rondelle (figure 6.3.4). On a l'équation 1 :

Eq1 : $D_{\text{ref}} = 1,062 * D_{\text{car}}$ où D_{ref} et D_{car} indiquent respectivement la densité de référence et de carottage.

L'estimation de la densité s'ajuste bien en fonction de la densité par carottage indépendamment de l'âge, de la hauteur et de l'origine génétique de l'arbre ($P > 5\%$) (tableau 6.3.2). La prédiction est par contre dépendante du diamètre de l'arbre ($P < 5\%$) utilisé pour le calcul du volume.

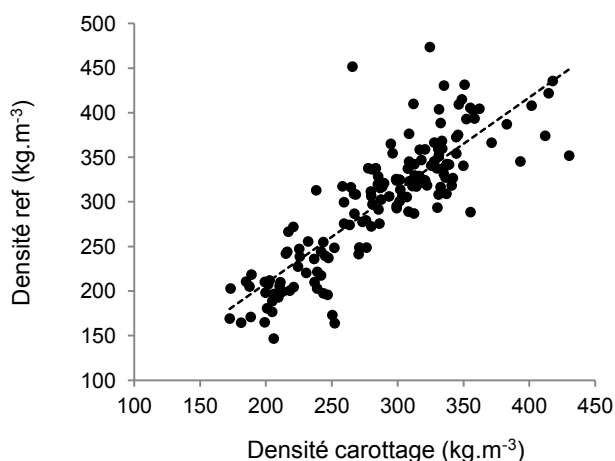


Figure 6.3.4 : Régression linéaire entre densité sèche des rondelles du tronc par la méthode de référence (Densité ref) et par la méthode de carottage.

Tableau 6.3.2 : Analyse de l'effet de variables sur l'estimation de la densité par méthode de carottage

Effet	P
Diamètre	< 0,001
Age	0.985
Origine	0.070
Hauteur arbre (H33)	0.179

La masse linéique du tronc est calculée avec la densité estimée (Eq1) et la section du tronc. Elle décroît en fonction de la hauteur de l'arbre (figure 6.3.5). Les valeurs baissent très

rapidement pour les hauteurs inférieures à 1,5m. Au-dessus de cette hauteur, la masse linéique baisse très lentement et vers une valeur constante pour les hauteurs élevées.

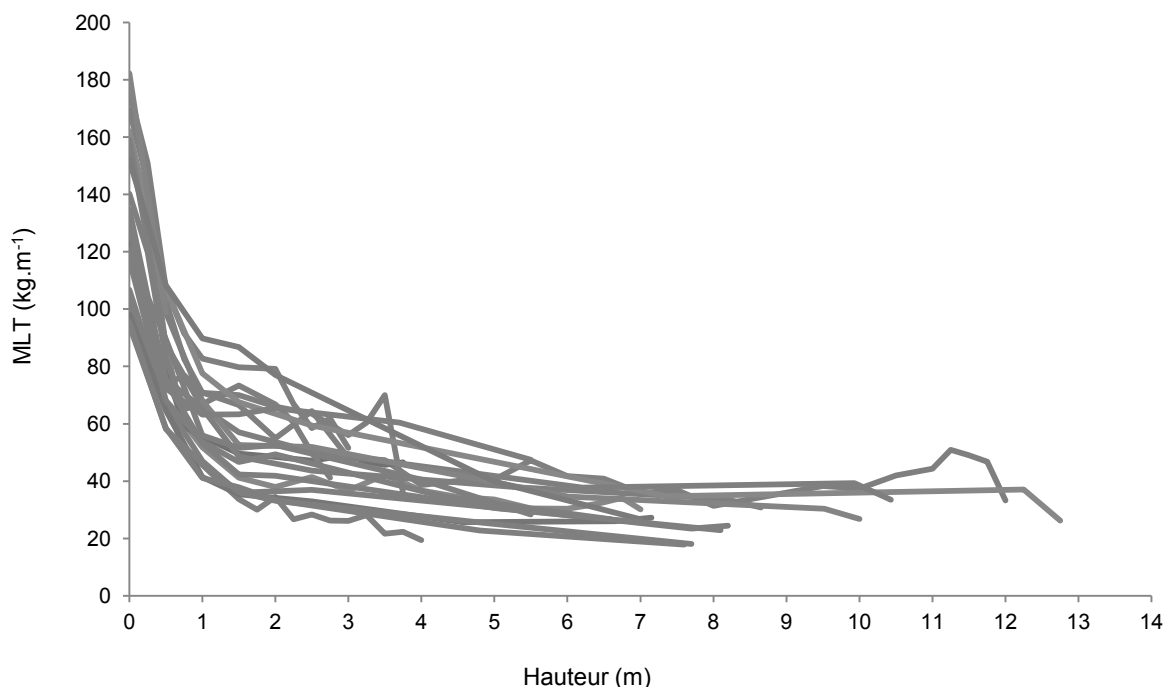


Figure 6.3.5. Evolution de la masse linéique du tronc (MLT) en fonction de la hauteur

6.3.3.3 Equations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc

6.3.3.3.1 Estimation de la masse linéique du tronc (MLT) à une position h

La masse linéique à une hauteur h sur le tronc, peut s'estimer à partir de la masse linéique au collet (point 0) et à 1,5 m et du diamètre en ces deux points. On a l'équation 2 :

$$\text{Eq2 : } \text{MLT}(h) = a * \text{MLT0} * (e^{-(b0-b1 * (\text{MLT1,5}/\text{MLT0})) * h}) + (c * h) + d * \text{diam0} + e * \text{diam1,5} + f$$

avec $R^2 = 0,953$; standard error = $7,51 \text{ kg.m}^{-1}$; $n = 205$

$\text{MLT}(h)$ = masse linéique à la hauteur h (kg.m^{-1}) ; MLT0 = masse linéique au point 0 ; MLT1,5 = masse linéique à la hauteur de 1,5 m ; diam0 = diamètre au point 0 ; diam1,5 = diamètre à 1,5 m de hauteur. h = hauteur du collet au point de mesure.

$a = 0,6525$; $b0 = 2,6001$; $b1 = 2,3584$; $c = -0,0177$; $d = -0,0041$; $e = 0,0078$ et $f = 0,5128$.

Cette équation 2 ne montre pas de biais avec les variables de mesure (diamètre, âge, hauteur). Il semble exister un léger effet dû à l'origine des arbres ($P < 5\%$) (tableau 6.3.3). L'équation 2 prédit bien la masse linéique déterminée par des mesures directes sur le tronc (figure 6.3.6).

Tableau 6.3.3 : Analyse de l'effet de variables sur l'estimation de la masse linéique du tronc du palmier à huile

Effet	P
Diamètre de la position de mesure	0,175
Diamètre au point 0	0,865
Diamètre à 1,5 m	0,925
Hauteur de la position de mesure	0,781
Age	0,066
Origine	0,043

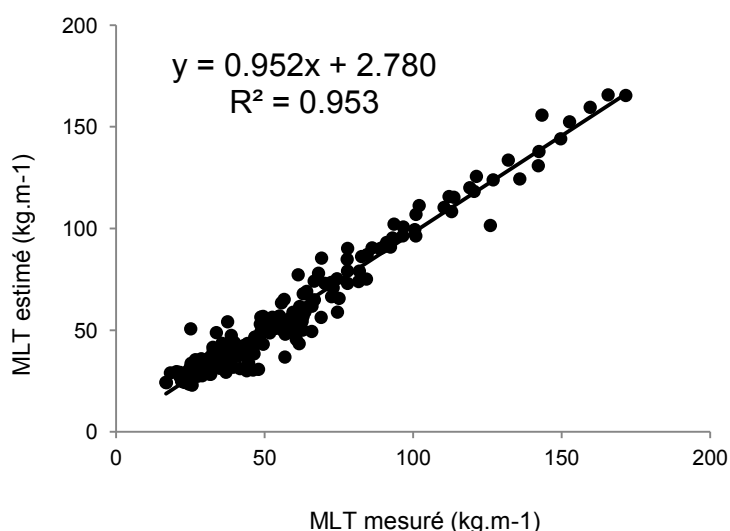


Figure 6.3.6. Régression linéaire entre masse linéique estimée du tronc et masse linéique mesurée.

6.3.3.3.2 Estimation la biomasse totale du tronc

En considérant deux hauteurs h_1 et h_2 , l'équation 2 peut être intégrée entre h_1 et h_2 . Le segment $[h_1 ; h_2]$ définit un tronçon du tronc de hauteur H . L'intégrale de MLT (h) entre h_1 et h_2 donne la masse de la tranche H . On a l'équation 3 :

$$\text{Eq 3 : } \int_{h_1}^{h_2} MLT(h)dh = M(h_2) - M(h_1) ; \text{ avec } M(h) = A \cdot (1/B \cdot \exp^{B \cdot h} + (C/2 \cdot h^2) + (D \cdot h))$$

h représente la hauteur (en mètre). A , B , C et D sont des constantes dépendantes des coefficients a , b_0 , b_1 , c , d , e et f de l'équation 2.

$$A = a \cdot MLT_0 ; B = -(b_0 - b_1 \cdot MLT_{1,5} / MLT_0) ; C = c ; D = d \cdot \text{diam}_0 + e \cdot \text{diam}_{1,5} + f$$

Si $h_1 = 0$ et $h_2 = H_{33}$ alors l'intégrale de l'équation 2 entre h_1 et h_2 donne la masse du tronc du palmier de hauteur H_{33} . D'où la biomasse totale du tronc est égale à :

$$M(H_{33}) - M(0).$$

La figure 6.3.7 montre une bonne corrélation ($R^2 = 0,94$) entre la biomasse estimée du tronc et la biomasse mesurée. Elle représente une validation interne des équations établies car les biomasses estimées ont été comparées aux biomasses déterminées par mesures directes sur les arbres et ayant servi à calculer les densités et à établir les relations de masse linéique.

Les équations établies peuvent être appliquées sur de jeunes palmiers de hauteur inférieure à 1,5 m par estimation des variables à la position de 1,5 m en fonction de celles de la position 0.

On a les relations :

$\text{Diam}_{1,5} = 0,552 \cdot \text{Diam}_0$ ($R^2 = 0,99$; Erreur standard résiduelle = 4,2 cm ; $n = 19$) où $\text{Diam}_{1,5}$ et Diam_0 représentent respectivement le diamètre à 1,5 m et au point 0.

$\text{Dcar}_{1,5} = 1,275 \cdot \text{Dcar}_0$ ($R^2 = 0,98$; Erreur standard résiduelle = 38,8 kg.m^{-3} ; $n = 19$) où $\text{Dcar}_{1,5}$ et Dcar_0 représentent respectivement la densité par carottage à 1,5 m et au point 0.

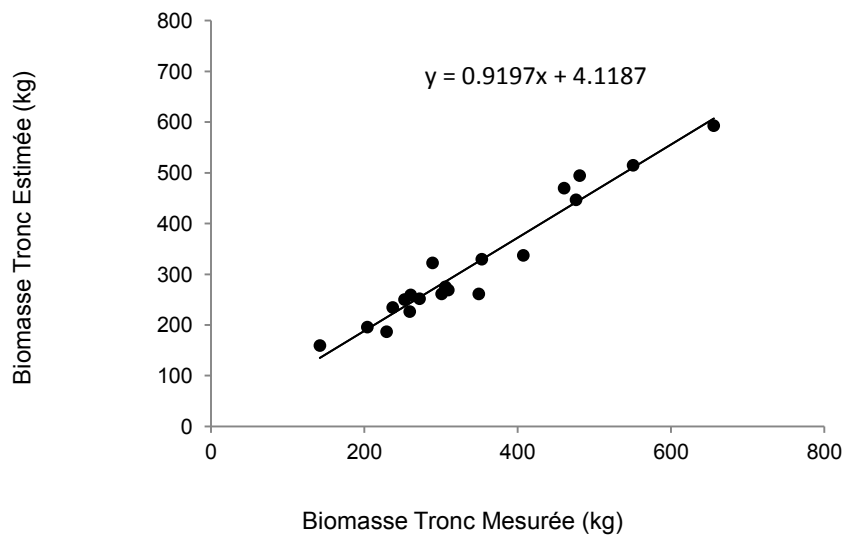


Figure 6.3.7 : Régression linéaire entre biomasse estimée du tronc et biomasse mesurée

6.3.4 Discussion

L'augmentation de la densité du tronc avec la hauteur des palmiers (figure 6.3.3A) pourrait s'expliquer par une densification des parois cellulaires pour s'accommoder à la croissance en hauteur de la plante et mieux assurer les fonctions d'accumulation de carbohydrates qui sont principalement sous forme d'amidon et de glucose (Legros et al., 2009). L'accumulation de sucres en fonction de la hauteur a été prouvée par Mialet-Serra et al. (2005) sur le cocotier. Les auteurs ont montré que le sucrose était fortement concentré dans le tronc suivi de l'amidon, et qu'il existe une relation entre le taux de sucre et la hauteur du tronc du cocotier. Le taux de sucre (sucrose) augmente du bas vers le haut et de la périphérie vers l'intérieur du tronc. Les parois cellulaires des tissus du palmier à huile semblent s'épaissir avec l'âge de la plante puisque les tissus des palmiers âgés sont plus denses que ceux des jeunes palmiers.

Dans notre étude, la densité du tronc varie très peu au-delà de la hauteur de 1,5 m et semble indiquer qu'à partir de cette hauteur, la valeur atteinte par la densité serait suffisante pour assurer les fonctions d'accumulation des réserves de carbohydrates jusqu'en haut du tronc. La position à 1,5 m de hauteur sur le tronc serait donc déterminante dans l'étude des variables d'estimation de la biomasse du tronc du palmier à huile. Il y a une ressemblance avec la dbh (1,3 m) utilisée comme variable d'entrée par les forestiers dans les équations allométriques d'estimation de la densité du bois (Henry et al., 2011).

La méthode par carottage prédit bien la densité du tronc avec une sous-estimation de 6% qui est corrigée par le coefficient multiplicateur de 1,062. Ce coefficient est dû au fait que la densité du tronc du palmier n'est pas homogène de l'extérieur vers l'intérieur du tronc, comme prouvé par Henson et al. (2003) qui ont conclu que la densité des tissus du tronc du palmier à huile diminue de la périphérie vers le centre du tronc.

La prédiction de la densité du tronc à partir de la densité des carottes est dépendante du diamètre de l'arbre ($P < 5\%$) utilisé pour le calcul du volume. Cela suppose un échantillonnage d'arbres représentatifs de la parcelle pour l'estimation de la densité moyenne du tronc représentative d'une palmeraie.

L'étude a montré que la section du tronc (figure 6.3.3B) décroît en fonction de la hauteur du palmier. Cette variable varie moins au sein d'un arbre que la densité et peut donc être prise en compte dans le calcul de variables d'estimation de la biomasse du tronc. Elle prend des valeurs élevées dans le premier mètre du tronc, qui baissent très rapidement jusqu'à 1,5m, liées à la décroissance du diamètre du tronc avec la hauteur (de Berchoux et al., 1986). La masse linéique du tronc qui représente la biomasse du tronc par unité de longueur a les mêmes

tendances que la section du tronc. Cette dernière a donc plus d'influence que la densité dans le modèle (Densité*section) de détermination de la masse linéique. La croissance en hauteur étant liée à l'âge du palmier (Ng et al., 2003b), ces résultats prouvent donc qu'entre 0 et 1,5 m, la section du tronc diminue plus rapidement que la densité n'augmente en fonction de l'âge des palmiers. Il semble donc qu'il existe une relation négative entre la densité et le diamètre du tronc du palmier.

L'utilisation de la masse linéique estimée à partir de la densité et de la section (au lieu du simple diamètre), pourrait augmenter la précision des prédictions. La densité et le diamètre du tronc sont deux variables utilisées par Corley et al. (1971) et par Henson et al. (2003) pour l'estimation de la biomasse du tronc du palmier.

L'estimation de la masse linéique à une position h sur le tronc se fait avec des mesures simples de variables sans abattage du palmier. Il s'agit de la hauteur h à laquelle se situe le point d'observation, des diamètres au collet et à 1,5 m puis des densités de carotte au collet et à 1,5 m. Les mesures de diamètre et de densité servent à calculer les masses linéiques au collet et à 1,5 m.

La mise au point d'équations allométriques s'appuie généralement sur des variables facilement mesurables sans détruire la plante. L'augmentation du nombre de variables ou leur transformation en d'autres variables améliore les erreurs résiduelles de la prédiction. La hauteur de l'arbre et le diamètre à hauteur de poitrine (dbh) sont des variables souvent utilisées en foresterie pour l'estimation de la biomasse du bois (Breugel et al., 2011 ; Djomo et al., 2010 ; Ebuy et al., 2011 ; Henry et al., 2010 ; Kangas and Maltamo, 2006 ; Sampaio et al., 2010). La prise en compte à la fois de la densité du bois et du dbh a amélioré les équations d'estimation de la biomasse du bois, dans une forêt du Cerrado au Brésil (Ribeiro et al., 2011). D'autres équations utilisées en foresterie pour l'estimation de la biomasse du tronc prennent en compte la circonférence au collet (point 0), en plus de la hauteur de l'arbre et du dbh (Henry et al., 2011).

L'équation 2 établit dans notre étude prédit bien la masse linéique mesurée (figure 6.3.6). Mais elle semble dépendre de l'origine génétique du palmier ($P = 0,04$). L'effet de la variable origine est dû au matériel Yocouboué qui est peu représenté (1 palmier) dans l'échantillon étudié.

La figure 6.3.7 montre que la biomasse du palmier peut s'estimer à partir de nos équations avec une erreur de 6%. On obtient pour les arbres de 16 ans (tableau 6.3.1) une estimation moyenne de 207 kg. Cette valeur est du même ordre de grandeur que la biomasse de 276 kg

déterminée par mesure destructrice pour le tronc d'un palmier moyen de 15 ans dans des palmeraies de 130 palmiers/ha en Côte d'Ivoire (Jaffré, 1983). Henson et al. (2003) ont estimé la biomasse du tronc du palmier par application d'une part de l'équation de Corley et al. (1971)⁹ et d'autre part par méthode de carottage à trois niveaux (1/4 ; 1/2 et 3/4 de la hauteur) sur le tronc de trois palmiers moyens de 17 ans dans une palmeraie de 160 palmiers/ha en Australie. Les auteurs ont trouvé une biomasse moyenne de 188 kg et de 197 kg respectivement pour la méthode de Corley et al. (1971) et celle de carottage.

Nos équations ayant été établies à partir des mesures à deux positions fixes (point 0 et 1,5 m) sur le tronc, elles offrent l'avantage d'un suivi temporel de la production de la biomasse du tronc des arbres de hauteur supérieure à 1,5 m. En effet, les variables mesurées (diamètre et densité) à ces deux positions varient très peu au-delà de 1,5 m. Des mesures périodiques de la hauteur du palmier, permettront d'estimer la production de biomasse du tronc sans remesurer le diamètre et la densité aux points 0 et à 1,5m.

6.3.5 Conclusion

Des équations allométriques ont été établies pour l'estimation de la biomasse du tronc du palmier à huile dans les conditions du Bénin. Dans cette étude, le modèle d'estimation de la biomasse du tronc est basé sur des variables d'entrée faciles à mesurer au collet et à 1,5 m sur le tronc sans détruire le palmier. Ces variables sont le diamètre, et la masse linéique du tronc et sont complétées par la hauteur du palmier. La masse linéique du tronc se calcule à partir de la densité et la section du tronc. Les résultats ont montré que la densité du tronc peut bien s'estimer à partir de la densité de carottes prélevées dans le tronc. Ces équations offrent la possibilité d'un suivi périodique de l'accumulation de biomasse dans le tronc du palmier. Elles sont applicables sur des palmiers de différents âges et de diverses origines génétiques. Mais ceci n'exclue pas leur amélioration et leur validation dans d'autres écologies et sur une population plus importante incluant de jeunes palmiers.

⁹ $S = 7.62 T + 83$; où S est la densité du tronc (g/l) and T est l'âge du palmier (an).

6.4 Pré-article : Biomasses et minéralo-masses des palmeraies villageoises : Effet des modes de gestion des feuilles d'élitage du palmier à huile.

6.4.1 Introduction

Le palmier à huile est l'oléagineux dont la productivité en huile par hectare est la plus élevée. Ce potentiel lui confère un avantage indéniable évoqué par Corley et Tinker (2003), et Härdter et Fairhurst (2003), pour satisfaire les besoins en corps gras d'une population mondiale en forte croissance (plus de 7 milliards en 2011). Selon Mielke (2011), en 2015, la demande mondiale d'huile de palme serait d'environ 62 à 63 millions de tonnes contre 45,5 millions de tonnes en 2010. De ce fait, on assiste à l'expansion de la culture du palmier à huile dans les tropiques, notamment en Afrique tropicale où l'huile de palme occupe une position prépondérante dans la production agricole, les échanges et la consommation de corps gras (Fournier et al., 2001). Selon Sayer et al. (2012), la culture du palmier à huile contribue beaucoup à l'économie de plusieurs pays en développement, et son expansion est désormais une priorité des gouvernements des régions tropicales humides y compris certains des pays les plus pauvres du monde. Dans ces pays, les palmeraies villageoises occupent une part non négligeable dans le système de production du palmier à huile. Elles sont d'ailleurs de plus en plus encouragées par le "Roundtable on Sustainable Palm Oil" car elles n'empiètent pas sur les high conservation value forest (HCVF) et leur production contribue pour une part importante à la production mondiale d'huile de palme (Vermeulen et Goad, 2006).

Au Bénin, les palmeraies villageoises sont majoritairement caractérisées par des pratiques d'association de cultures vivrières aux jeunes palmiers, une absence quasi-totale de fertilisation minérale et une gestion assez diversifiée des feuilles d'élitage, allant d'une restitution totale (RT) à une restitution nulle (RN) des feuilles durant tout le cycle du palmier (Aholoukpè et al. 2013a). Ces pratiques, en particulier les modes de gestion des feuilles d'élitage sont susceptibles de modifier l'état nutritionnel et la production de biomasse des palmeraies. Selon Ochs (1985), l'étude de la nutrition des plantes tient compte des contraintes imposées par le milieu et par les pratiques culturelles.

Les études sur l'état nutritionnel du palmier en relation avec la fertilisation minérale ont été conduites dans plusieurs écologies et ont montré des réponses différentes du palmier en fonction du climat, des doses de fumures, des géotypes et de l'âge des plantes (Ng et al., 1967 ; Knecht et al., 1977 ; Ollagnier et Ochs, 1981 ; Ng et al., 2003 ; Dubos et al., 2011). Les auteurs s'accordent sur le fait que la gestion de la nutrition du palmier à huile passe par une surveillance de son état nutritionnel généralement à travers des analyses de tissus foliaires

(Ochs et Olivin, 1977 ; Ochs, 1985 ; Caliman et al., 1994). Le diagnostic foliaire permet de comparer les teneurs foliaires à des seuils de référence et de faire la programmation des fumures (Caliman et al. 1994 ; Corley et Tinker, 2003). Cependant l'étude de l'état nutritionnel du palmier peut aller au-delà de la détermination des doses adéquates de fumures, et s'intéresser à la distribution et au stock des éléments dans les organes du palmier. En Malaisie dans des palmeraies de 23 ans conduites selon les standards des grandes plantations, Khalid et al. (1999) ont déterminé les concentrations en éléments minéraux et ont quantifié les biomasses, fournissant ainsi une estimation des minéralo-masses en jeu dans les organes aériens des palmiers, au moment de la replantation. Selon Jaffré (1983), en Côte d'Ivoire, la biomasse du tronc du palmier à huile représente dans une palmeraie adulte de 17 ans, 75% de la biomasse aérienne sur pied. Les éléments sont distribués inégalement dans les organes, le potassium puis l'azote étant plus abondant dans le tronc. Dans les feuilles, les teneurs en azote les plus élevées se trouvent dans les folioles (plus de 2%N) et celles en potassium dans les rachis et pétioles (1,5%) (Khalid et al., 1999 ; Dubos et al., 2011). L'estimation des biomasses et minéralo-masses des palmeraies renseignent sur les stocks de matière et d'éléments immobilisés sur pied dans les palmeraies et ceux exportés par les régimes lors des récoltes. Ces études, réalisées le plus souvent sur des palmiers en plantations industrielles ou en station de recherche (Ng et al. 1968 ; Jaffré, 1983 ; Nouy et al. 1996 ; Khalid et al., 1999 ; Caliman et al. 1994), sont presque inexistantes sur les plantations villageoises. Au Cameroun, Rafflegeau et al. (2010) ont analysé les effets des pratiques culturales des palmeraies villageoises sur les teneurs foliaires en N et K en comparaison avec les pratiques des plantations industrielles. Ces références seront utilisées pour discuter les résultats de l'étude de la variabilité des biomasses et minéralo-masses que nous avons conduite dans des palmeraies villageoises de différents âges au Bénin.

6.4.2 Matériels et Méthodes

6.4.2.1 Matériel d'étude

L'étude a été conduite pour l'estimation de la biomasse et de la minéralo-masse du palmier à huile en plantation villageoise dans une région du sud-est du Bénin (2°30 - 2°45 E et 6°35 - 7°45 N). Les palmeraies retenues sont caractérisées par deux modes de gestion des feuilles d'élagage du palmier et appartiennent aux classes d'âge pré-adulte (7-11 ans) et adulte (16-19 ans) (Aholoukpè et al., 2013a). Les deux modes de gestion des feuilles sont la restitution totale des feuilles en andain (RT) et la restitution nulle des feuilles (RN). La restitution totale des feuilles a duré en moyenne 4 ans et 10 ans respectivement dans les palmeraies pré-adultes et adultes. Le dispositif utilisé comporte 12 parcelles correspondant à deux classes d'âge, deux modes de gestion des feuilles et 3 répétitions de parcelles. Parmi les 12 parcelles, une parcelle se trouve sur la station de recherche de Pobè (CRAPP). La gestion des feuilles d'élagage dans cette parcelle est similaire au mode RT des palmeraies villageoises. Les neuf palmiers retenus au début des travaux ont été maintenus pour cette étude. Ils ont fait l'objet d'analyses génétiques de détermination de leurs origines pour l'étude d'éventuelle différence de biomasse due à l'origine génétique.

6.4.2.2 Collecte de données

6.4.2.2.1 Détermination des origines génétiques des palmiers étudiés

Des échantillons de folioles ont été prélevés sur chaque palmier. Ces échantillons ont été séchés par lyophilisation puis broyés pour la détermination de l'origine génétique par une méthode de biologie moléculaire (Durand-Gasselin et al., 2011). Cette méthode consiste à réaliser un génotypage à l'aide de 12 marqueurs microsatellites utilisés pour la vérification de la légitimité du matériel produit et diffusé en milieu paysan par la station de recherche de Pobè (CRAPP) et les autres partenaires du Cirad. Les échantillons provenant des palmeraies villageoises ont été situés par rapport à un vaste ensemble de génotypes provenant de croisements contrôlés de 3 générations représentatifs de tout le matériel commercialisé. La structuration de cette vaste base de génotypes et la situation des échantillons soumis à identification ont été réalisées par différentes méthodes donnant des résultats convergents : Analyse Factorielle sur Tableau de Distances, Classification par Neighbor Joining et Inférence Bayésienne par le Logiciel Structure.

6.4.2.2.2 Détermination des biomasses

Estimation de la biomasse des feuilles

Cette étape a permis d'estimer la production annuelle de biomasse de feuilles de chaque site. Elle a consisté à déterminer l'émission foliaire des palmiers et la biomasse moyenne d'une feuille adulte. L'observation de l'émission des feuilles émises a été faite pendant 18 mois et ramenée à une période de 12 mois ; la biomasse moyenne de la feuille adulte a été estimée par l'application d'équations allométriques (Aholoukpè et al., 2013b) sur trois feuilles choisies de rang supérieur à 13.

Estimation de la production de régimes de fruits

Un inventaire de couronne a été réalisé par comptage du nombre d'inflorescences femelles émises par un arbre pendant 18 mois et ramené à une période de 12 mois. Le nombre d'inflorescence femelles représente le nombre de régime qu'un arbre produit par an (NRA). L'estimation de la production annuelle de régimes a été calculée sur la base du NRA et du poids frais moyen d'un régime de fruit (PMR), déterminé par pesée d'une vingtaine de régimes représentatifs de la production des palmiers.

Estimation de la biomasse du tronc

La biomasse du tronc des palmiers a été estimée par application des équations allométriques présentées dans le chapitre 6.3. Les variables suivantes ont été mesurées : la hauteur du palmier mesurée du collet jusqu'en bas de la feuille 33 (Corley et al., 1971 ; Henson et al., 1999) ; le diamètre et la densité du tronc au collet (point 0) et à la hauteur de 1,5 m au dessus du collet. La densité du tronc a été déterminée par le prélèvement de carottes dans le tronc à l'aide d'une tarière de Pressler de volume intérieur connu. La densité par carottage (Dcar) estime bien la densité de référence (Dref), déterminée par une méthode destructrice en un point donné du tronc, par la formule :

$$Dref = 1,062 * Dcar ; (R^2 = 0,99).$$

A ces variables, s'ajoute une variable calculée qui est la masse linéique du tronc. Elle représente la masse par unité de longueur (en $kg.m^{-1}$), et a été calculée à partir de la densité et de la section du tronc à la hauteur où on souhaite estimer la masse linéique.

Les variables, hauteur du palmier, diamètre et masse linéique au collet et à la hauteur de 1,5 m ont été utilisées dans les équations allométriques.

6.4.2.2.3 Détermination des teneurs et des quantités d'éléments minéraux.

Teneurs en éléments minéraux dans les organes

Les teneurs en éléments minéraux ont été déterminées pour les trois composantes de la feuille (pétiole, rachis et foliole), pour les rafles des régimes et pour le tronc.

Des échantillons composites ont été tirés de chaque palmier, puis les échantillons des neuf palmiers ont été regroupés pour constituer l'échantillon composite final représentatif de la parcelle.

Pour chaque palmier, 3 feuilles adultes (rang > 13) ont été choisies pour réaliser les composites des pétioles, des rachis et des folioles.

Pour les rafles, 3 régimes mûrs ont été tirés au hasard lors de la récolte ; ils ont été effruités, et l'échantillon composite des rafles a été réalisé en mélangeant des sous échantillons d'épillettes et de pédoncules.

Des carottes du tissu du tronc ont été prélevées à deux ou trois hauteurs selon la taille des palmiers. Elles ont été regroupées pour constituer l'échantillon composite du tissu du tronc du palmier.

Tous les échantillons ont été séchés en étuve à 70°C puis broyés au laboratoire. Les méthodes de détermination pour l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) sont décrites dans le manuel d'analyse (PopV04i 17-05-10-ISO_9001_2000\Supports\Documentation\Document\fo010f.dot) du laboratoire d'analyse des végétaux du Centre International pour la Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad). Pour l'azote, l'échantillon subit une combustion sèche avec l'analyseur élémentaire « FP528-LECO » ; la teneur en azote total est déterminée par une cellule thermoélectrique (catharométrie) après un étalonnage avec des substances de compositions en N connues (EDTA, benzène ester toluène-4 sulfonate de glycine). Pour P, K, Ca et Mg, le principe se base sur une double calcination à 500°C qui permet d'éliminer la matière organique tout en conservant dans la cendre les éléments minéraux sous forme d'oxyde ou de carbonates. La silice est éliminée par le fluorure d'hydrogène (HF). Les échantillons calcinés sont ensuite dissouts dans de l'acide chlorhydrique dilué à 1/2. Le dosage des éléments se fait par spectrométrie d'émission plasma (ICP).

Minéralo-masses des organes

La masse d'un élément minéral dans un organe a été estimée en multipliant la teneur de l'élément par la biomasse de l'organe. Les biomasses du pétiole, du rachis et des folioles ont été estimées à partir de la proportion de chacun de ces organes dans la feuille : 32% pour les

folioles, 32% pour les rachis et 36% pour le pétiole. La biomasse des rafles a été calculée en considérant dans un premier temps leur part de 37% sur le régime frais puis dans un deuxième temps, leur taux de matière sèche qui est 38% (Quencez et al. non publié).

6.4.2.2.4 Traitement et analyse des données

Les variables analysées sont les émissions annuelles de feuilles et de fleurs, les biomasses des feuilles, des rafles et du tronc, et les teneurs et masses des éléments minéraux dans ces différents organes. Les résultats sont exprimés sous forme de valeurs moyennes pour un palmier de chaque site à l'exception des biomasses et minéralo-masses moyennes qui ont été ramenées à l'hectare en considérant une densité de plantation de 143 palmiers à l'hectare.

L'effet des facteurs "classe d'âge", "mode de gestion des feuilles" et leur interaction ont été testés par des analyses de variances de type split-plot tenant compte de l'effet aléatoire des palmiers et des parcelles. L'interaction des deux facteurs a été étudiée en détail en testant séparément l'effet de chaque facteur pour chaque niveau de l'autre facteur (tests connus sous le nom de « tests of simple effects » (SAS, 2011).

Les variables de production (NRA, PMR et production de régime) ont été comparées à celles des plantations conduites en stations de recherche sur le palmier à huile de Pobè au Bénin et de La Mé en Côte d'Ivoire.

Des modèles de référence ont été utilisés pour comparer les teneurs en N et P des folioles. Pour N il s'agit du modèle cité par Caliman et al. (1994).

$N_{mod} = 3,192 - (0.059 * A) + 0.001 * (A^2)$ où N_{mod} est le niveau d'azote et A l'âge du palmier.

Pour P il s'agit de la relation d'équilibre avec N (Caliman et al., 1994).

$P_{mod} = N * 0.0487 + 0.039$ où P_{mod} est le niveau de P en équilibre avec celle de N.

Les teneurs en azote, phosphore et potassium observées dans les folioles ont été également comparées à des références obtenues dans les plantations de la station du CRAPP de Pobè au Bénin. Pour cela on a utilisé les teneurs observées de 5 et 18 ans sur des essais installés de 1982 à 2007. Ces essais ont reçu une fertilisation azotée et potassique.

6.4.3- Résultats

6.4.3.1 Origine génétique et production de biomasse des palmiers

6.4.3.1.1 Origine des palmiers étudiés

Les résultats sur la composition allélique montrent que les palmiers étudiés proviennent majoritairement de deux types de croisements hybrides correspondant au matériel diffusé par le CRA-PP (figure 6.4.1) :

- 1) Matériel Deli x La Mé : Individus composés pour moitié d'allèles caractéristiques du groupe Deli et pour moitié d'allèles «La Mé»
- 2) Matériel Deli x Yangambi : Individus composés pour moitié d'allèles «Deli» et pour moitié d'allèles «Yangambi».

Par ailleurs, il existe quelques individus très proches de Deli pur et d'autres dont le croisement n'a pas pu être déterminé probablement parce que leur origine est différente du matériel normalement commercialisé.

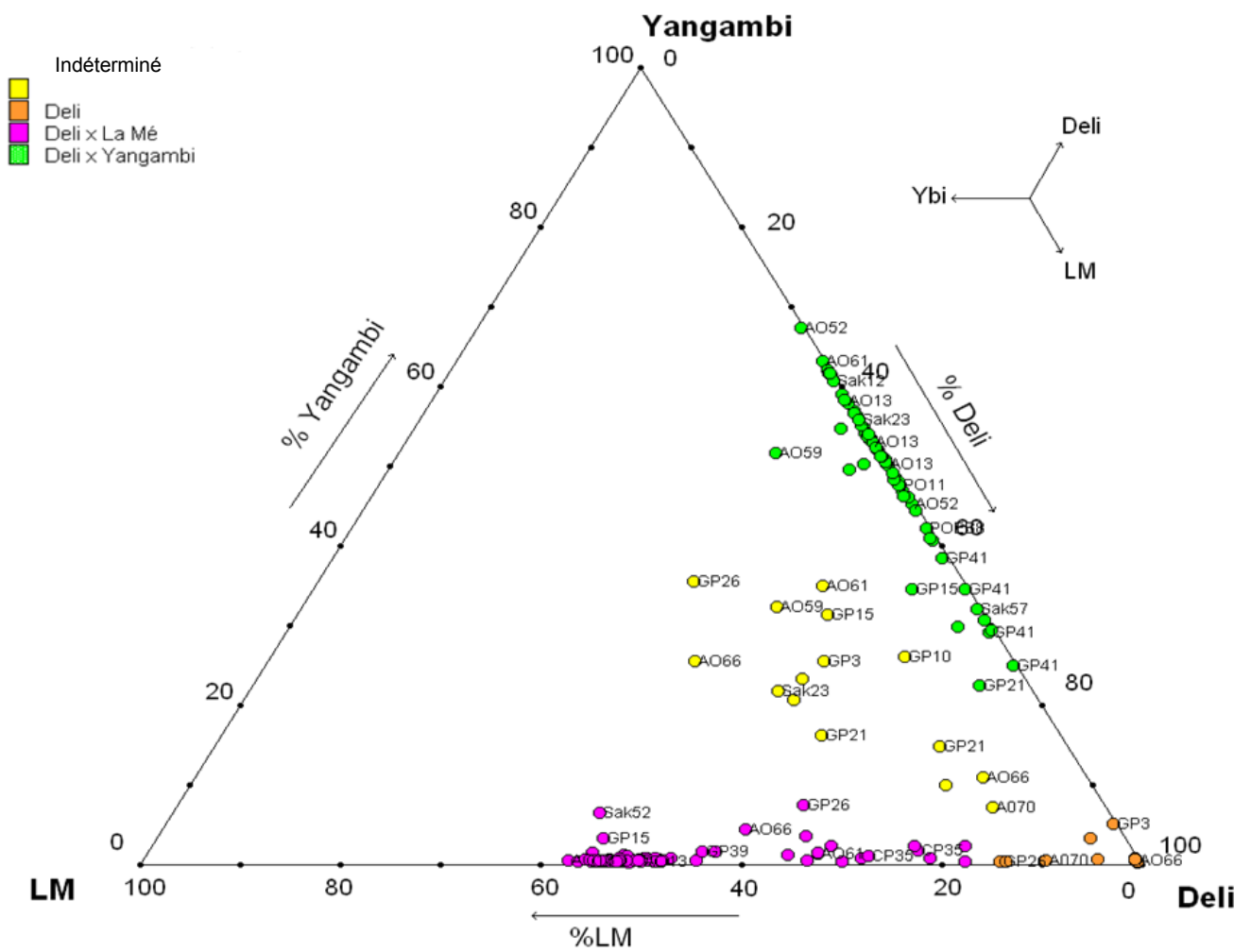


Figure 6.4.1. Triangle de répartition des Compositions alléliques calculées par Structure des individus de chaque groupe.

6.4.3.1.2 Biomasse foliaire et production de régimes

Le tableau 6.4.1 présente les résultats obtenus pour l'émission annuelle de feuilles et de fleurs femelles, la biomasse moyenne des feuilles et le poids moyen des régimes (PMR). Les palmiers émettent en moyenne 22 feuilles par an en mode RN et 21 feuilles par an en mode RT. On ne constate pas d'effet significatif de l'âge et du type de restitution. La biomasse moyenne d'une feuille adulte augmente de l'âge pré-adulte (2,5 kg) à l'âge adulte (3,3 kg). Mais on ne constate pas un effet significatif de l'âge ni du type de restitution sur la production totale de biomasse de feuilles à l'hectare (figure 6.4.3.A).

Les palmeraies pré-adultes produisent en moyenne 6,4 régimes par arbre (NRA) et par an. Le poids moyen des régimes (PMR) étant de 11,1 kg. Les palmeraies adultes produisent 2,7 régimes de 16,2 kg en moyenne par arbre et par an. L'augmentation du PMR ne compense pas la diminution du NRA et on observe une diminution significative de la production entre les deux classes d'âge (67,7 kg/arbre/an à 7-12 ans contre 44,5 kg/arbre/an à 13-19ans) (figure 6.4.3.B). Les différences de production entre les parcelles RN et les parcelles RT ne sont pas significatives, que cela soit sur les composantes de la production (NRA et PMR) que sur la production totale (PRA). La figure 6.4.2 montre qu'à l'âge adulte, le NRA de toutes les palmeraies villageoises est inférieur au NRA moyen des palmeraies de la station.

6.4.3.1.3 Biomasse du tronc

La biomasse sur pied du tronc des palmeraies varie en fonction des âges et du mode de gestion des feuilles. Il existe une différence hautement significative ($P < 0,001$) entre les biomasses du tronc des deux classes d'âges. Entre les modes RT et RN la différence est hautement significative dans la classe d'âge adulte et significative ($P < 0,05$) dans la classe pré-adulte (figure 6.4.4).

Le tableau 6.4.2 montre qu'il n'y a pas d'effet des origines génétiques des palmiers sur la biomasse de la feuille et les variables de production.

Tableau 6.4.1. Emission annuelle de feuilles et fleurs femelles par palmier et masse sèche moyenne d'une feuille adulte et d'un régime du palmier.

Age (ans)	Nombre feuilles émises par an		Nombre fleurs émises par an (NRA)		Masse sèche feuille adulte (kg)		Poids moyen d'un régime (kg)	
	RN	RT	RN	RT	RN	RT	RN	RT
7 - 11	23,8 ±2,7 ^a	20,0 ±2,7 ^a	7,9 ±1,1 ^a	4,9 ±1,1 ^{ab}	2,4 ±0,2 ^b	2,5 ±0,2 ^b	9,5±1,5 ^b	12,7±1,8 ^c
16 - 19	19,4±2,7 ^a	19,7 ±2,7 ^a	2,8 ±1,1 ^c	2,7 ±1,1 ^{bc}	3,0 ±0,2 ^a	3,3 ±0,2 ^a	16,2±1,5 ^a	16,1±1,5 ^a

Les moyennes sont reportées±l'erreur standard. Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différente (P < 0,05 ; test de Tukey)

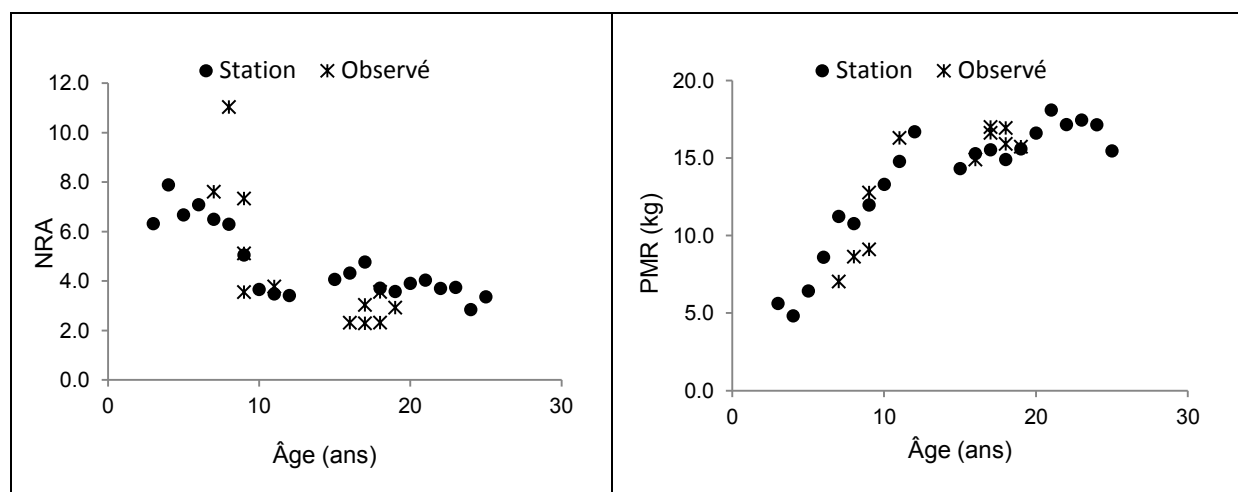


Figure 6.4.2. Evolution des composantes de production de régime en fonction de l'âge des palmeraies villageoises étudiées (points "Observé") et de palmeraies de la station de Pobè (points "Station").

NRA = Nombre de régimes par palmier et par an. PMR = poids frais moyen d'un régime de fruit.

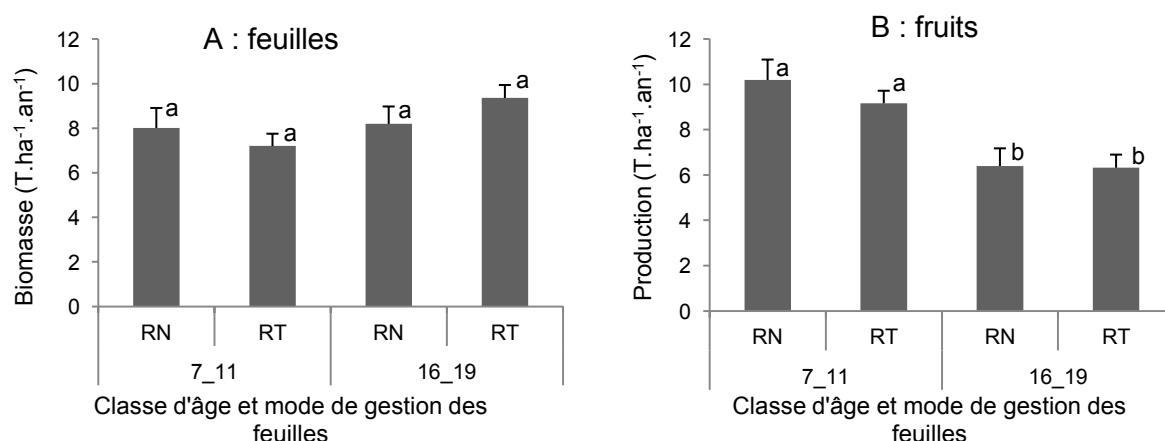


Figure 6.4.3. Biomasse totale produite annuellement (T.ha⁻¹) de feuilles et de régimes (poids frais) dans les palmeraies en fonction de la classe d'âge et du mode de gestion des feuilles.

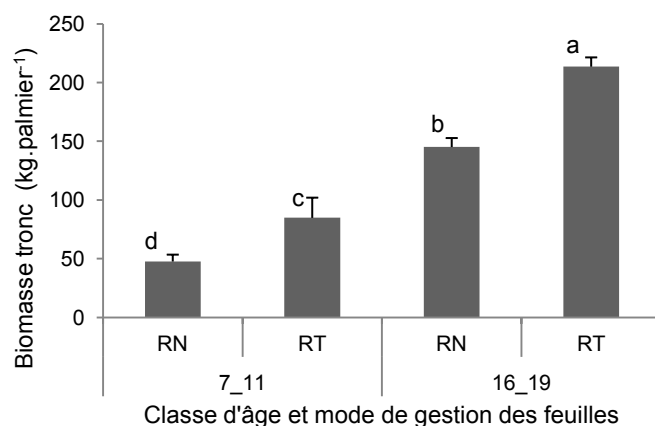


Figure 6.4.4. Biomasse moyenne du tronc d'un palmier (kg.palmier⁻¹) sur oied dans palmeraies étudiées.

Tableau 6.4.2. Résultats d'analyse de variance de l'effet des origines génétiques des palmiers sur les biomasses étudiées : Test des effets par tranche

Variable :		PS feuilad	Nfeuil par an	Biototfeuil par an	Nfleur par an
F Origine		1,10	1,96	1,53	0,54
Prob>F		0,3524	0,1250	0,2120	0,6562
ORIGINES	Deli x La Mé	2,72 a	22,0 a	58,6 a	4,71 a
	Deli x Yangambi	2,92 a	21,6 a	61,8 a	4,61 a
	Deli pur	2,73 a	20,2 a	54,1 a	3,89 a
	Indéterminé	2,78 a	20,7 a	57,1 a	4,82 a

PS feuiad = poids sec de la feuille adulte ; Nfeuil = nombre de feuilles émises par l'arbre ; Biototfeuil = biomasse totale de feuilles émises par un arbre ; Nfleur = nombre de fleurs femelles émises par l'arbre

6.4.3.2 *Etat nutritionnel des palmeraies*

Les teneurs en éléments minéraux des différents organes du palmier sont présentés pour les deux classes d'âge dans le tableau 6.4.3. On observe que les concentrations en éléments varient fortement d'un organe à l'autre ; l'azote est surtout présent dans les feuilles et les rafles, P et K dans les rafles et Ca et Mg dans les feuilles.

L'effet du mode de gestion des feuilles ne s'observe que sur la teneur en azote des rafles et la teneur en Mg dans le pétiole et le rachis des feuilles.

La figure 6.4.5A montre que les teneurs moyennes en azote des folioles de chaque site, décroissent avec l'âge des palmiers, conformément au modèle de référence. Cependant, les teneurs dans les sites observés sont en moyenne 30% inférieures aux valeurs du modèle alors que pour les essais de la station de recherche de Pobè la courbe moyenne des teneurs en N en fonction de l'âge ne s'écarte pas de plus de 10% par rapport au même modèle. La teneur en N la plus élevée des palmeraies observées provient de la seule parcelle retenue en station.

Sur la figure 6.4.5B ont été reportées les teneurs moyennes en K des folioles de chaque site observé en fonction de l'âge des palmiers. Des valeurs moyennes obtenues dans les essais de la station de recherche ont été reportées pour comparaison. On observe en particulier sur la station que les teneurs ont une tendance à décroître dans les premières années de la culture. Comprises entre 0,3 et 0,5%, les teneurs observées dans notre étude sont, au même âge, nettement inférieures à celles de la station, à l'exception de la teneur en K de la parcelle observée sur la station.

Sur la figure 6.4.5C on observe que les teneurs en P des folioles comparées avec le modèle prenant en compte la nutrition en N, sont comprises entre 0,10 et 0,14%. Elles paraissent faibles en valeur absolue, mais ne s'écartent pas notablement du modèle en fonction de la teneur en azote dans la foliole.

Le tableau 6.4.4 récapitule, élément par élément, les masses correspondantes à l'émission de feuilles sur une année ainsi que la part des rafles dans la production annuelle de régimes. Il n'y a pas de différence entre les modes de gestion des feuilles sur toutes les variables observées. Dans les feuilles, les minéralo-masses sont en général plus élevées à l'âge adulte. A l'inverse les masses d'éléments exportées dans les rafles par la production de régimes sont moindres à l'âge adulte.

Tableau 6.4.3. Concentration en éléments minéraux dans différents organes des palmiers pré-adultes et adultes

Organe	Mode gestion feuilles	7 - 11 ans					16 - 19 ans				
		N%	P%	K%	Ca%	Mg%	N%	P%	K%	Ca%	Mg%
Foliole	RN	2,00 ^a	0,13 ^a	0,46 ^a	0,83 ^a	0,43 ^a	1,66 ^a	0,13 ^a	0,38 ^a	0,93 ^a	0,51 ^a
	RT	1,89 ^a	0,13 ^a	0,46 ^a	0,86 ^a	0,48 ^a	1,67 ^a	0,11 ^a	0,39 ^a	0,82 ^a	0,43 ^a
Pétiole	RN	0,27 ^a	0,03 ^a	0,25 ^a	0,48 ^a	0,48 ^a	0,22 ^a	0,04 ^a	0,37 ^a	0,53 ^a	0,54 ^a
	RT	0,24 ^a	0,03 ^a	0,27 ^a	0,52 ^a	0,54 ^a	0,26 ^a	0,03 ^a	0,40 ^a	0,51 ^a	0,41 ^b
Rachis	RN	0,24 ^a	0,03 ^a	0,27 ^a	0,45 ^a	0,38 ^a	0,21 ^a	0,05 ^a	0,38 ^a	0,50 ^a	0,50 ^a
	RT	0,23 ^a	0,04 ^a	0,34 ^a	0,52 ^a	0,46 ^a	0,23 ^a	0,04 ^a	0,43 ^a	0,45 ^a	0,36 ^b
<u>Feuille entière</u>	RN	0,81	0,06	0,32	0,58	0,43	0,68	0,07	0,38	0,65	0,52
	RT	0,77	0,07	0,35	0,63	0,50	0,70	0,06	0,40	0,59	0,40
Rafle	RN	0,81 ^a	0,10 ^a	2,73 ^a	0,24 ^a	0,30 ^a	0,71 ^a	0,10 ^a	2,90 ^a	0,19 ^a	0,26 ^a
	RT	0,82 ^a	0,11 ^a	2,65 ^a	0,27 ^a	0,37 ^a	0,94 ^b	0,11 ^a	2,52 ^b	0,24 ^a	0,28 ^a
Tronc	RN	0,52 ^a	0,06 ^a	0,95 ^a	0,30 ^a	0,22 ^a	0,24 ^a	0,04 ^a	0,43 ^a	0,16 ^a	0,22 ^a
	RT	0,41 ^a	0,05 ^a	0,65 ^a	0,28 ^a	0,24 ^a	0,36 ^a	0,04 ^a	0,50 ^a	0,18 ^a	0,20 ^a

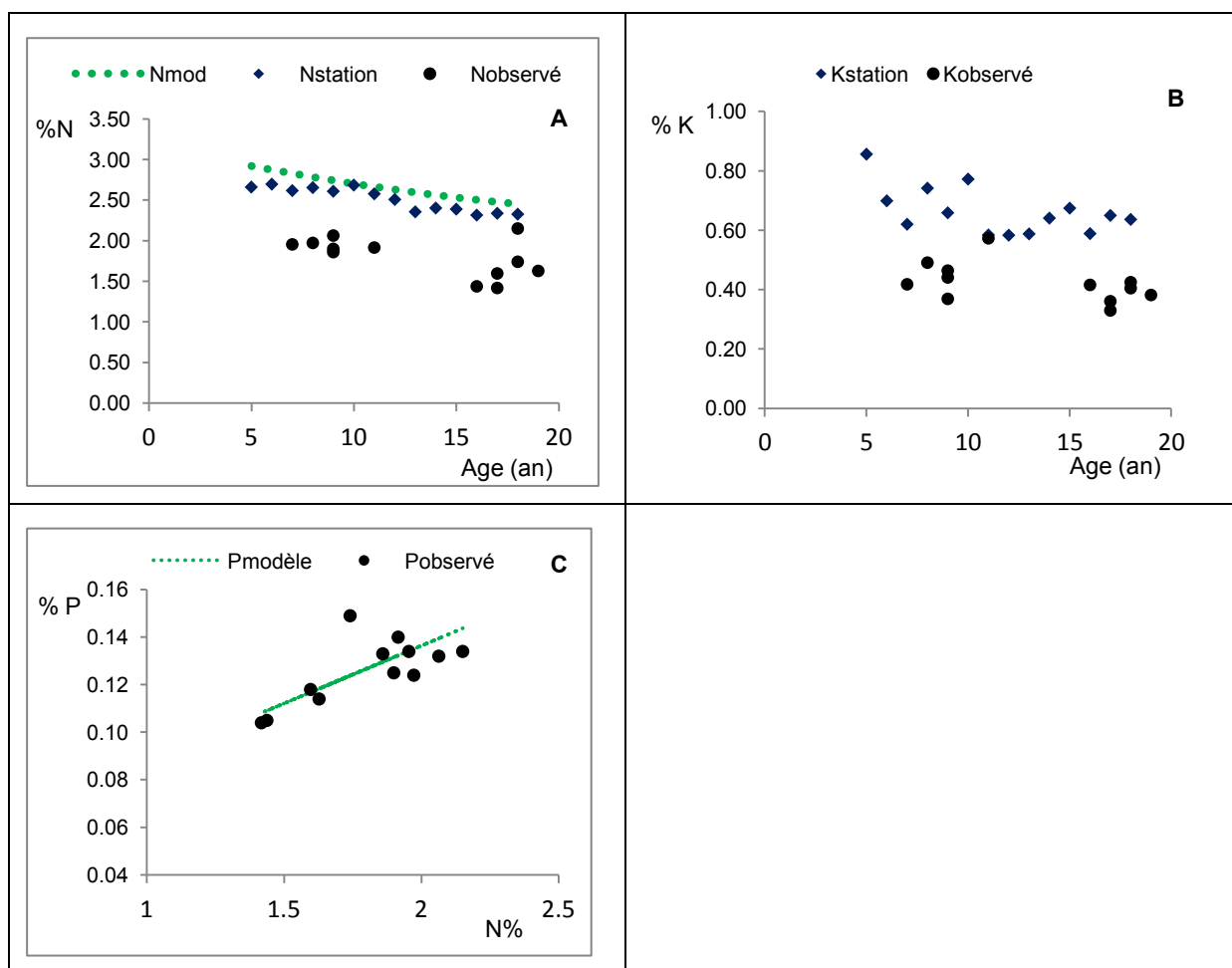


Figure 6.4.5. Comparaison des teneurs en N, P et K observées dans les palmeraies étudiées à des valeurs de la station de Pobè et de modèles

Tableau 6.4.4. Production annuelle de minéralo-masses ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) des palmeraies

Organe	Mode gestion feuilles	7-11 ans	16-19 ans	7-11 ans	16-19 ans	7-11 ans	16-19 ans	7-11 ans	16-19 ans	7-11 ans	16-19 ans
		N		P		K		Ca		Mg	
<u>Totfeuil</u>	RN	65,2 ^a	55,3 ^a	5,0 ^a	5,7 ^a	26,3 ^a	31,0 ^a	46,4 ^a	52,9 ^a	34,5 ^a	41,9 ^a
	RT	55,4 ^a	67,0 ^a	4,7 ^a	5,7 ^a	26,1 ^a	38,7 ^a	45,4 ^a	55,6 ^a	34,9 ^a	36,6 ^a
Rafle	RN	11,6 ^a	6,5 ^b	1,5 ^a	0,9 ^a	41,3 ^a	25,9 ^a	3,6 ^a	1,7 ^a	4,6 ^a	2,3 ^a
	RT	10,6 ^a	8,4 ^{ab}	1,5 ^a	0,9 ^a	34,2 ^a	21,7 ^a	3,5 ^a	2,1 ^{ab}	4,8 ^a	2,3 ^a

Les moyennes de chaque élément minéral sont comparées par organe et par mode de gestion des feuilles entre les deux classes d'âge. Les valeurs suivies de la même lettre indiquent l'inexistence de différence significative entre les moyennes (test Tukey).

6.4.4 Discussion

Les analyses des folioles indiquent que les teneurs observées sur ce tissu qui sert de référence pour diagnostiquer l'état nutritionnel des palmeraies (Martin, 1977 ; Ochs et Olivin, 1977 ; Ochs, 1985) sont en dessous des normes communément admises pour deux éléments. Il s'agit de l'azote dont les teneurs s'écartent de 30% par rapport au modèle de référence (Caliman et al., 1994). Ce résultat n'est pas un artifice dû au climat particulièrement sec puisque l'écart par rapport aux valeurs trouvées sur la station au même âge est presque du même ordre (fig.6.4.5A). Les teneurs en N des folioles à l'âge adulte sont inférieures à 2% ; ce qui est nettement plus faible que celles trouvées par Raffleau (2008) dans des plantations villageoises non fertilisées au Cameroun. Les teneurs en N du tronc aux deux âges (respectivement 0,46 et 0,30% en moyenne) et les teneurs en N des rachis (respectivement 0,23 et 0,22% en moyenne), paraissent faibles par rapport aux valeurs trouvées par Khalid et al. (1999) : respectivement de 0,54 à 0,59 et 0,39 à 0,50%.

Il s'agit aussi du potassium dont les teneurs restent inférieures à 0,50% et sont notoirement plus faibles que celles que l'on observe sur la station du CRAPP dans des plantations fertilisées. Ollagnier et al. (1987) cités par Caliman (1994) ont étudié la relation entre la teneur optimale en K et le déficit hydrique annuel dans diverses écologies en Afrique. Pour le Bénin, un déficit de 500 à 600 mm équivaut à des teneurs optimales de 0,8 à 0,7%, teneurs qui sont largement supérieures à celles de notre étude. Parmi les 12 palmeraies étudiées, la seule parcelle observée en station présente des teneurs en N et K proches de celles des anciens essais de la station. Cette parcelle diffère des autres par l'application périodique de fumures azotée et potassique.

Les teneurs en K que nous avons déterminées pour le tronc sont comprises entre 0,4 et 1% et sont nettement inférieures à celles trouvées par Khalid et al. (1999) en Malaisie (1 - 2%) et par Dubos et al. (2011) dans un essai de fertilisation potassique en Colombie (1,9 - 2,5%). Les teneurs en K des rachis paraissent aussi nettement inférieures à celles de ces deux auteurs qui les situent respectivement entre 1,2 et 2,1% pour le premier et 1,3 - 1,4% pour le second. Teoh et Chew (1987) et Foster et al. (1996) ont suggéré que les teneurs en K des rachis étaient optimales à partir de 1,3% et 1%, respectivement.

Ces résultats confirment donc que les plantations villageoises souffrent d'une déficience en N et en K qui se manifestent par des teneurs et des réserves de l'ensemble des parties aériennes faibles. Cet état est indépendant du recyclage des feuilles. Il se met en place

précocement puisqu'il est déjà caractérisé à l'âge pré-adulte dans les plantations de notre étude. Il paraît spécifique aux palmeraies villageoises du Bénin puisque les déficiences en N et K sont plus fortes que celles observées dans les palmeraies villageoises au Cameroun.

Mais à l'opposé, les teneurs foliaires en P et en Mg indiquent que les palmeraies villageoises du Bénin sont bien pourvues pour ces deux éléments. La figure 6.5C montre une synergie d'absorption et d'assimilation du phosphore et de l'azote par le palmier. Selon Caliman et al. (1994), ce phénomène résulterait de la composition en N et P assez constante des protéines végétales.

Les analyses des rafles des régimes permettent d'évaluer l'influence des traitements sur l'exportation des éléments minéraux par la production, même s'il ne s'agit que d'une évaluation partielle. Il n'y a pas d'effet du recyclage des feuilles sur la composition des rafles et à priori sur celle des régimes. **Nos résultats montrent que conformément aux valeurs trouvées par d'autres auteurs, ces rafles sont particulièrement riches en potassium** : les teneurs en K des rafles (2,5 - 2,9%) sont du même ordre de grandeur que celles (2,1 - 2,4%) trouvées par Khalid et al. (1999) dans les régimes des palmiers de 23 ans en Malaisie. La composition des rafles des régimes et peut être des régimes entiers, ne semble donc pas être affectée par les faibles réserves en N et K que l'on observe dans les autres parties aériennes.

Les modes de gestion des feuilles d'élagage n'ont pas eu d'effet sur les concentrations en éléments minéraux des compartiments du palmier. Les variations sont plutôt dues aux âges. Les teneurs en azote et en potassium dans les feuilles et dans le tronc diminuent avec l'âge des palmiers alors qu'elles ont tendance à augmenter dans les rafles. Knecht et al. (1977) avaient montré en Malaisie une décroissance des teneurs en azote et en potassium des folioles avec l'âge des palmiers. Caliman et al. (2004) explique que la diminution des teneurs foliaires en azote avec l'âge peut être due à un phénomène de dilution et d'une modification du métabolisme de l'azote en fonction de l'âge physiologique des arbres.

L'augmentation de la minéralo-masse annuelle dans les feuilles et sa diminution dans les régimes, en fonction de l'âge des palmeraies se justifient par les différences de biomasses observées sur les figures 6.4.3A et 6.4.3B. Les valeurs de minéralo-masses (tableau 6.4.4) montrent la répartition des stocks d'éléments minéraux dans les organes du palmier à huile et justifient la nécessité du recyclage des biomasses végétatives pour une restitution au sol des éléments minéraux exportés (khalid et al., 2000b ; Régina, 2000).

Le recyclage des feuilles d'élagage n'a pas eu d'effet sur la production de régimes des palmeraies quelle que soit la classe d'âge. Les performances des palmeraies adultes

villageoises paraissent faibles lorsqu'on compare les rendements obtenus à ceux observés en station de recherche avec du matériel végétal équivalent. En station les palmeraies adultes donnent un rendement de plus de 60 kg de régimes par arbre par an (résultats non publiés) contre 44,5 kg de régimes obtenus dans notre cas. Cela est dû à la diminution importante du NRA qui n'a pas été compensée par l'augmentation du PMR dans notre cas. La figure 6.4.2 montre que les performances des palmeraies adultes villageoises sont de 32% inférieures aux performances moyennes obtenues sur la station de Pobè au Bénin, pour ce qui concerne le nombre de régimes par arbre. Des essais de station en Côte d'Ivoire ont montré que le NRA se stabilise à 6,5 régimes par arbre par an au-delà de 14 ans (résultats non publiés). Le poids moyen de régime trouvé dans notre étude est très inférieur à celui rapporté par Nouy et al. (1996) en Indonésie pour des palmeraies d'âge moyen de 9 ans (~ 15kg) et de 16 ans (~ 20kg). Ng et al. (2003), rapportent que le poids d'un régime varie entre 10 et 30 kg pour des palmiers de 8 à 10 ans. Les résultats d'essais de fertilisation optimale des palmeraies en station au Bénin (non publiés) ont donné des poids moyens de régimes de 11 à 14 kg pour des âges compris entre 9 et 11 ans. Les faibles NRA et PMR obtenus dans notre cas seraient dus aux conditions climatiques limitantes du Bénin (Nouy et al., 1999) mais aussi aux pratiques culturales en cours dans les palmeraies villageoises du Bénin : associations de cultures vivrières et absence de fertilisation minérale (Aholoukpè et al., 2013a).

Dans les palmeraies adultes, le mode RT semble augmenter la production de biomasse de feuilles par rapport au mode RN, sans que la différence ne soit significative au seuil de 5% (figure 6.4.3A). La production annuelle de biomasse de feuilles dans les palmeraies villageoises à l'âge adulte (en moyenne de $8,8 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) (figure 6.3A) est proche de la biomasse ($10 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) estimée dans les palmeraies en station de recherche en Côte d'Ivoire (Hartmann, 1991) et en station du CRAPP au Bénin (Aholoukpè et al., 2013b). Ce chiffre est aussi cité par Redshaw (2003) pour les palmeraies adultes en Indonésie. L'écart de $1,2 \text{ T} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ observé entre la biomasse des palmeraies villageoises et celle du CRAPP provient de la différence entre les poids moyens des feuilles adultes : 3,2 kg en plantation villageoise et 3,5 kg en station.

On observe une différence significative sur la biomasse des troncs en faveur du recyclage des feuilles. Cette différence existe déjà à l'âge préadulte, et elle se maintient à l'âge adulte.

La biomasse des troncs témoigne d'un processus « additif » sur une longue période jusqu'au moment de la mesure alors que les observations faites sur les couronnes de feuilles ne correspondent qu'à un état ponctuel, même s'il a été observé sur 18 mois.

La biomasse moyenne de tronc de 200 kg/palmier estimé dans les palmeraies villageoises adultes RT (en moyenne 17 ans) est inférieure à celle (276 kg) estimée par Jaffré (1983) dans des palmeraies de 15 ans en Côte d'Ivoire.

Le peu de différences imputables au recyclage des feuilles sur les différentes biomasses examinées, est un peu surprenant compte tenu des biomasses de feuilles qui sont en jeu chaque année aux deux âges étudiés (respectivement 7 et 8,8 t MS/ha/an en mode RT – fig. 6.3A) ainsi que les masses de N, et K qui correspondent (tableau 6.4.4). On peut faire l'hypothèse que d'autres facteurs limitent considérablement la production de biomasse des palmeraies villageoises et que ces effets masquent l'influence du recyclage des feuilles. Le fait que les palmeraies soient fortement déficientes en N et K est une des hypothèses à retenir. Un état de dénutrition similaire a été constaté par Raffleau et al. (2010) dans des palmeraies villageoises au Cameroun. L'auteur avait identifié que les parcelles les moins productives et dénutries en N et K correspondaient à la présence d'une culture à forte densité de tubercules dans le précédent cultural et/ou en co-plantation avec les palmiers (Raffleau, 2008). Cet état est aggravé par l'absence de légumineuses dans les associations et l'absence de fertilisation minérale. Dans l'étude de la typologie des palmeraies villageoises Aholoukpè et al. (2013a) ont établi que : les palmeraies villageoises du Bénin sont généralement précédées de champs de cultures vivrières sur de longues périodes. Elles sont associées au jeune âge à toutes sortes de cultures vivrières, dont fréquemment le manioc. De même, elles sont très peu ou pas fertilisées. La forte déficience en N et K dans les palmeraies villageoises du Bénin par rapport à celles du Cameroun proviendrait d'antécédents cultureux plus anciens au Bénin.

6.4.5 Conclusion

En conclusion à ce chapitre, on peut retenir que les palmeraies villageoises sont caractérisées par un état nutritionnel et des performances généralement faibles. Cela a été constaté à travers des teneurs faibles en éléments minéraux, un développement végétatif légèrement réduit (pour les feuilles) et par une production de régimes en-deça du potentiel des palmiers pouvant servir de référence sur la station de Pobè et encore plus dans d'autres écologies. Cette situation est probablement imputable à l'absence de fumures et à l'association de cultures vivrières aux palmiers. Le recyclage des feuilles d'élagage ne parvient pas à corriger les déséquilibres du sol et à restaurer sa fertilité (sans doute perdue depuis plusieurs cycles de culture), jusqu'à un niveau pouvant compenser les déficiences en éléments minéraux dans la plante. Il existe toutefois un effet significatif du recyclage des feuilles sur la biomasse du tronc dû à un cumul d'effet au cours du temps. Ces résultats sont à rapprocher de ceux du chapitre 5.2 qui montraient que l'effet du recyclage des feuilles a certes un effet très significatif sur les stocks de N sous andains mais n'est pas suffisant pour relever le stock calculé sur l'ensemble de la parcelle cultivée jusqu'à un niveau satisfaisant.

6.5 Conclusion du chapitre 6

Les équations allométriques établies dans ce chapitre montrent l'intérêt de la mise au point de nouvelles méthodes non destructrices d'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc du palmier à huile. Elles offrent plusieurs avantages : i) elles sont applicables dans des écologies similaires à celles du Bénin et pour des palmiers de diverses origines génétiques ; ii) elles sont applicables pour le suivi de la production annuelle de biomasse et minéralo-masse aérienne (analyse des performances de la plante) ; iii) elles sont applicables pour l'estimation des biomasses et minéralo-masses sur pied à un temps donné (analyse de l'état de la plante).

Ces équations allométriques ont été appliquées dans les palmeraies villageoises étudiées, en association aux méthodes d'estimation de la production de régime et de détermination des éléments minéraux dans les organes de la plante. Cela a permis d'évaluer l'état nutritionnel et les performances des palmeraies en mode de restitution totale et restitution nulle des feuilles d'élague. Les palmeraies villageoises ont généralement de faibles performances de production et sont déficientes en éléments minéraux. Les teneurs des principaux éléments minéraux N, et K sont très faibles dans toutes les parties végétatives aériennes et les productions de biomasse, sont en-deça du potentiel des palmeraies. Le recyclage des feuilles d'élague n'a pas corrigé ces faiblesses. Seule la biomasse du tronc a augmenté significativement avec le mode RT, et cette différence n'apparaît probablement que parce qu'elle traduit une accumulation progressive de biomasse jusqu'au moment de nos observations.

Malgré le recyclage des feuilles d'élague pendant une dizaine d'année, on n'observe pas d'amélioration significative des minéralo-masses des parties aériennes de la plante. Cette absence de résultat peut être expliquée par la dilution des éléments minéraux apportés par recyclage des feuilles dans une biomasse particulièrement pauvre en éléments minéraux en raison du passé cultural des palmeraies. Cette étude établie sur la biomasse aérienne suscite des interrogations sur le comportement du compartiment racinaire sous les modes de gestion des feuilles d'élague. C'est ce que nous allons explorer dans le prochain chapitre.

Chapitre 7 : Gestion des feuilles d'élagage et développement du système racinaire des palmiers

Dans ce chapitre, le développement du système racinaire des palmiers a été étudié à travers l'estimation de la densité de biomasse racinaire, de la longueur et de la surface racinaire. L'étude de la longueur spécifique racinaire a permis également d'évaluer le comportement des racines dans un milieu enrichi par le recyclage des feuilles. Le chronogramme de la thèse et la quantité de travail inhérente à la méthode de Vornoï utilisée, nous ont contraint à choisir pour cette étude, 4 palmeraies et 4 arbres par palmeraie.

7.1 Introduction du chapitre 7

Le système racinaire d'une plante, par les différentes fonctions qu'il assure est un compartiment indispensable à la vie du végétal et mérite une attention particulière (Jourdan et Rey, 1996). Son rôle dans l'alimentation hydrique et nutritionnelle de la plante est reconnu dans plusieurs études (Goh et Amit, 1993b ; Wang et al., 2006., Osmont et al., 2007 ; Gregroy et al., 2013 ; Kautz et al., 2013 ; Tracy et al., 2013). Ce rôle peut être influencé par les facteurs environnementaux et par les pratiques culturales adoptées dans les systèmes agricoles (Fageria et Moreira, 2011). En effet, le stress hydrique dans le sol dû aux changements climatiques, et la disponibilité des nutriments du sol peuvent être à l'origine des modifications de l'architecture racinaire, de l'anatomie et des métabolismes racinaires pour la satisfaction des besoins de la plante (de Dorlodot et al. 2007 ; Tamara et al., 2010 ; Lehmann, 2013). L'origine génétique de la plante joue également un rôle important dans ces modifications racinaires (Reis de Carvalho, 1991 cité par Nodichao (2008) ; Fageria et Moreira, 2011 ; Nodichao et al., 2011).

Le palmier à huile la plante oléagineuse la plus productive au monde en corps gras végétal (Oil World, 2010). En conditions optimales, elle exige une pluviométrie annuelle d'au moins 1800 mm de pluie également répartie dans l'année (Corley et Tinker 2003). Elle est sensible au déficit hydrique et les déficits très élevés (> 600 mm par an) peuvent être fatals à la plante ainsi que le rapportent Nouy et al. (1999). De ce fait, quelques études ont porté sur le développement du système racinaire du palmier à huile face à des conditions de stress hydrique (Adjahossou, 1983 ; Cornaire et al., 1994 ; Nodichao, 2008 ; Nodichao et al., 2011). Les premiers travaux complets décrivant l'architecture racinaire du palmier à huile (Jourdan et al 1997a), son développement sensible au gravitropisme (Jourdan et al., 2000) et sa

dynamique de croissance ont permis, par modélisation puis simulation, de localiser de façon dynamique la distribution de la biomasse racinaire au champ d'une plantation à différents âges (Jourdan et Rey, 1996 ; 1997b, c). Ces résultats issus d'observations menées en Côte d'Ivoire ont pu être confrontés aux observations au Bénin sur des génotypes identiques mais aussi sur des génotypes très contrastés dans un environnement climatique plus sec. Dans ce contexte, Nodichao et al. (2011) ont montré que l'architecture racinaire du palmier à huile n'était pas influencé par le déficit hydrique mais que, par contre, la localisation des racines (distance à l'arbre et profondeur), la biomasse, la longueur totale, la densité linéaire et les surfaces racinaires étaient influencées par des contraintes hydriques même modérées, et très variables selon les génotypes. Si la longueur, la surface et la distribution des racines dans le sol sont des paramètres déterminants de l'alimentation hydrique (Nodichao et al., 2011), certains auteurs ont par ailleurs montré l'importance de la longueur spécifique racinaire ou "specific root length" (SRL) qui renseigne sur les changements de l'environnement du sol et la disponibilité des nutriments (Ostonen et al. 2007 ; Tobner et al. 2013). Le SRL est le rapport de la longueur racinaire par la masse racinaire. De très bonnes relations ont été établies entre ces deux paramètres par Chopart et al. (2010) sur le système racinaire de la canne à sucre en Côte d'Ivoire.

Au Bénin, les études réalisées sur le système racinaire du palmier à huile ont plus porté sur des problématiques de sécheresse et d'adaptabilité des matériels génétiques à des conditions hydriques limitantes du sol (Cornaire et al., 1994 ; Sissinto, 2000 ; Tonassé, 2007 ; Nodichao, 2008). Très peu de travaux (Djègui, 1992 ; Dassou, 2011) ont étudié le développement du système racinaire du palmier en relation avec les pratiques agricoles dans les palmeraies. La caractérisation des palmeraies villageoises du Bénin (Aholoukpè et al., 2013a) a montré l'existence d'une diversité de techniques culturelles pratiquées par les paysans. Dans ces palmeraies, on assiste à une gestion particulière des feuilles d'élagage, allant d'une restitution totale à une restitution nulle des feuilles, qui peut influencer le développement du système racinaire des arbres. Dans ce travail, nous avons étudié les paramètres de développement racinaire des palmiers adultes des plantations villageoises en relation avec le mode de gestion des feuilles d'élagage.

7.2 Matériels et Méthodes

7.2.1 Objet d'étude

L'étude a porté sur les palmeraies villageoises du département du Plateau situées au sud-Est du Bénin (2°30 - 2°45 E et 6°35 - 7°45 N). Parmi les 12 palmeraies étudiées dans les chapitres précédents, 4 palmeraies, caractérisées par les modes suffisamment opposés de gestion des feuilles d'élagage ont été choisies : 2 palmeraies en mode de restitution totale des feuilles en andains (RT) et 2 palmeraies en mode de restitution nulle des feuilles (RN). Elles sont adultes, âgées en moyenne de 17 ans, où la gestion des feuilles d'élagage a duré une dizaine d'années. Elles ont été majoritairement plantées avec le matériel végétal sélectionné, d'origine génétique "Deli x La Mé" ou "Deli x Yangambi" mis au point et diffusé aux agriculteurs par la Recherche Agricole. Les palmeraies adultes ont été retenues pour avoir un temps relativement long de gestion des feuilles d'élagage et pour pouvoir accéder à un système racinaire entièrement mis en place. Dans chaque palmeraie, 4 palmiers ont été choisis parmi les neuf palmiers de départ pour les observations. Le tableau 7.1 présente les origines génétiques de ces palmiers.

7.2.2 Echantillonnage et traitement des racines

Les racines ont été échantillonnées par excavation du sol de la zone Z3s du dispositif de Voronoï simplifié (Dassou, 2011) (figure 7.1). La zone Z3s est située entre 2,5 et 4,5 m du tronc du palmier et présente en surface les dimensions de 0,70 m x 1,80 m. L'excavation du sol a été faite à 3 profondeurs (0-20 ; 20-50 et 50-100 cm). Sous andain, les racines qui sortent du sol ont été traitées à part dans l'horizon de surface (horizon H0 > 0). Dans les palmeraies RT les observations ont été faites sous andain et dans l'interligne alors que dans les palmeraies RN, elles n'ont été faites que dans l'interligne. Ce choix a été fait dans les palmeraies RN pour réduire le nombre de fosses de Voronoï à installer à cause de la lourdeur de l'activité, tout en maintenant un nombre minimal de palmiers étudiés par palmeraie afin d'éviter de grands biais. Il s'appuie également sur les résultats du chapitre 4 qui ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les stocks de carbone organique dans la ligne et dans l'interligne des palmeraies RN.

A chaque profondeur, les racines ont été collectées, lavées et triées sur place. Trois classes de racines ont été retenues en fonction de leur diamètre : racines primaires R1 : $\text{diam} \geq 4 \text{ mm}$; racines secondaires R2 : $1,5 \text{ mm} \leq \text{diam} < 4 \text{ mm}$; et racines fines, RF : $\text{diam} < 1,5 \text{ mm}$. Pour chaque type de racines, un sous-échantillon représentatif est prélevé au laboratoire puis pesé (poids frais) et scannée. Les aliquotes ont été séchées à 65°C pendant 48h pour l'estimation de

leurs masses sèches. La masse sèche de l'échantillon global a été calculée sous andain et dans l'interligne, par horizon et par type de racines selon une règle de trois. Elle a servi à calculer la densité racinaire.

Le passage au scanner des racines a été fait avec un scanner bitube A3 EPSON 10000XL piloté par le logiciel WinRhizo (Regent Inc, Canada). Cette opération a permis d'estimer la longueur et la surface racinaire selon les horizons et le mode de restitution des feuilles d'élagage.

Lors de l'excavation des racines dans les couches du sol, des échantillons de sol ont été prélevés à chacune des 3 profondeurs (0-20 ; 20-50 et 50-100) pour l'estimation du stock de carbone organique à partir de la densité apparente et de la teneur en carbone du sol. La densité apparente a été déterminée par la méthode classique de prélèvement du sol au cylindre de densité puis séchage à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant de sol sec. La méthode du CHN par combustion sèche totale du sol sous oxygène avec comme gaz vecteur l'hélium pur à 870°C, a permis de déterminer les teneurs en carbone. Le stock de carbone a été calculé par la formule :

$$QC = (C * Da * E * TF)/10).$$

QC en kg/m² ; C = teneur en carbone (g.100g⁻¹) ; Da = densité apparente du sol (g/cm³) ; E = épaisseur du sol (cm). TF = part de terre fine (g.g⁻¹) qui tient compte du taux de refus > 2 mm.

7.2.3 Traitement et analyse des données

Les paramètres de développement racinaire qui ont été analysés sont : la longueur racinaire, la surface racinaire et la densité de biomasse racinaire calculée à partir de la masse sèche racinaire et du volume de sol excavé. Le rapport entre la longueur racinaire et la masse racinaire a donné la longueur spécifique racinaire ou le "specific root length" (SRL). Ces paramètres ont été déterminés uniquement pour la zone Z3s étudiée.

Des comparaisons de moyennes ont été faites sur la base d'une analyse de variance. Le test de Tukey a permis de classer ces moyennes. Le test de corrélation de Pearson a permis d'établir des relations entre les paramètres de développement racinaire et entre le SRL et les stocks de carbone. Toutes ces analyses ont été effectuées avec le logiciel R 2.15.2 (R development core team, 2012).

Tableau 7.1 : Origine génétique des palmiers choisis de façon aléatoire par site et par mode de gestion des feuilles d'élitage.

Identifiant_Site	Gestion feuilles	Palmier	Origine génétique
Site 1	RN	P1	DLM
	RN	P2	DLM
	RN	P3	DY
	RN	P4	DY
Site 2	RN	P1	DY
	RN	P2	DLM
	RN	P3	DLM
	RN	P4	DLM
Site 3	RT	P1	DLM
	RT	P2	DY
	RT	P3	DY
	RT	P4	DY
Site 4	RT	P1	DY
	RT	P2	DY
	RT	P3	DY
	RT	P4	DY

RN et RT désignent respectivement les modes de restitution nulle et de restitution totale des feuilles d'élitage.
DLM = origine génétique Deli x La Mé ; DY = origine génétique Deli x Yangambi

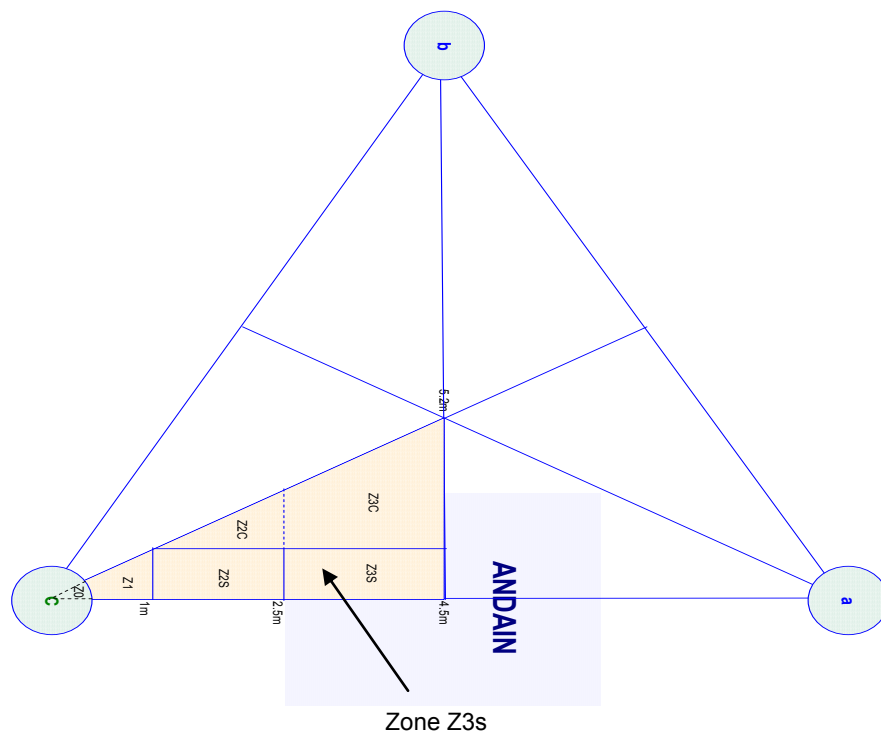
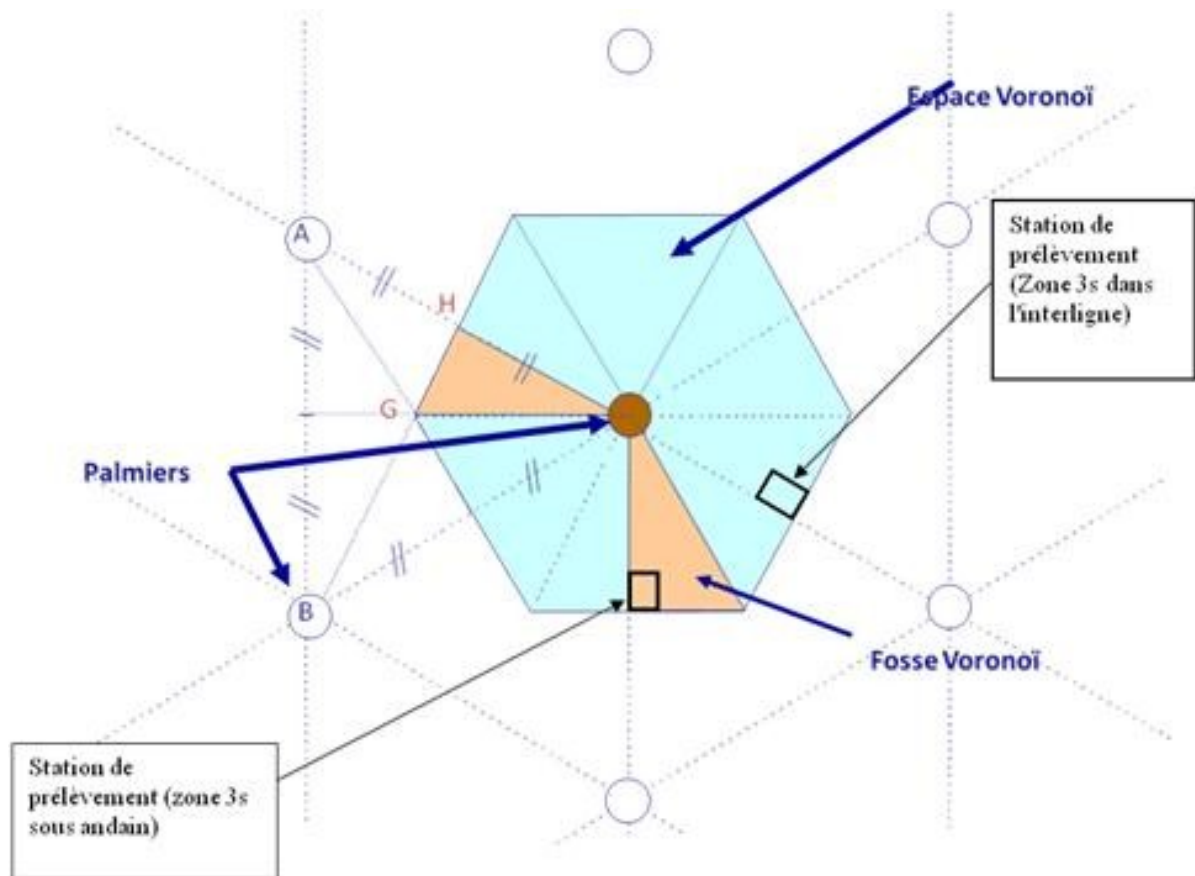


Figure 7.1. Dispositif de Voronoï d'observation racinaire. (Nodichao, 2008 ; Dassou, 2011).

7.3 Résultats

7.3.1 Etude des paramètres de développement racinaire

La densité, la longueur et la surface racinaires estimées pour chaque type de racine sur la couche 0-100 cm de sol sont présentées dans le tableau 7.2. En mode de restitution totale des feuilles (RT), il existe une différence hautement significative ($Pr < 0,001$) entre les moyennes sous andain et dans l'interligne des racines fines (RF) pour les trois paramètres de développement racinaire (densité, longueur et surface racinaire). Par contre, la différence n'est pas significative entre andain et interligne pour les racines primaires et secondaires.

Entre les interlignes RN et RT, les moyennes de chaque type de racines ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% pour ce qui concerne leur densité et leur longueur racinaires.

Les matrices de corrélation entre les 3 paramètres étudiés (figure 7.2) montrent des coefficients de Pearson tous hautement significativement différents de zéro. Ils indiquent une corrélation quasi parfaite entre longueur racinaire et surface racinaire, une bonne corrélation entre densité racinaire et longueur racinaire d'une part, et entre densité racinaire et surface racinaire d'autre part pour les trois types de racine. Les coefficients de corrélation sont toutefois moins élevés pour les racines secondaires.

On constate par ailleurs qu'il n'y a pas d'effet des génotypes étudiés sur les densités racinaires quelque soit le mode de gestion des feuilles (figure 7.3).

Tableau 7.2. Densité, longueur et surface totales racinaires dans la zone Z3s du Voronoï simplifié selon le mode de gestion des feuilles d'égavage et la position d'observation sur une profondeur de 0-100 cm de sol.

Position	Restitution totale des feuilles			Restitution nulle des feuilles		
	Densité racinaire (kg.m ⁻³)					
	R1	R2	RF	R1	R2	RF
Andain	2,52 ^b ±0,62	1,63 ^b ±0,28	5,91 ^a ±1,55	-	-	-
Interligne	2,78 ^b ±0,57	1,47 ^b ±0,19	1,82 ^b ±0,78	2,81 ^b ±0,94	1,44 ^b ±0,23	2,61 ^b ±1,1
	Longueur racinaire (m)					
Andain	7,15 ^d ±1,34	36,59 ^c ±3,01	140,64 ^a ±17,87			
Interligne	8,03 ^d ±0,84	36,85 ^c ±1,5	71,21 ^b ±10,89	6,21 ^d ±1,88	22,77 ^c ±1,48	91,41 ^b ±20,74
	Surface racinaire (m ²)					
Andain	0,14 ^b ±0,03	0,26 ^a ±0,02	0,24 ^a ±0,03	-	-	-
Interligne	0,16 ^b ±0,02	0,28 ^a ±0,01	0,13 ^b ±0,02	0,12 ^b ±0,04	0,17 ^b ±0,00	0,16 ^b ±0,03

Chaque valeur moyenne est présentée $\pm$ son écartype ($n = 8$). Les paramètres de développement (densité, longueur et surface) sont déterminées sur une profondeur de 100 cm de toute la zone Z3s étudiée.

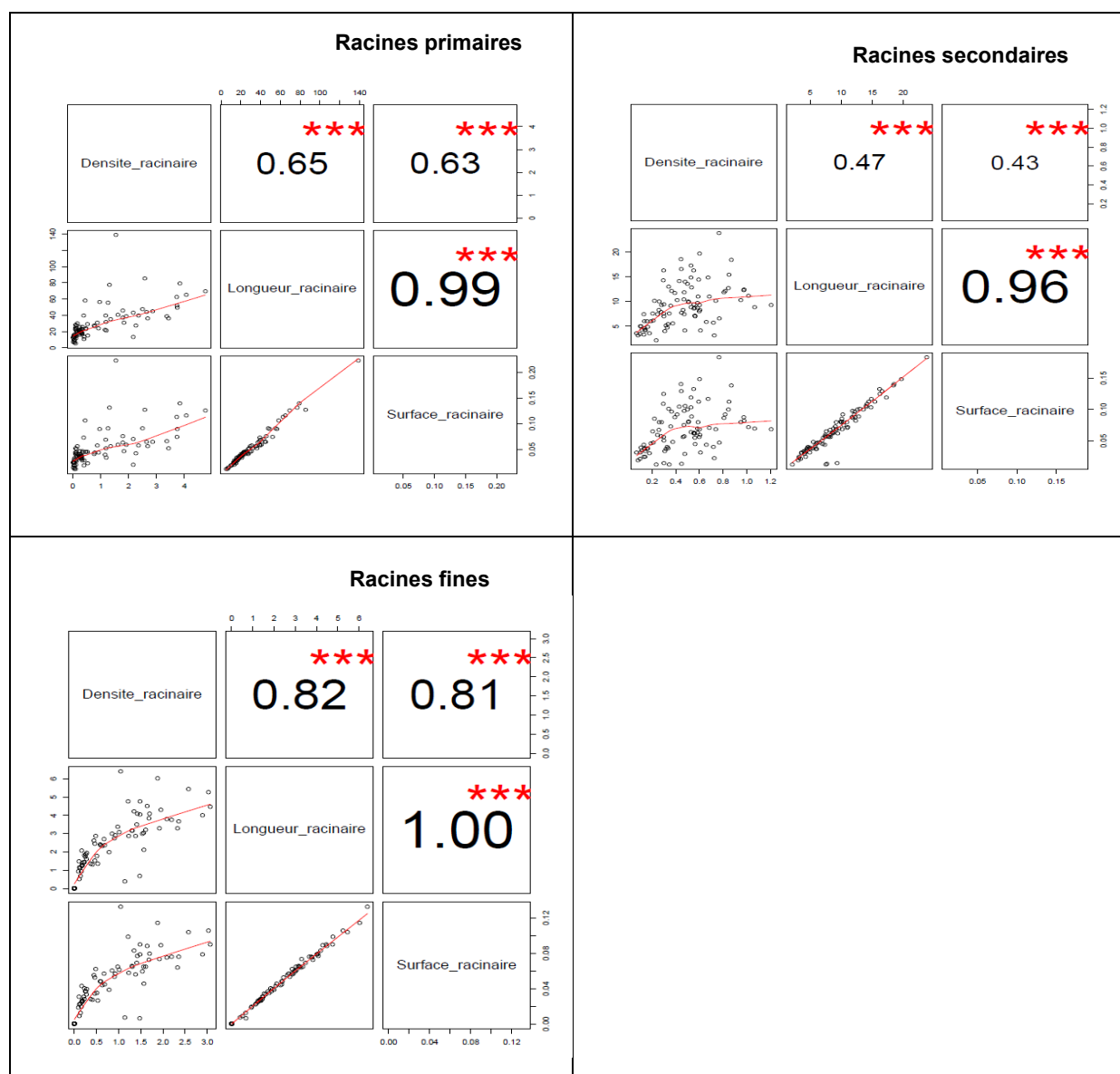


Figure 7.2. Corrélations de Pearson entre les paramètres de développement racinaire.
 La densité racinaire est exprimée en kg de racines par m³ de sol de la zone Z3s
 La longueur racinaire est exprimée en m de raciness dans la zone Z3s
 La surface racinaire est exprimée en m² de raciness dans la zone Z3s

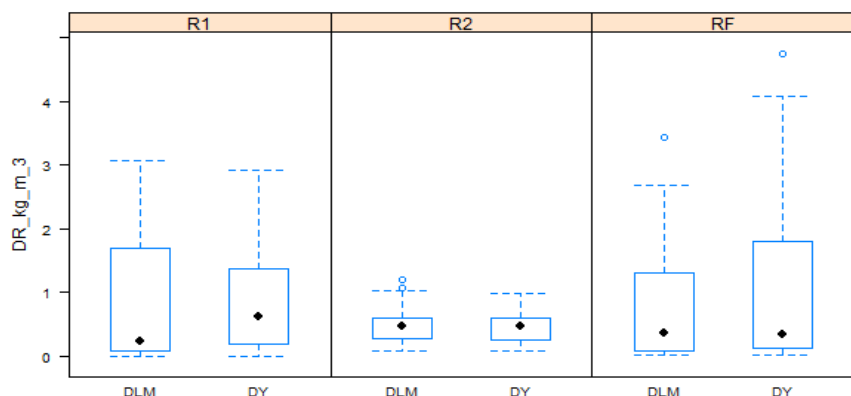


Figure 7.3. Moyenne des densités racinaires en fonction des génotypes. DR indique la densité racinaire ; DLM et DY indiquent respectivement les origines génétiques Deli x La Mé et Deli x Yangambi

Les densités et longueurs racinaires sont respectivement présentées par profondeur de sol et par mode de gestion sur les figure 7.4 et 7.5. Dans les parcelles RT, les densités et les longueurs des racines fines diminuent de la surface vers la profondeur aussi bien sous andain que dans l'interligne. Dans la couche H0 au-dessus du sol sous andain il n'existe pas de racines primaires, la densité et la longueur des racines fines sont supérieures à celles des racines secondaires ; la différence est hautement significative au seuil de 5%. Sous andain et dans interligne, les racines fines ne sont supérieures aux autres types de racines que dans la couche de sol 0-20. Dans les deux autres couches de sol 20-50 et 50-100 cm la différence n'est pas significative entre les trois types de racines.

La comparaison des densités et longueurs racinaires des interlignes RT et RN montre une différence entre les horizons du sol. A 0-20 cm, les racines fines des interlignes RN sont supérieures à celles des interlignes RT. Il en est de même pour les R1, mais seulement pour la densité racinaire. Dans tous les cas, le développement racinaire (densité et longueur) est plus important dans les 20 premiers centimètres de sol que dans les autres horizons de sol, à la distance de 2,5 - 4,5 m (zone Z3s) du palmier.

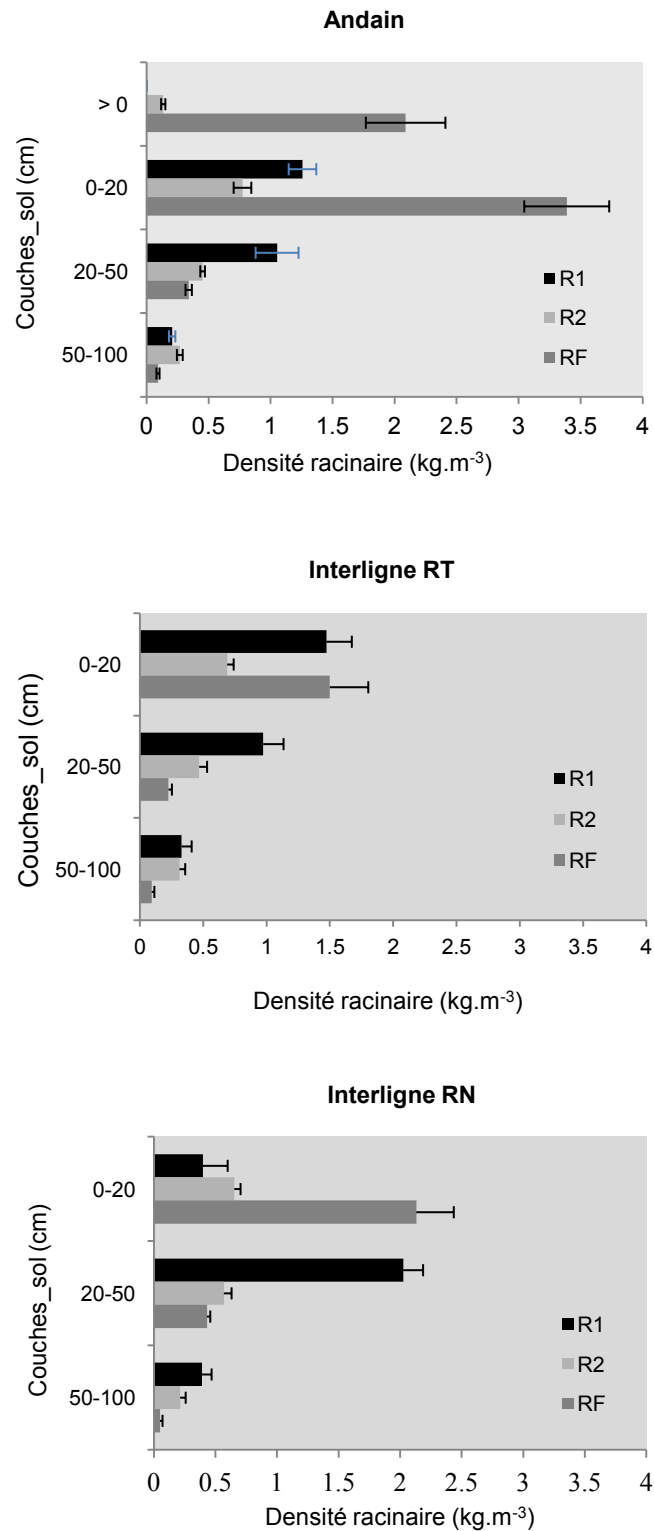


Figure 7.4. Densité et longueur racinaire de chaque type de racine par horizon selon la position (andain et interligne) de la zone Z3s en mode RT et RN. Les barres d'erreur représentent les erreurs standard (n=8).

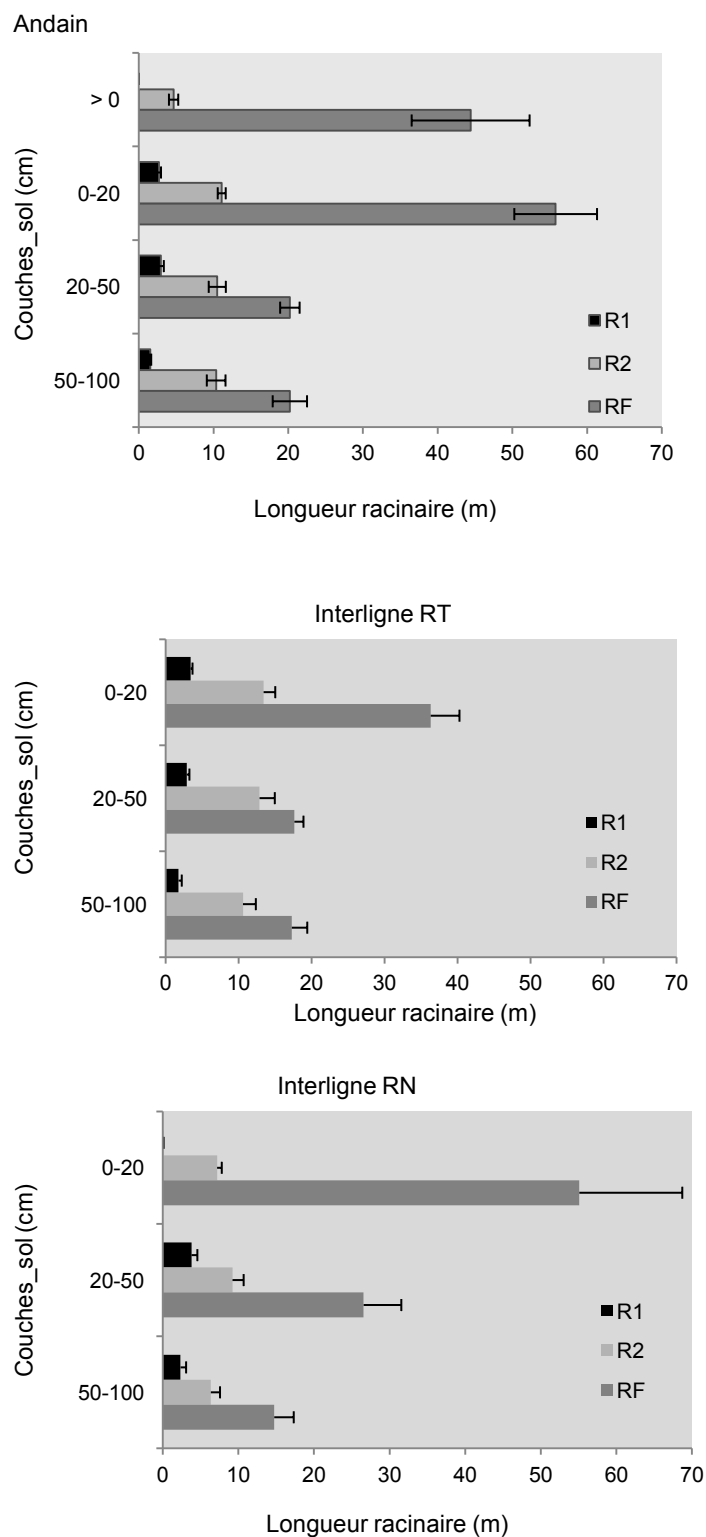


Figure 7.5. Longueur racinaire de chaque type de racine par horizon selon la position (andain et interligne) de la zone Z3s en mode RT et RN. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standard, n = 8.

7.3.2 Le ratio SRL

Le tableau 7.3 montre sous andain et dans l'interligne que les valeurs du SRL des racines primaires sont plus faibles que celles des racines secondaires qui sont elles mêmes plus faibles que celles des racines fines. Quelle que soit la profondeur du sol, les valeurs du SRL des racines primaires et secondaires sont plus ou moins constantes. On obtient une valeur moyenne d'environ 1 cm.g⁻¹ et 6 cm.g⁻¹ respectivement pour les racines primaires et secondaires sous andain et dans l'interligne. Par contre, les valeurs du SRL des racines fines augmentent avec la profondeur du sol et passent du simple au double d'une profondeur à une autre. Elles sont plus élevées dans l'interligne que sous l'andain. Dans la couche H0 sous andain, le SRL des racines secondaires a une valeur très élevée, et supérieure à celle des racines fines de la même couche.

Les matrices de corrélation (figure 7.6) entre SRL et stock de carbone montrent qu'il existe une bonne corrélation négative significativement différente de zéro ($R = -0,21$, $p < 0,05$) entre valeurs SRL des racines fines et le stock de carbone. Par contre, il n'existe pas une bonne corrélation entre les valeurs SRL des racines primaires et secondaires et le stock de carbone du sol.

Tableau 7.3. SRL des types de racine par horizon selon la position de la zone Z3s. SRL (cm.g⁻¹) ± Erreur standard (n=8).

Position	Couche de sol (cm)	R1	R2	RF
Interligne	0-20	0,89 ± 0,13	6,23 ± 0,68	11,78 ± 2,13
	20-50	0,71 ± 0,07	5,69 ± 0,54	19,40 ± 1,89
	50-100	1,11 ± 0,15	5,22 ± 0,33	34,74 ± 3,25
	> 0	0,00	55,21 ± 9,47	43,16 ± 6,08
Andain	0-20	0,88 ± 0,12	5,86 ± 0,52	6,54 ± 0,38
	20-50	0,78 ± 0,15	6,04 ± 0,63	15,98 ± 1,25
	50-100	1,22 ± 0,22	6,07 ± 0,58	36,10 ± 3,22

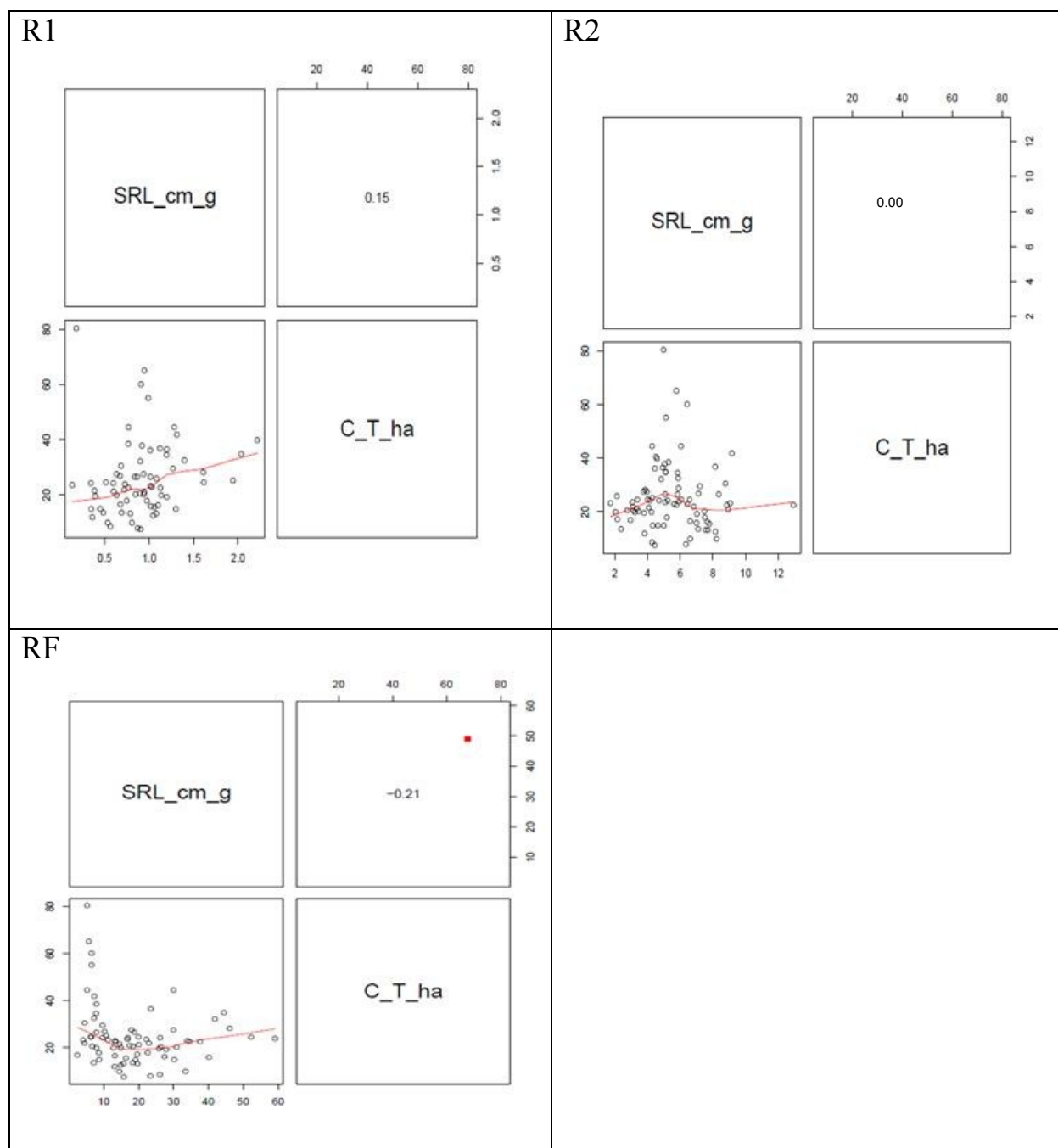


Figure 7.6. Corrélation de Pearson entre SRL et stock de carbone des différents types de racines.

7.4 Discussion

7.4.1 Développement du système racinaire des palmiers

Le recyclage des feuilles d'élitage a augmenté significativement la densité et la longueur des trois types de racines. Les racines fines ont été évidemment plus sensibles au recyclage des feuilles et se sont mieux développées que les racines primaires et secondaires sous les tas de feuilles. La densité racinaire étant uniquement dépendante de la biomasse racinaire produite sur un volume de sol donné, les variations obtenues pour ce paramètre sont dues aux variations de la biomasse racinaire. Ainsi, l'apport de matière organique comme source de nutriments a été très favorable aux racines fines seulement dont la biomasse estimée sur 100 cm de profondeur a augmenté de trois fois en 10 ans de restitution des feuilles par rapport à la situation d'exportation totale de ces feuilles. Le milieu sous andain riche en matière organique [en moyenne 27gC.kg^{-1} sur les 20 premiers centimètres (résultats du chapitre 4)], avec une humidité relativement élevée (Hartmann, 1991 ; Djègui, 1992) favorise le développement des racines fines pour leur principal rôle d'alimentation nutritionnelle et hydrique de la plante. Elles sont en pleine croissance et très ramifiées. Ce qui justifie les mêmes tendances obtenues pour leur longueur et leur surface. Selon Jourdan (1995), les racines fines sont considérées comme étant la principale partie du système racinaire du palmier à huile qui lui assure l'absorption de l'eau et des minéraux. Ce rôle d'alimentation hydrique et nutritionnelle est reconnu aux racines fines par plusieurs auteurs (Kansou, 2003 ; Imada et al., 2013 ; Wang et al., 2013). Il n'est donc pas surprenant de voir leurs paramètres de développement varier en fonction de la teneur en matière organique du sol. Ces différences de densités racinaires entre zones andain et interligne, dues principalement aux racines fines, avaient été évoquées par Djègui (1992) et Hartmann (1991) pour les palmeraies du Bénin et de la Côte d'Ivoire. Imada et al. (2013), Wang et al. (2013) ont montré respectivement aux USA et en Chine que les racines fines de *Pinus tabulaeformis* et de *Tamarix ramosissima* ont des traits fonctionnels qui répondent bien à la richesse en ressources des sols. Ils ont prouvé que l'augmentation de la densité des racines fines était due à la disponibilité en azote et à l'humidité du sol.

L'inexistence de différence significative entre les paramètres racinaires dans les interlignes des parcelles RT et RN sur la profondeur de 100 cm montre un effet localisé de la restitution des feuilles sur le développement des racines. Il semblerait donc que le mode de répartition de la biomasse racinaire autour des palmiers sans apports localisés de feuilles soit plutôt homogène comme les simulations du modèle RACINES le prévoyait (Jourdan et al., 1997c).

L'étude des effets du mode gestion des feuilles sur le développement racinaire du palmier à huile montre que la restitution totale des feuilles n'améliore le système racinaire que dans les 20 premiers centimètres du sol, par rapport à la restitution nulle.

Le cumul des paramètres racinaires sur 100 cm de profondeur ne montre pas une différence significative entre les interlignes RT et RN pour chaque type de racine. Mais il existe une différence entre les horizons de ces deux positions. Notamment pour les racines fines de la couche 0-20 cm dont la densité est plus faible dans l'interligne RT que dans l'interligne RN.

Cela pourrait s'expliquer par une réallocation du carbone préférentiellement vers les zones où les racines sont stimulées (sous les andains). Ainsi, il y a moins de racines fines dans les interlignes RT que dans les interlignes RN où il y aurait une répartition plus homogène du carbone alloué par la plante. Le recyclage des feuilles induit donc le développement des racines fines sous andain au détriment de celles des interlignes de la même parcelle. De même, le recyclage des feuilles semble entraîner une remontée des R1 vers la surface vu que la biomasse des R1 dans la couche 0-20 cm est plus importante sous andain que dans l'interligne RN, et que dans la couche 20-50 cm cette biomasse sous andain est inférieure à celle de l'interligne RN. Ainsi, même si le cumul des paramètres racinaires sur la couche 0-100 cm de sol montre que le développement important des racines sous andain n'influence pas celui dans l'interligne (Interligne RT = Interligne RN sur 0-100 cm), on constate toutefois des différences dans les sous couches de sol entre andain et interligne pour les R1 et les RF.

Par ailleurs, le développement des racines dans les différentes couches de sol montre une diminution des paramètres de croissance avec la profondeur. Des résultats similaires trouvés en Indonésie (Kansou, 2003) et au Bénin (Tonassé, 2007 ; Nodichao, 2008) ont prouvé qu'il y a une nette différence entre les productions totales des trois types de racines et que la production de matière sèche racinaire diminue très rapidement après 50 cm de profondeur. Cette production de biomasse racinaire tend vers zéro après 3 m de profondeur chez des palmiers de 4 ans au Bénin (Nodichao, 2008). Selon Ng et al. (2003), la plupart de la biomasse racinaire du palmier à huile se trouve à moins de 1 m de la surface du sol, mais les racines actives dans l'absorption des nutriments sont principalement situées dans la couche supérieure de 0,5 m du sol.

La restitution en andains des feuilles d'élagage a augmenté de deux fois la densité des racines fines ($3,5 \text{ kg.m}^{-3}$) par rapport à celle des interlignes ($1,7 \text{ kg.m}^{-3}$) dans la couche 0-20 cm de sol. Kansou (2003) a trouvé le même coefficient d'augmentation dans la zone Z3 du dispositif de Voronoï simplifié sur la même profondeur de sol pour l'étude racinaire sous andain et dans l'interligne des palmeraies de 9 ans en Indonésie. Les densités de racines fines trouvées par

l'auteur (1 kg.m^{-3} sous andain et $0,5 \text{ kg.m}^{-3}$ dans l'interligne) sont faibles par rapport à nos résultats à cause du jeune âge des palmeraies étudiées en Indonésie, dont les feuilles d'élagage ont été restituées pendant seulement deux ans.

Par ailleurs, la formation de la couche H0 au dessus du sol sous les andains de feuilles a une part additive importante sur les biomasses et longueurs des racines secondaires et fines comparativement aux interlignes sans andain. La pratique de restitution des feuilles d'élagage contribue ainsi fortement à l'augmentation des paramètres de développement racinaire du palmier permettant une meilleure acquisition des ressources.

La densité racinaire équivaut à la biomasse de racines dans un volume de couche de sol ; son évolution dans la couche de sol peut être donc attribuée à celle de la biomasse racinaire. Ainsi, les tendances obtenues pour la densité racinaire montrent qu'à partir de 20 cm vers la profondeur la différence de biomasse racinaire entre les types de racines semble ne plus être contrôlée par l'effet du recyclage des feuilles. Dans les deux dernières couches de sol étudiées (20-50 cm et 50-100 cm), les biomasses diminuent avec le diamètre racinaire et confirment les résultats de Tonassé (2007) qui conclut que les biomasses racinaires évoluent dans le même sens que le diamètre racinaire : $R1 > R2 > RF$. Nos résultats montrent une tendance inverse pour les longueurs et témoignent ainsi de la différence du degré de ramification entre les 3 types de racine. Dans les conditions de notre étude, les racines fines sont plus ramifiées que les secondaires qui le sont plus que les primaires. Il existerait donc une corrélation négative entre le degré de ramification et le diamètre racinaire. Cette relation a été prouvée ($R_{\text{Pearson}} = -0,63$) par Comas et Eissenstat (2009) sur des espèces forestières de l'Amérique du Nord.

Dans la zone Z3s la densité importante de R1 en profondeur (au-delà de 50 cm) obtenue dans notre étude montre le rôle de ce type de racine dans la conduction de l'eau depuis les couches profondes du sol (Nodichao, 2008). Cette conduction de l'eau se fait via les R2 portées par les R1, puisque dans la zone Z3 il n'y a pas de R1 verticales (Jourdan et Rey, 1997a). Ng et al. (2003) affirment que les racines plus profondes du palmier fonctionnent pour l'absorption de l'eau parce que la concentration de nutriments dans les sols tropicaux est généralement très faible, à une profondeur supérieure à 0,5 m de la surface du sol.

L'important développement racinaire aussi bien en surface qu'en profondeur induit par la restitution des feuilles pourrait contribuer à une bonne alimentation hydrique et nutritionnelle des plants de palmier à huile et avoir ainsi un effet positif sur la production. Pour la production des palmeraies de Malaisie, Goh et Amit (1993b) reconnaissent que l'absorption

de l'eau et des nutriments par les racines est probablement le facteur agronomique le plus critique qui détermine la croissance et la production des palmiers. L'effet positif d'un bon développement racinaire sur le rendement d'autres cultures a été antérieurement démontré (Drapier, 1983 ; Chadda, 2008). La pluviométrie étant limitante à la production du palmier à huile au Bénin, le développement du système racinaire des palmiers dans les conditions de restitution des feuilles d'élagage, pourraient permettre aux arbres de supporter un temps soit peu, le grand déficit hydrique (Nouy et al., 1999) engendrée par la longue période sèche enregistrée au Bénin de décembre à avril. La restitution des feuilles d'élagage du palmier serait donc une pratique d'évitement des effets négatifs de la sécheresse à l'image d'autres pratiques culturales (ablation des inflorescences, élagage sévère des arbres) décrites par Nodichao (2008). Elle constitue par ailleurs une pratique qui améliorerait l'alimentation nutritionnelle des palmiers.

Nos résultats ont montré une bonne corrélation entre les trois paramètres racinaires étudiés (densité, longueur et surface racinaire) et confirment les résultats de Nodichao (2008) et de Dassou (2011) qui ont trouvé de bonnes relations linéaires ($R^2 > 0,90$) entre les trois paramètres racinaires chez le palmier à huile. Ils concluent que cette bonne corrélation a l'avantage de passer de la matière sèche de racines qui est beaucoup plus simple à mesurer, à la surface totale ou à la longueur totale des racines qui sont des paramètres plus complexes à mesurer. Il faut toutefois préciser que nos résultats concernent la zone Z3s de l'espace de Voronoï autour du palmier. En raison de la variabilité de la répartition du système racinaire du palmier en fonction de la distance par rapport à l'arbre (Jourdan et Rey, 1997 ; Kansou, 2003 ; Tonassé, 2007 ; Nodichao, 2008), les tendances obtenues dans notre étude peuvent être moins évidentes que celles estimées dans tout l'espace de Voronoï prenant en compte l'ensemble des zones 1, 2 et 3 (figure 7.1). Selon Nodichao (2008), la zone 3 (3 - 4,5 m du palmier) concentre 22 à 26% des racines ; sachant que l'auteur a étudié la zone 3 complète comportant Z3s et Z3c (figure 7.1). Dassou et al. (résultats non publiés) ont montré que la zone Z3s occupe 27 % de l'espace de Voronoï simplifié qui représente 46% du Voronoï complet.

Les différences significatives obtenues entre les paramètres racinaires des 3 types de racines confirment leur grande variation en fonction du type de racine, de la position (andain et interligne) distinguée par le mode de gestion des feuilles, et de la profondeur du sol. Les interactions «position x type de racine» et «profondeur x type de racine» ont été significatives. Ces résultats confirment ceux de Djègui (1992) qui a montré une variabilité spatiale du système racinaire du palmier à huile dans les palmeraies villageoises, due d'une part à la restitution en andains des feuilles d'élagage et d'autre part au système de cultures

vivrières sur billons dans les jeunes palmeraies. Selon Wang et al. (2006), la distribution spatiale des différents types de racines d'une plante détermine leur architecture dans le sol qui est principalement orientée vers l'acquisition des ressources du sol que sont l'eau et les nutriments.

7.4.2 Le ratio SRL

Le ratio "Specific Root Length" a varié en fonction du stock de carbone dans le sol. Dans les couches de sol les plus riches, les racines ont des ratios SRL plus faibles. Ces ratios augmentent avec la profondeur pour les 3 types de racines et indiquent le gradient décroissant de la fertilité du sol avec la profondeur du sol. Selon Goh et Amit (1993a), la périodicité et l'emplacement des racines dans le profil du sol pourraient indiquer quand et d'où l'absorption de l'eau et des nutriments du sol provient. Osmont et al. (2007) rapportent que les plantes comptent sur la modulation de l'architecture du système racinaire pour répondre à un environnement changeant du sol. La longueur et la densité des racines (qui définissent le SRL) sont des paramètres pertinents pour des modèles montrant l'accès à l'eau et les nutriments du sol par les racines (Chopart, 1996 ; Tinker et Nye, 2000, cités par Nodichao et al., 2011).

La baisse de la fertilité du sol contraint le système racinaire à développer des capacités plus exploratrices du sol. Le carbone racinaire est donc beaucoup plus utilisé pour la longueur que pour la biomasse. Nos résultats montrent que les racines fines sont les plus exploratrices dans la couche 50-100 cm. Elles ont été plus sensibles à la diminution du stock de carbone du sol. Bolte et Villanueva (2006) affirment que le SRL est un paramètre décrivant l'architecture des racines fines fonctionnelles et leur efficacité dans la colonisation de l'espace et l'exploitation des ressources du sol. Ainsi, par leur biomasse et leur distribution, les racines fines indiquent la capacité de compétition souterraine d'un arbre.

La sensibilité des racines fines à la variation de la fertilité des sols a été prouvée dans notre étude par la bonne corrélation négative entre le SRL de ces racines fines et le stock de carbone du sol. Une forte dépendance du SRL aux racines fines avait été prouvée par Ostonen et al. (2007), Tobner et al. (2013). Ostonen et al. (2007) ont par ailleurs montré à travers une méta-analyse, qu'en milieu fertilisé le SRL des racines fines d'espèces forestières a baissé de 15% par rapport au SRL du milieu non fertilisé. Ils suggèrent que le SRL peut être utilisé comme un bon indicateur de la disponibilité des nutriments pour les plantes.

Dans un sol riche comme le sol sous les andains des palmeraies étudiées, le ratio SRL est faible car le besoin d'exploration par les racines est moins important. Il y a donc peu de

longueur pour une même biomasse ou une forte biomasse pour une même longueur de racine. En milieu fertile, le carbone alloué par la plante est donc plus utilisé par les racines pour la densification de leur tissu puisque la croissance en diamètre des racines est arrêté depuis l'âge 2 ans du palmier (Jourdan, 1995). Ainsi, les tissus racinaires sont denses et les longueurs sont faibles : les racines sont en situation d'exploitation des nutriments du milieu. Dans les interlignes où le sol est moins fertile, c'est plutôt la tendance inverse qui s'observe : les racines sont peu denses et le carbone est alloué pour leur croissance en longueur pour une exploration du sol. Dans leur étude sur le système racinaire de plusieurs espèces forestières en Amérique du nord, Comas et Eissenstat (2009) ont prouvé l'existence d'une bonne corrélation négative ($R_{\text{Pearson}} = -0,39$) entre le SRL et la densité du tissu racinaire. Ils concluent que plus grand est le SRL, plus faible est la densité du tissu racinaire. En définitive, les tissus racinaires dans le sol des palmeraies sont plus denses sous andain que dans l'interligne et plus dense en surface qu'en profondeur, vu le gradient décroissant de la fertilité du sol vers la profondeur.

La litière dans la couche H0 au dessus du sol, a favorisé une ramification importante des racines secondaires et fines qui sont plus longues (SRL élevé) avec des tissus moins denses. Tobner et al. (2013) ont trouvé une bonne corrélation positive ($R_{\text{Pearson}} = 0,66$) entre le SRL et la ramification racinaire de plusieurs espèces forestières au Canada. Dans notre étude, il est probable que les racines secondaires présentes dans la litière sous les andains soient des racines secondaires à géotropisme négatif, très ramifiées (RIIVH) (Jourdan et Rey, 1996) qui permettent au palmier d'exploiter par opportunisme l'humidité et les nutriments du sol sous les andains (Nodichao, 2008).

7.5 Conclusion du chapitre 7

La restitution des feuilles du palmier à huile a favorisé un développement important des racines secondaires et fines dans la litière au-dessus du sol et a augmenté les paramètres de développement des racines fines dans la couche 0-20 cm du sol. L'effet de cette pratique est très localisé. Sous andain, le développement des racines R1 et R2 ne se fait pas au détriment de celles de la zone sans restitution de feuilles. En revanche, le recyclage des feuilles induit une augmentation de la biomasse des racines fines sous andain au détriment des racines fines des zones sans andain. Au-delà de 20 cm de profondeur l'effet du recyclage des feuilles sur le développement des racines est faible et la densité racinaire évolue dans le même sens que le diamètre racinaire alors que la longueur racinaire évolue dans le sens contraire. Enfin, l'évolution du ratio "specific root length" des racines du palmier à huile montre une variabilité spatiale et verticale de la fertilité du sol qui influence plus le développement des racines fines que celui des racines secondaires et primaires.

Les observations faites dans cette étude ont été restreintes à la zone Z3 du Voronoï simplifié et à 1 m de profondeur. Il serait intéressant d'aller jusqu'à 3 m de profondeur, et même au-delà de 3 m, et d'étendre ces observations aux deux autres zones afin de faire une estimation exacte du développement racinaire des palmeraies villageoises dans ce contexte de gestion des feuilles d'élagage.

Tableau de synthèse des observations de biomasses et minéralo-masses en palmeraies adultes (13-20 ans). RT = restitution totale ;
RN = restitution nulle

Paramètres	Organes	RT		RN		(RT-RN)/RN*100	Observations
Production annuelle Biomasse (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Régimes	6,3		6,4		-2%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Feuilles	9,4		8,2		15%	
Biomasse sur pied (t.ha ⁻¹)	Tronc	30,6		20,8		47%	Effet cumulatif du recyclage des feuilles
N (g.100g ⁻¹)	Régimes (rafles)	0,94		0,71		32%	Effet significatif du recyclage des feuilles
	Feuilles	0,70		0,68		3%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Tronc	0,36		0,24		50%	
P (g.100g ⁻¹)	Régimes (rafles)	0,11		0,10		10%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Feuilles	0,06		0,07		-14%	
	Tronc	0,04		0,04		0%	
K (g.100g ⁻¹)	Régimes (rafles)	2,52		2,90		-13%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Feuilles	0,40		0,38		5%	
	Tronc	0,50		0,43		16%	
Ca (g.100g ⁻¹)	Régimes	0,24		0,19		26%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Feuilles	0,59		0,65		-9%	
	Tronc	0,16		0,18		-11%	
Mg (g.100g ⁻¹)	Régimes	0,28		0,26		8%	Pas d'effet du recyclage des feuilles
	Feuilles	0,40		0,52		-23%	
	Tronc	0,20		0,22		-9%	
Densité racinaire (kg.m ⁻³) sur 0-100 cm de profondeur du sol dans la zone Z3s		Ligne (Andain)	Interligne	Ligne	Interligne		Augmentation significative de la densité de biomasse des racines fines due au recyclage des feuilles
	R1	2,5	2,8	-	2,8	-11%	
	R2	1,6	1,5	-	1,44	7%	
	R3+R4	5,9	1,8	-	2,6	127%	

Conclusion de la troisième partie

Dans cette partie où l'effet de la gestion des feuilles d'élagage sur le système sol-plante a été étudié les résultats ont permis de dégager un ensemble de conclusions :

1 - Le recyclage des feuilles en andain a significativement modifié certains paramètres du sol et le développement du système racinaire de la plante dans les palmeraies adultes où la restitution des feuilles a été faite pendant une dizaine d'années. Mais les effets sont restés limités aux 20 premiers centimètres du sol. Le sol s'est enrichi en azote ($1,5\text{gN.kg}^{-1}$) suite au recyclage des feuilles. Les teneurs en matière organique sont passées de 10gC.kg^{-1} à 20gC.kg^{-1} de la restitution nulle à la restitution totale. Le pH a augmenté de 0,5 unité et le sol sous andain est passé de l'état acide à légèrement acide. L'enrichissement du sol en matière organique et en azote a intensifié l'activité microbienne. La biomasse et la respiration microbiennes ont été améliorées et ont modifié la qualité des fractions organiques du sol. Des teneurs importantes de carbone ont été obtenues dans les fractions organiques grossières minéralisables. Les teneurs en carbone des fractions fines organiques se sont améliorées de 40% en surface (0-5 cm) et de 15% en profondeur (20-30 cm). Elles indiquent une certaine stabilisation de la matière organique des sols sous andain. Cette activité microbienne a joué un rôle dans la minéralisation des fractions organiques grossières, entraînant ainsi une amélioration des paramètres de fertilité du sol. La somme des cations et la capacité d'échange cationique ont atteint des valeurs 2 fois plus importantes sous les andains : de $3,5\text{ meq.}100\text{g}^{-1}$ de sol en mode RN à $7\text{ meq.}100\text{g}^{-1}$ de sol en mode RT.

2- Les palmeraies villageoises du Bénin stockent du carbone dans le sol sous les andains. Le stock de carbone sous andain est de 60MgC.ha^{-1} sur 0-50 cm, dans les palmeraies adultes RT (10 ans de restitution des feuilles) contre 35 MgC.ha^{-1} dans les palmeraies RT pré-adultes (4 ans de restitution). Il est par ailleurs intéressant de noter que le stock de carbone du sol n'a pas baissé au cours du temps dans le cas d'une restitution nulle des feuilles. Cela serait imputable à la compensation de la perte de matière organique dans les palmeraies adultes RN par le recru végétatif et le turn-over racinaire important.

Les conclusions présentées dans ces deux paragraphes (1 et 2) valident en partie l'hypothèse H2.b qui stipule qu'il existe une variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol due à la gestion des feuilles d'élagage. La variabilité temporelle des stocks de carbone n'ayant pas été vérifiée dans les palmeraies en mode RN.

3 - Les études de biomasses et minéralo-masses aériennes n'ont pas révélé d'effet significatif du recyclage des feuilles d'élagage sur la production de biomasse de feuilles et de régimes et de minéralo-masse de la plante. En revanche, on notera que la biomasse du tronc a augmenté progressivement au cours du temps dans les parcelles à restitution totale des feuilles d'élagage, ce qui constitue une forme de stockage de carbone.

Par ailleurs, même dans le cadre de la restitution totale des feuilles d'élagage, les palmiers ont présenté des états de déficience des principaux éléments minéraux que sont l'azote et le potassium dont les teneurs sont respectivement inférieures à 2 et 0,5% dans les folioles. Les performances sont restées assez faibles par rapport aux palmeraies villageoises d'autres pays comme le Cameroun et par rapport au potentiel des palmeraies industrielles. La production de régimes a été dans le meilleur des cas (palmeraies adultes RT) de $6 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, inférieure à $8,5 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ trouvée dans les palmeraies en station de recherche dans la même région. Cette production reste largement inférieure à celle de $27 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ obtenue dans des palmeraies industrielles en Indonésie avec un matériel végétal de même origine génétique du Bénin. Ceci suggère l'intérêt de rechercher des intrants complémentaires d'azote (essais d'association de légumineuses par exemple en début de culture, voire essais de systèmes de type «agroforestier» avec légumineuses dans les interlignes) et de potassium (restitution des rafles riches en potassium).

4 - Enfin, l'amélioration de la fertilité du sol sur les 20 premiers centimètres sous andain à l'âge adulte, a induit des effets directs sur le développement des racines secondaires et fines de la plante. Les paramètres de développement des racines secondaires (R2) ont été modifiés dans l'horizon H0 formé au-dessus du sol sous andain, alors que ceux des racines fines (RF) l'ont été aussi bien dans H0 que dans H1 (0-20 cm). Les racines fines ont été les plus sensibles à la restitution des feuilles d'élagage. Leur densité a triplé et leur longueur spécifique (SRL) a baissé, confirmant ainsi l'enrichissement du milieu en éléments nutritifs. Le développement des RF sous andain (mode RT) s'est fait au détriment du développement des RF des interlignes (mode RN). Cet important développement des racines fines sous andain, responsables de la l'alimentation hydrique et nutritionnelle de la plante, devrait normalement profiter à la plante.

Les conclusions des deux derniers paragraphes (3 et 4) vérifient l'hypothèse H2c) les biomasses et minéralomasses du palmier à huile sont modifiées par les modes de gestion des feuilles.

QUATRIEME PARTIE

Discussion et Conclusion générales

Quatrième partie : Discussion et Conclusion générales

Dans cette dernière partie de la thèse, après avoir rappelé la question de recherche, les hypothèses de recherche et la démarche méthodologique (stratégie de recherche) mise en oeuvre, nous discuterons des principaux résultats obtenus selon une vision agronomique et environnementale. Cette discussion portera également sur la qualité de la démarche utilisée. Elle nous permettra ensuite d'analyser la durabilité du système de culture du palmier à huile en plantation villageoise, les atouts et les limites du système. Elle débouchera enfin sur une conclusion générale assortie de perspectives.

1- Rappel sur la question, les hypothèses et la stratégie de recherche

Cette thèse avait pour objectif général d'étudier l'impact de la gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile sur le sol et la plante dans des chronoséquences de palmeraies villageoises et d'en tirer les conclusions sur la durabilité du système de culture.

Dans l'introduction, la problématique a présenté les facteurs agronomiques et environnementaux de gestion durable des systèmes agricoles. Le cas des systèmes de culture du palmier à huile a été présenté. Les travaux antérieurs réalisés par Hartmann (1991) en Côte d'Ivoire et par Djègui (1992) au Bénin, ont permis de comprendre l'effet de ce système de culture sur des propriétés physiques et chimiques du sol. Ces travaux avaient essentiellement étudié quelques aspects agro-pédologiques des plantations industrielles. Ils avaient suggéré en conclusion, d'effectuer un recyclage des résidus organiques (feuilles, tronc et sous produits d'usage) dans les plantations de palmier à huile, associé à un apport raisonné de fumures minérales en adéquation avec le contexte climatique du milieu.

Les palmeraies villageoises du Bénin sont en forte expansion et ont des caractéristiques assez particulières et souvent contraires à ces suggestions. Elles sont peu ou pas fertilisées et la biomasse de feuilles recyclables fait l'objet de divers modes de gestion. Dans le contexte actuel d'une agriculture écologiquement durable, des questions se posent sur les performances agronomiques et environnementales du système "sol-plante" de ces palmeraies.

Cette thèse proposait donc de répondre à la question de recherche suivante :

- Au cours du cycle du palmier à huile en plantation villageoise, quels sont les effets de la gestion des feuilles d'élagage sur le sol et la plante ?

Pour répondre à cette question, des hypothèses ont été formulées et testées :

H1- Il existe dans la zone d'étude des types de palmeraies villageoises qui se distinguent par des facteurs pédologiques, agronomiques et socio-économiques ;

H2- Les modes de gestion des feuilles d'élagage induisent des effets significatifs sur le sol et la plante et varient selon les âges des palmeraies. Parmi ces effets :

H2.a. les modes de gestion des feuilles d'élagage affectent les stocks de la matière organique du sol selon les âges des palmeraies ;

H2.b. la gestion des feuilles crée une variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol ;

H2.c. les biomasses et minéralo-masses du palmier à huile sont modifiées.

La question de recherche a été traitée à travers une stratégie pyramidale inversée axée sur un diagnostic socio-agronomique en milieu villageois qui a débouché sur le choix de palmeraies pour des études de sol et de plante au champ et au laboratoire.

Le test de ces hypothèses selon la démarche mise en œuvre nous a permis d'obtenir des résultats que l'on peut à présent discuter d'un point de vue agronomique et environnemental, et qui concernent :

- ❖ les caractéristiques des palmeraies villageoises,
- ❖ le stock de carbone et les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol selon le mode de gestion des feuilles d'élagage, et
- ❖ les biomasses et minéralo-masses du palmier à huile sous la gestion des feuilles d'élagage.

2- Analyse des caractéristiques des palmeraies villageoises du Bénin et de l'effet des modes de gestion des feuilles d'élagage sur le système "sol - plante".

Le diagnostic agro-pédologique et socio-économique réalisé par Aholoukpè et al. (2013 a) sur les palmeraies villageoises dans la région du sud-est du Bénin (2°30 - 2°45 E et 6°35 - 7°45 N), a permis d'établir une typologie des palmeraies selon les types de sols plantés, les superficies plantées, les précédents culturaux et les pratiques culturelles en cours dans les palmeraies. Cette première étape de la thèse, présentée dans le chapitre 3, a été à la fois exploratoire et analytique et a montré une prédominance de producteurs (93%) détenant de petites superficies plantées, à cause essentiellement de leurs faibles moyens financiers. Leurs plantations remplacent pour la plupart des champs de cultures vivrières. Ils sont qualifiés de "petits producteurs", et leurs conditions socio-économiques expliquent leur adoption de certaines pratiques culturelles à priori peu favorables à la culture du palmier à huile : l'absence de fertilisation minérale et l'exportation totale ou partielle des feuilles d'élagage qui devraient être recyclées pour profiter au sol et à la plante (Khalid et al., 1999). Ces pratiques posent des

questions sur le stock de matière organique du sol et l'état nutritionnel du sol et de la plante. Elles peuvent entraîner un déséquilibre entre les apports et les prélèvements d'éléments nutritifs (Ton et de Haan, 1995). De plus, même si la plupart des palmeraies villageoises ne remplacent pas des forêts, des interrogations se posent sur leur rôle environnemental (séquestration de carbone, mitigation des gaz à effet de serre).

Le diagnostic a montré l'existence de plusieurs types de palmeraies ; ce qui confirme l'hypothèse H1 de notre étude. Cette typologie des palmeraies villageoises a donné la possibilité, ainsi que le propose Mbetid-Bessane et al., (2002), de constituer des groupes de palmeraies appartenant à différentes classes d'âges et caractérisées par différents modes de gestion des feuilles d'élitage. Cela a permis d'étudier les effets des pratiques de gestion des feuilles d'élitage sur le sol et la plante.

Dans la chronoséquence choisie, les palmeraies ont des caractéristiques similaires (type de sol, précédent cultural et techniques culturales en cours de plantation) et ne sont opposées que par le mode de gestion des feuilles d'élitage : restitution totale en andain (RT) et restitution nulle des feuilles (RN). L'étude de l'effet sur le sol et la plante de ces deux modes a permis de comparer deux situations extrêmes.

Sur le plan agronomique, l'analyse des résultats a montré des effets des modes de gestion des feuilles d'élitage sur les propriétés du sol, sur le développement du système racinaire et sur la biomasse du tronc du palmier. Un effet positif du recyclage des feuilles a été observé sur les paramètres du sol (chapitre 5.2 et 5.3), les paramètres de développement racinaire (chapitre 7) et la biomasse du tronc (chapitre 6.4). Mais la gestion des feuilles a très peu influencé la production de feuilles et de régimes, et l'état nutritionnel de la plante (chapitre 6.4).

Dans la chronoséquence de palmeraies villageoises étudiée, on a obtenu un effet significatif du mode RT sur le stock de la matière organique (stock MO) et la fertilité du sol (chapitre 4 et chapitre 5.2). Cet effet n'a été perceptible qu'à l'âge adulte des palmeraies (13-20 ans) où le recyclage a duré une dizaine d'années. Le stock de MO de 650 kg.m^{-2} en masse de terre équivalente a augmenté de 70% par rapport aux palmeraies de 7-12 ans où la restitution n'a duré que 4 ans, et par rapport aux palmeraies sans restitution de feuilles (RN). Cette augmentation observée dans les palmeraies adultes est comparable à celle de 50% trouvée par Djègui (1992) au Bénin sur une profondeur de 35 cm de sol. La différence entre ces deux résultats est due à la différence entre les profondeurs d'étude (0-50 cm dans notre cas). L'inexistence de différence entre le stock de MO des palmeraies RT et RN de 7-12 ans montre que le recyclage des feuilles pendant 4 ans n'a pas eu d'effet sur le stock de MO.

Frazão (2012) a fait les mêmes constats dans des palmeraies de 8 ans au Brésil, bien que dans ce cas, la restitution des feuilles n'avait duré que 2 ans. Ces résultats montrent que l'effet de la restitution des feuilles d'élitage sur la matière organique du sol est associé à la durée de la restitution, toute chose étant égale par ailleurs. Ce qui confirme l'hypothèse H2.a de l'étude.

L'effet de la restitution des feuilles sur le sol pourrait commencer avant la durée de 10 ans de restitution. Mais la difficulté de trouver en milieu villageois des palmeraies représentatives de tous les âges et des deux modes de gestion des feuilles étudiés a été une des limites dans cette étude qui n'a pas permis d'évaluer la durée minimale de restitution pouvant induire un effet significatif sur le sol.

Cette réflexion est analogue à celle menée par Metay (2005) qui n'avait pas trouvé de différence entre les stocks de carbone d'un système de culture sous couverture végétale (restitution de matière organique) pendant 5 ans et les stocks d'un système sous travail continu du sol au Brésil. L'auteur conclut que l'inexistence de différence significative serait due à la durée de 5 ans relativement courte.

Dans notre étude, le stock de matière organique dans le sol (MOS) dans les situations sans restitution des feuilles d'élitage n'a pas baissé avec le temps (chapitre 4 et chapitre 5.2). Le déficit de MOS créé par la non-restitution des feuilles d'élitage est vraisemblablement compensé par la décomposition d'un recru végétatif important (non quantifié dans cette étude) qui s'installe dans les palmeraies adultes. De même, ce déficit serait compensé par le turn-over des racines du recru végétatif et surtout par le turn-over racinaire des palmiers (Ng et al., 2003). En effet, le système racinaire du palmier à huile s'installe progressivement et devient très important à l'âge adulte : il passe de 3t.ha^{-1} à 55t.ha^{-1} (Jourdan et Rey, 1996). Les racines fines de la plante se renouvellent et contribuent au pool de matière organique du sol (Jourdan et al., 2008 ; Brunner et al., 2013). Ce turn-over racinaire est de 58% et 66% par an respectivement pour les racines fines d'une cocoteraie de 25 ans en Philippines et d'une palmeraie de 4 ans au Bénin (Jourdan et al., 2003). Selon Jourdan (com. Pers), ces chiffres sont certainement sous-évalués. Une évaluation du turn-over racinaire sous plantations adultes avec restitution totale des feuilles serait grandement utile au Bénin. Mais au-delà de cette hypothèse de compensation du déficit organique par le turn-over racinaire dans les palmeraies sans restitution des feuilles d'élitage, il serait plus intéressant de procéder à une analyse de cycle de vie (ACV) du système d'exploitation du palmier à huile. Cette ACV qui prendra en compte une combinaison de facteurs sur plusieurs années de plantation expliquerait mieux l'évolution temporelle du stock organique du sol en mode d'exportation des feuilles d'élitage.

L'amélioration de la teneur en matière organique du sol suite au recyclage des feuilles pendant 10 ans a intensifié l'activité microbienne (Chapitre 5.3). La présence importante de fractions organiques grossières en surface et riche en carbone (teneur FO > 200µm = 267 mgC.g⁻¹) explique cette forte activité microbienne qui a diminué avec la taille des fractions organiques et avec la profondeur du sol à cause du changement de nature de la matière organique du sol (Feller, 1979 ; Feller et Fritsch, 1991). Les fractions fines organo-minérales se sont enrichies en matière organique sous les andains par rapport aux interlignes. Cela renforce le complexe argilo-humique du sol qui est plus important sous andain que dans l'interligne, et permet une amélioration de la CEC en surface.

L'amélioration des paramètres de la fertilité du sol observée dans notre étude (chapitre 5.2) rejoint les résultats de plusieurs auteurs qui ont montré l'effet positif du recyclage de résidus organiques du palmier à huile ou d'essences forestières sur les propriétés du sol (Djègui et al., 1992 ; Khalid et al., 2000b ; Maquere et al., 2008 ; Frazão et al., 2013). Selon Khalid et al. (1999), le recyclage de la biomasse aérienne dans une palmeraie peut fournir un supplément nutritif important au sol, en particulier l'azote et le potassium, qui peuvent suppléer aux apports importants d'engrais minéraux nécessaires au maintien du potentiel de rendement maximum.

Dans notre étude, les paramètres du sol n'ont été significativement améliorés par le recyclage des feuilles que sur les 20 premiers centimètres du sol. On a trouvé un enrichissement du sol en azote (en moyenne 1,5gN.kg⁻¹) dû au recyclage des feuilles. Les teneurs de carbone organique ont été également améliorées et indiquent un sol riche (en moyenne 20gC.kg⁻¹) en matière organique. Elles ont impacté un bon développement des racines secondaires et fines (chapitre 7). Les apports de matière organique ont été évidemment très favorables aux racines fines dont la densité a triplé sous andain. Elles offrent des avantages d'alimentation hydrique et nutritionnelle des palmiers en mode RT par rapport à ceux en mode RN (Jourdan, 1995 ; Kansou, 2003 ; Imada et al., 2013 ; Wang et al., 2013). Le recyclage des feuilles offre également l'avantage de conserver l'humidité du sol sous les andains et permet donc aux palmiers de supporter les premiers mois de sécheresse au Bénin.

La restitution des feuilles en andain a engendré une augmentation du pH du sol de 0,5 unité (chapitre 5.2), similaire aux résultats trouvés par Nelson et al. (2011) dans les palmeraies villageoises en Papouasie Nouvelle Guinée. Cette augmentation du pH serait due à la libération des ions hydroxydes par les racines pour assurer l'équilibre "cation - anion" du cytoplasme racinaire suite à l'absorption des nitrates (Hinsinger et al., 2003). L'activité microbienne importante en surface sous les andains de feuilles a contribué à la nitrification de

l'azote organique. Les conditions chaudes et humides du sol sous andain, et le pH initial du sol d'environ 5,5 (Djègui, 1992 ; Gagnon, 2009) auraient stimulé l'activité des bactéries nitrifiantes (Tarre et al., 2001 ; Gagnon, 2009). La transformation de l'azote organique en nitrates dans le sol sous andain montre le rôle du recyclage des feuilles d'élagage dans le cycle de l'azote. Ce cycle est particulièrement important dans les agro-systèmes du fait de ses implications multiples tant du point de vue agronomique que du point de vue environnemental à court et long termes (Attard et al., 2011). Quel que soit le mode de gestion des feuilles d'élagage, le pH du sol est compris entre 5,5 et 6, soit un état acide du sol qui n'est pas préjudiciable au développement du palmier à huile (Paramanathan, 2003).

L'amélioration de la somme des cations échangeables par le recyclage des feuilles provient de l'augmentation des taux de Ca et Mg. Le sol est resté pauvre en potassium. Les valeurs en K trouvées dans notre étude sont faibles et parfois à la limite des possibilités de dosage. Cette pauvreté du sol en potassium est caractéristique des terres de barre (Djègui, 1992 ; Amadji et Aholoukpè, 2008).

L'effet positif induit par le recyclage des feuilles d'élagage sur le pH du sol ($> 5,5$), le carbone organique ($> 25 \text{ g.kg}^{-1}$), l'azote total ($> 2 \text{ g.kg}^{-1}$) les cations échangeables et la CEC n'a pas suffi à donner au sol de bonnes aptitudes pour la nutrition du palmier à huile (Goh et al., 1997 cités par Paramanathan, 2003). Cela a été constaté dans l'analyse des variables de production et de nutrition minérale des palmiers étudiés (chapitre 6.4). Le mode de gestion des feuilles n'a pas eu d'effet significatif sur la production annuelle de feuilles et de régimes. L'étude a montré que les performances des palmeraies villageoises en termes de production de régimes et de nutrition minérale sont généralement inférieures à des références connues. Ces états sont imputables aux pratiques culturelles caractéristiques des palmeraies villageoises du Bénin, et qui sont décrites dans le diagnostic réalisé au début de cette thèse. Les longues années de champ de toutes cultures vivrières qui ont précédé les plantations, les associations de cultures vivrières, notamment les racines et tubercules, dans les jeunes plantations et l'absence d'une fertilisation minérale dans ces palmeraies villageoises (Raffleau et al., 2010 ; Aholoukpè et al., 2013a) ont suffisamment appauvri le sol. Le recyclage des feuilles pendant 10 ans, et sur 10% de la superficie des palmeraies, n'a pas suffi à compenser la déficience nutritionnelle créée dans la plante pour les deux éléments minéraux principaux N et K. Mais il permet certainement aux palmiers de traverser les saisons sèches sans trop de dégâts.

Sur le plan environnemental, cette étude tient compte des considérations mondiales de l'effet des agro-systèmes sur les déterminants du changement climatique. Dans notre contexte, il s'agit principalement du stockage du carbone et de l'évitement de sa perte par des émissions de CO₂. Nous avons montré le rôle de "puits de carbone" des palmeraies villageoises. Elles stockent sur pied dans le tronc, dans les feuilles et dans les racines, au sol par la litière des andains et dans le sol par la décomposition de ces andains. Le rôle de "puits de carbone" par la biomasse végétative sur pied (tronc, feuille et racine) se justifie par : i) les estimations faites dans notre étude pour la biomasse du tronc (chapitre 6.4) qui ont donné une biomasse moyenne de 200 kg/palmier dans les palmeraies adultes (17 ans) ; ii) la biomasse totale des feuilles du palmier sur pied peut s'estimer à partir des équations établies par Aholoukpè et al. (2013b). En considérant un gain de poids équitable de 230 g du rang -4 au rang 10 des feuilles (Flori, 2013 ; communication personnelle), un poids moyen constant de 3,5 kg au-delà de ce rang et un nombre moyen de 35 feuilles fonctionnelles sur le palmier (résultat non publié de notre enquête), on estime la biomasse des feuilles du palmier sur pied à 112 kg ; iii) la biomasse des racines du palmier adulte s'estime à plus de 300 kg/palmier (Jourdan et Rey, 1996 ; Ng et al., 2003). La biomasse totale végétative (feuilles, tronc et racines) du palmier sur pied s'estime donc à 612 kg ; soit 88 tonnes de biomasse sur un hectare de 143 palmiers, équivalent à environ 44 t.C.ha⁻¹.

Le stockage de carbone par les andains a été montré à travers les 22 MgC.ha⁻¹ et 38 MgC.ha⁻¹ qu'ils accumulent au sol en 4 ans et 10 ans de restitution (chapitre 4). Ces valeurs sont supérieures au stock de 2,35 tC.ha⁻¹ sous la végétation naturelle de savane de Karité et Néré du Nord-Bénin (Saïdou et al., 2012). Barthès et al. (2006) ont estimé à 40 tC.ha⁻¹ le stock de carbone dans la biomasse de mucuna recyclable en 10 ans au sol dans l'association maïs - mucuna sur terre de barre du sud-Bénin. Les stocks de carbone dans le sol sous les andains (occupant 10% de la superficie d'une palmeraie) s'ajoutent aux stocks de sol des interlignes pour donner un stock total de carbone de 38 MgC.ha⁻¹ sur 0-50 cm de sol dans une palmeraie adulte après 10 ans de restitution des feuilles (chapitre 5.2).

Le recyclage des feuilles a induit une forte activité microbienne accompagnée d'un dégagement du carbone sous forme de CO₂. Mais cette activité microbienne, bien qu'elle soit élevée en surface dans le cas de la restitution totale par rapport à la restitution nulle, n'a pas entraîné une forte minéralisation de la matière organique du sol sous andain car les ratios C/N sont élevés (ils sont en moyenne de 15) dans les 20 premiers centimètres (chapitre 5.3). Cela provient de l'accumulation annuelle des feuilles sur les anciens tas. Les conditions d'aération

sont réduites et ralentissent la minéralisation, malgré l'humidité relative importante sous ces andains (Djègui, 1992). Dans ces conditions le recyclage des feuilles dans les palmeraies villageoises constitue plus une pratique de "puits" que de "source" de carbone (Arrouays, 2002).

Ces performances des palmeraies villageoises en tant que "puits de carbone" sont largement supérieures à celles d'autres systèmes agricoles et agro-forestiers d'utilisation des terres et de changement d'affectation des terres forestières. Mais elles restent inférieures à celles des systèmes forestiers (Jaffré, 1983 ; Ngo et al., 2013 ; Lardy et al., 2002).

La pratique d'exportation totale des feuilles (restitution nulle) s'oppose à la restitution totale en termes d'amélioration de la fertilité du sol, même si ce n'est que sur les 20 premiers centimètres de sol. Mais d'un point de vue plus global, l'exportation des feuilles constitue un changement d'utilisation des feuilles qui n'engendre pas nécessairement une augmentation des émissions de CO₂. En effet, les feuilles sont utilisées principalement comme bois de feu pour la transformation des produits de récolte (Aholoukpè et al., 2013a). Et aussi comme matériaux de construction et d'autres usages domestiques (Dissou, 1988). C'est donc une pratique d'évitement d'émission du carbone par la réduction d'utilisation du carbone fossile (pétrole) ou du carbone forestier (Feller et al., 2004).

La discussion des résultats montre que toutes les hypothèses de recherche ont été entièrement vérifiées sauf l'hypothèse H2b qui a été confirmée partiellement puisque l'exportation totale des feuilles d'élitage n'a pas induit une variabilité temporelle de la matière organique du sol.

La stratégie de recherche adoptée pour l'atteinte des objectifs de cette thèse a utilisé à chaque niveau diverses méthodes existantes ou élaborées (mises au point d'équations allométriques dans les chapitres 6.2 et 6.3). Cette stratégie en pyramide renversée a permis à travers l'étude exploratoire d'aboutir à des conclusions qui ont déterminé le choix des palmeraies pour les études approfondies sur le système sol-plante.

Le caractère d'étude en "milieu paysan" a posé la contrainte du choix de palmeraies réparties de façon déséquilibrée dans la chronoséquence étudiée dans le chapitre 4. De plus, la durée de trois ans de cette étude a imposé le choix d'une chronoséquence virtuelle dont les informations sur l'âge des palmeraies, sur les pratiques culturales et sur la gestion des feuilles d'élitage sont limitées à celles fournies par les paysans. Dans ce contexte, la possibilité qu'il existe dans la chronoséquence des parcelles recevant une fertilisation minérale irrégulière (notamment les palmeraies des grands producteurs) n'est pas à écarter. Mais une telle situation est assimilable

à l'absence de fertilisation des palmiers puisque les résultats de minéralo-masses n'ont pas montré de fortes différences pouvant être attribuées aux apports d'engrais minéraux.

L'utilisation de la méthode de la spectroscopie proche infra rouge (SPIR) pour les études de sol (chapitres 4 et 5.2) a offert de grands avantages reconnus par plusieurs auteurs. Rapide et moins chère (Brunet et al., 2007 ; Barthès et al., 2006, 2008 ; Guerrero et al., 2010), la méthode de la SPIR a facilité la prise en compte d'un nombre important d'échantillons de sol analysés pour les études de stocks de matière organique et de la variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques du sol. Ceci a donné la garantie d'un échantillonnage de sol bien représentatif des situations étudiées, qui a permis des analyses statistiques fiables. L'application de la méthode de SPIR est basée sur l'utilisation à la fois des spectres émis par les échantillons du sol et des données de référence des paramètres à déterminer pour l'étalonnage et la validation de modèles de prédiction. Les estimateurs des modèles utilisés pour la prédiction des paramètres du sol sont présentés en annexe 2. Ils montrent une très bonne prédiction du carbone et de l'azote organiques du sol, une bonne prédiction des teneurs en cations échangeables et du taux d'argile, une assez bonne prédiction du pH et une mauvaise prédiction du taux de sable dont le RPD est toutefois égal à 2,8. Ces résultats confortent l'utilisation de la SPIR pour les études de sol. Mais la difficulté de cette méthode se trouve dans le choix du meilleur modèle de prédiction. Il faut en effet tester plusieurs prétraitements afin de choisir le modèle dont les estimateurs sont les meilleurs pour un paramètre donné. Les modèles peuvent donc varier d'un paramètre à un autre.

Les équations allométriques mises au point (chapitre 6.2 et 6.3) ont répondu à un besoin existant pour l'estimation de la biomasse des feuilles et du tronc du palmier dans les écologies du Bénin. Le choix des palmiers observés ayant été calé sur le programme d'abattage du service d'amélioration des plantes du CRAPP, il n'a pas été possible d'éviter un déséquilibre lié à l'âge des arbres et aux origines génétiques. L'étude a donc conclu que les équations allométriques peuvent être testées dans d'autres écologies et sur une population de palmiers assez diversifiée suivant les âges et origines génétiques. Le choix de 9 arbres par parcelle pour l'application de ces équations augmente la précision des observations par rapport aux études de Jaffré (1983) et de Henson et al. (2003) qui ont porté respectivement sur un et trois palmiers moyens.

3- Analyse de la durabilité du système des palmeraies villageoises du Bénin

L'expansion des palmeraies villageoises au Bénin montre leur contribution à l'économie d'une importante population de petits producteurs. Le rôle environnemental de ces palmeraies et leurs caractéristiques agro-pédologiques interrogent sur des actions de durabilité du système de production. En effet, sur le plan environnemental, les palmeraies villageoises ont de bonnes performances en termes de "puits de carbone" et constituent dans le contexte actuel de changement climatique un bon système de culture des terres agricoles. Par contre, sur le plan agronomique les performances des palmeraies villageoises ne donnent pas la garantie d'une production durable.

La restitution des feuilles n'a pas eu d'effets suffisamment importants sur le sol pour compenser les déficiences nutritionnelles des arbres. On explique ce résultat par les faibles productions de régimes et de minéralo-masses obtenues. Les antécédents cultureux composés pour la plupart de champs de cultures vivrières sur plusieurs années et les pratiques culturelles dans les jeunes palmeraies (associations de cultures vivrières, l'absence de fertilisation, l'exportation totale des feuilles) expliquent les importantes exportations d'éléments minéraux justifiant cette déficience.

L'absence de la fertilisation azotée et potassique crée le risque d'une trajectoire accentuée de déficience de ces éléments du moment où les régimes en exportent beaucoup. Le potassium est surtout exporté à travers les rafles à plus de $30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Cette exportation sur plusieurs années sans une compensation adéquate expose le système de culture à une baisse continue de la production de régimes et de la production végétative aérienne. Mais la compensation des éléments minéraux ne peut se faire par les engrais minéraux seuls. Car Djègui (1992) avait montré dans les palmeraies du Bénin que les sols très appauvris n'arrivaient pas à fournir l'azote nécessaire à la plante. L'auteur conclut que la correction de la déficience est très difficile par les engrais. Caliman et al. (1994) suggèrent dans ces conditions d'autres voies de correction comme l'introduction de légumineuses arbustives en association avec les palmiers ou dans les jachères précédant les plantations. Dans notre étude, le recyclage pendant 10 ans des feuilles d'élague n'a pas induit de grands effets sur le sol pour compenser les déficiences nutritionnelles des arbres. Au-delà de cette pratique, Goh et Hardter (2003) recommandent le recyclage des rafles et des effluents d'usinage dans les palmeraies pour compenser la baisse des nutriments du sol, notamment le potassium.

Si l'effet du recyclage des feuilles est jugé de peu d'importance, l'exportation des feuilles comme combustible, même si elle permet de ménager les énergies fossiles et les réserves forestières, relève d'un processus additif aggravant qui ne peut que contribuer à la détérioration du potentiel de production de régimes des palmeraies. L'effet significatif mesuré sur la biomasse des troncs pourrait être un témoin de cette dynamique.

Ainsi, le diagnostic des palmeraies villageoises qui ressort de notre étude, laisse peu de place à de meilleures performances sur le long terme si les pratiques actuelles ne sont pas améliorées. La durabilité de ce système de culture devrait donc s'appuyer sur des pratiques villageoises déterminantes d'amélioration des facteurs agro-pédologiques afin d'assurer un bon développement et une meilleure production des arbres.

4- Conclusion générale et perspectives

Cette étude constitue un premier travail d'état des lieux des palmeraies villageoises du Bénin. Elle apporte des réponses à des questions de caractérisation typologique, agro-pédologique et environnementale de ces palmeraies, dans le contexte de gestion des feuilles d'élitage. La stratégie mise en œuvre dans le département du Plateau pour tester nos hypothèses de recherche a permis d'aboutir à un ensemble de conclusions principales et de perspectives.

Du diagnostic de typologie des palmeraies villageoises du département, il ressort qu'elles sont majoritairement plantées sur les terres de barre et peuvent être regroupées en quatre classes d'âges suivant leur stade végétatif : les jeunes palmeraies (0 - 6 ans), les palmeraies pré-adultes (7 - 12 ans), les palmeraies adultes (13 - 24 ans) et les vieilles palmeraies (≥ 25 ans). Elles appartiennent majoritairement à des petits producteurs qui représentent 93% des planteurs se trouvant sur les terres de barre. Les caractéristiques des palmeraies villageoises sont donc définies par les pratiques des petits producteurs. Ces derniers ont de faibles moyens financiers qui les contraignent à planter des superficies comprises entre 0,5 et 10 ha, qui ne bénéficient presque pas d'une fertilisation minérale. A l'opposé de ces petites exploitations, il existe dans le département, de grandes plantations de superficie ≥ 30 ha qui appartiennent aux grands producteurs minoritaires. Ces derniers ont des moyens financiers qui les distinguent des petits producteurs, mais ils n'appliquent pas toujours les bonnes pratiques de gestion des palmeraies.

De façon générale, les palmeraies villageoises ont des caractéristiques communes qui sont : i) la densité de plantation de 143 plants/ha ; ii) l'association quasi systématique des jeunes palmiers avec des cultures vivrières très variées, comportant très souvent les racines et tubercules ; iii) les précédents culturels constitués pour la plupart de champs de cultures vivrières et une fertilisation minérale mal ou peu respectée. Les pratiques de restitution des sous-produits de transformation, limités à quelques grands producteurs et les modes de gestion des feuilles d'élitage, distinguent les palmeraies villageoises. La gestion des feuilles d'élitage commence à 7 ans d'âge des palmeraies et va d'une restitution quasi-totale en andain à une restitution nulle de ces feuilles au sol.

Dans le contexte de gestion des feuilles d'élitage, le diagnostic chronoséquentiel des caractéristiques agro-pédologiques des palmeraies a montré un effet significatif du recyclage des feuilles sur le sol et la plante dans les palmeraies adultes. Soit après 10 ans de restitution totale des feuilles. Les stocks de carbone et d'azote organiques sur 0-50 cm de sol sous les andains de feuilles des palmeraies adultes sont respectivement de 60 MgC.ha⁻¹ et

4,5 MgN.ha⁻¹. Ils correspondent à une augmentation de 70% et de 50% des stocks de carbone et d'azote par rapport aux palmeraies de 7-12 ans où la restitution n'a duré que 4 ans, et par rapport aux palmeraies sans restitution de feuilles (RN). Le recyclage des feuilles pendant 4 ans n'a pas induit un effet significatif sur le système sol- plante par rapport à la restitution nulle des feuilles.

De manière assez inattendue, la restitution nulle n'a pas baissé le stock de carbone du sol au cours du temps ; cela est probablement dû à la compensation de la perte de matière organique dans les palmeraies adultes RN par le recru végétatif et le turn-over racinaire important.

Avec le recyclage des feuilles pendant 10 ans, on observe une amélioration des paramètres de fertilité du sol sous les andains sur les 20 premiers centimètres de profondeur. Le sol s'est enrichi en carbone et en azote. Les teneurs moyennes sont de 20 gC.kg⁻¹ et 1,5 gN.kg⁻¹. L'enrichissement du sol en matière organique a augmenté la biomasse microbienne et intensifié l'activité microbienne. Ceci a modifié la qualité des fractions organiques du sol en augmentant les fractions organo-minérales fines, et indiquant ainsi une certaine stabilisation de la matière organique du sol sous andain.

Le pH du sol sur les 20 premiers centimètres sous les andains a augmenté en moyenne de 0,5 unité et le sol est passé de l'état acide à légèrement acide. La somme des cations et la capacité d'échange cationique ont atteint des valeurs 2 fois plus importantes sous les andains : de 3,5 meq.100g⁻¹sol en mode restitution nulle à 7 meq.100g⁻¹sol en mode restitution totale.

Les effets positifs du recyclage des feuilles sur la fertilité du sol ont induit sur la même profondeur de 0-20 cm, une amélioration des paramètres (densité, longueur et surface) de développement des racines secondaires (R2) et des racines fines (RF) du palmier. Les racines fines ont été évidemment les plus sensibles au recyclage des feuilles. Leur densité, a triplé par rapport au mode de restitution nulle ; et leur longueur spécifique a baissé, confirmant l'enrichissement du milieu sous andain. Le recyclage des feuilles a par ailleurs entraîné la constitution d'une couche de litière au-dessus du sol sous andain, où s'est développé un amas important de racines fines et secondaires de densité de 2 kg.m⁻³ et 0,13 kg.m⁻³. Ce développement racinaire dû au recyclage des feuilles devrait profiter à une bonne alimentation hydrique et nutritionnelle des palmiers.

L'amélioration de la fertilité du sol sur les 20 premiers centimètres du sol sous andain n'a pas amélioré les performances de production et l'état nutritionnel des palmiers. Les productions de biomasse de feuilles et de régimes et de minéralo-masses des palmeraies sont restées faibles

par rapport au potentiel reconnu pour les palmeraies. Aucun effet significatif de la gestion des feuilles n'a été obtenu sur la production de biomasse de feuilles et de régimes. Seule la biomasse du tronc a augmenté significativement sous le mode de restitution totale des feuilles. Cette augmentation est due à un cumul progressif de biomasse jusqu'au moment de nos observations. Les palmeraies villageoises étudiées ont généralement de faibles performances de production et sont déficientes en éléments minéraux. Les productions de régimes (6 t.ha^{-1} dans les palmeraies adultes), et les teneurs des principaux éléments minéraux N ($< 2\%$), et K ($< 0,5\%$) sont en-deçà du potentiel des palmeraies. Les apports d'éléments minéraux dus au recyclage des feuilles pendant une dizaine d'années n'ont pas suffi à compenser les déficiences de la plante. Cette situation provient de l'absence de fertilisation des palmeraies villageoises pendant de longues années. Elle est également due à l'exploitation des terres par les cultures vivrières sur de longues périodes ayant précédé les palmeraies et aux associations des jeunes palmiers avec de toutes les cultures vivrières, y compris les tubercules.

Malgré ces caractéristiques agro-pédologiques insuffisantes pour une meilleure performance de production des palmeraies villageoises, l'étude a montré la contribution importante de la restitution des feuilles en andains au stockage (ou à la sequestration) de carbone et ce faisant, à la réduction des gaz à effets de serre, et notamment le CO_2 par stockage du carbone dans la biomasse végétative sur pied, dans les andains au sol et dans le sol sous andain. Les palmeraies villageoises jouent un rôle de "puits de carbone" par rapport à d'autres agro-systèmes. D'un point de vue analytique plus globalisant, la restitution nulle des feuilles d'élagage représente une pratique d'évitement d'émission du carbone forestier et du carbone fossile du pétrole.

En perspective à cette étude, des suggestions peuvent être faites pour corriger les limites de la démarche suivie et proposer des actions pour une durabilité des systèmes de palmeraies villageoises.

- La constitution de chronoséquences réelles de palmeraies villageoises permettrait une vérification dans le temps de certaines conclusions de cette thèse.
- Le stock de carbone des andains de feuilles pourrait mieux s'estimer par utilisation d'une meilleure méthode d'estimation de la matière sèche des andains. A cet effet, de grandes enceintes de séchage pouvant contenir des échantillons assez importants et représentatifs de tout l'andain pourront être utilisées.

- Les études biologiques et microbiologiques du sol pourront être approfondies, notamment in situ pour mieux expliquer les processus de décomposition et minéralisation de la matière organique du sol des palmeraies.
- Le suivi de la décomposition des feuilles en andain apporterait des réponses à la vitesse de décomposition des feuilles du palmier à huile dans le contexte climatique du Bénin.
- Il serait intéressant de renforcer les relations entre les compartiments sol et plante par un modèle beaucoup plus mécaniste que le simple modèle statistique utilisé dans ce travail. Ceci, en vue d'approfondir la compréhension de certains processus.
- Au vu du fait que l'exportation des feuilles d'égavage n'a pas baissé le stock de carbone dans le temps, il serait intéressant d'estimer le turn-over racinaire au jeune âge et à l'âge adulte des palmeraies villageoises. Cela permettrait d'estimer le stock de carbone de la litière racinaire des palmiers.
- Pour la durabilité du système de production des palmeraies villageoises, il importe :
 - de s'interroger sur le rôle de facteur limitant que jouent l'azote et le potassium dans la productivité des palmeraies, à travers des essais soustractifs de nutrition azotée et potassique au jeune âge et à l'âge adulte de la plante ;
 - de tester des pratiques agricoles incluant une fertilisation minimale en N et K au jeune âge puis en K dans la phase productive des palmeraies, associées à un recyclage des feuilles et des rafles (riches en potassium) ;
 - de sensibiliser les producteurs sur la restitution des feuilles, mais aussi des rafles sur plusieurs cycles de plantation ;
 - d'encourager l'association des cultures vivrières fertilisantes dans les jeunes palmeraies ;
 - de tester et promouvoir des dispositifs d'agroforesterie de palmier à huile et de légumineuses arbustives pour une durabilité et une rentabilité du système de production.

Références bibliographiques

- Achiba W.B., Nouredine Gabteni, Abdelbasset Lakhdar, Gijs Du Laing, Marc Verloo, Naceur Jedidi, Tahar Gallali. 2009. Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **130** : 156–163.
- Adjadi E. 2008. Le développement du palmier à huile sélectionné au Bénin. Rapport d'étude. CRAPP/Pobè, p. 9.
- Adjadi E. 2012. Le développement du palmier à huile sélectionné au Bénin. Rapport d'étude. Actualisation des superficies plantées. CRAPP/Pobè, p. 9.
- Adjahossou, D. F. 1983. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Thèse de doctorat d'Etat. Paris VII, Paris. 203 p.
- Adjé AI, Adjadi E. 2001. Diffusion du matériel végétal amélioré palmier à huile en milieu villageois : l'expérience du Bénin. *Oléagineux Corps Gras et Lipides*, **8** (5) : 529-533.
- Adjé A. I. 2004. Contribution à l'analyse du micro - climat, de fertilité des sols et de la productivité des systèmes de culture à base du palmier à huile : Cas des sites expérimentaux de Pobè et d'Obèkè-Ouèrè au Sud – Bénin. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université de Cocody, Abidjan, 152 p + annexes.
- Administrator. 2009. Rôles de la matière organique des sols. Internet. <http://www.aggra.org/aggravox/45-environnement/56-matiereorganique.html>, consulté en mai 2013.
- Agossou V. 1983. Les sols béninois et leurs potentialités agricoles. Document de colloque: Premières journées de la science et de la technologie, Cotonou, 10 – 16 octobre 1983. PNUD/FAO, p. 10.
- Aholoukpè H. 2009. Variabilité spatiale du sol et de sa matière organique : étude préalable à une agriculture biologique. Cas du domaine expérimental de Melgeuil/Mauguio à Montpellier. Mémoire de Master 2 ; Université de Montpellier 2/France. 24 pages.
- Aho N., Kossou D. K. 1997. Précis d'Agriculture Tropicale. *Les Editions Flamboyant*, 464p.
- Aholoukpè H. 2011. Diagnostic exploratoire des palmeraies du Bénin en contexte d'exportation des feuilles du palmier à huile : cas du département du plateau. Rapport d'étude. 17p.

- Aholoukpè H., Vissoh V. P., Amadji G., Deleporte P., Dubos B., Nodichao L., Glèlè Kakaï R., Chotte J.L., Blavet D. 2013a. Typologie des plantations villageoises de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans le département du Plateau au Bénin. Accepté dans *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **7** (3) : 978-999.
- Aholoukpè H., Dubos B., Flori A., Deleporte P., Amadji G., Chotte J.L., Blavet D. 2013b. Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass. *Forest Ecology and Management*, **292** : 122–129.
- Ahoyo N.R. 2008. Potentialités des filières Anacarde et Palmier à huile au Bénin. Rapport d'étude, SNV-Bénin. p. 81.
- Amadji G.L., Aholoukpè H.N.S. 2008. Impact du niébé (*Vigna unguiculata*) et de la fumure minérale sur les propriétés chimiques de la terre de barre du Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, **15** (3) : 147-160.
- Ambroise B. 1990. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale du cycle hydrique dans le petit bassin du Ringelbach : Hydrology in Mountainous Regions. Hydrological Measurements; the Water Cycle (Woceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 193.
- d'Annunzio R. 2008. Etude de la dynamique de la matière organique sous plantation clonale d'Eucalyptus au Congo. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur de l'ENGREF/AgroParisTech Spécialité : Sciences Forestières. 221p.
- d'Annunzio R. Conche S., Damien LandaisD., Saint-Andre L., Richard Joffre R., Barthès G.B. 2008. Pairwise comparison of soil organic particle-size distributions in native savannas and Eucalyptus plantations in Congo. *Forest Ecology and Management*, **255**:1050–1056.
- Arbelot B, Foucher H, Dayon JF, Missohou A. 1997. Typologie des aviculteurs dans la zone du Cap-Vert au Sénégal. *Élev. Méd. vét. Pays trop*, **50** (1) : 75-83.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise Scientifique Collective. Synthèse du rapport. INRA, 32p.

- Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M., Cerri C. 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Étude et Gestion des Sols*, **10** (4) : 347-355.
- Attard E., Le Roux X., Laurent F., Chabbi A., Nicolardot B., Recous S. 2011. Impacts des changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote. *Etude et Gestion des Sols*, **18** (3) : 147-159.
- Audebert A., Blavet D. 1992. Sols, états de surface et rendements du cotonnier en station expérimentale (Togo central). *Cahiers ORSTOM. Série Pédologi.*, **27** (2) : 153-166.)
- Azontondé H. A. 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of the Niamey Work Shop. February 1991. *IA HS Publ.* **199** : 253-256.
- Banerjee. B., Aggarwal P. K., Pathak H., Singh A. K., Chaudhary A. 2006. Dynamics of organic carbon and microbial biomass in alluvial soil with tillage and amendments in rice-wheat systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, **119** : 173–189.
- Barcelos E. 1998. Etude de la diversité génétique du genre *Elaeis* (*E. oleifera* Kunth. Cortès et *E. guineensis* Jacq.) par marqueur moléculaires (RFLP et AFLP). Thèse de doctorat. Ecole doctorale : Biologie des systèmes intégrés, Agronomie, Environnement. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier., Montpellier. 137 p.
- Barthes B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Lesaint S., Oliver R., Feller C. 2004. Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, **20** : 231-239.
- Barthès B. G., Brunet D., Ferrer H., Chotte J-L., Feller C. 2006. Determination of total carbon and nitrogen content in a range of tropical soils using near infrared spectroscopy: influence of replication and sample grinding and drying. *J. Near Infrared Spectrosc.* **14** : 341–348.
- Barthès B., Azontondé A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R., Feller C. 2006. Effect of a legume cover crop on carbon storage and erosion in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. In : Roose E.J., Lal R., Feller C., Barthès B.,

- Stewart B.A. (éds.), *Soil Erosion and Carbon Dynamics*, *Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Floride, pp. 143-155.
- de Berchoux Ch., Jacquemard J.C., Kouamé M.B., Lecoustre R. 1986. Morphologie de la croissance et du développement des différents organes du palmier à huile en plantation. In: Institut de Recherches sur les Huiles et Oléagineux (IRHO) (Ed.), *Station Principale de LA ME, Bengerville. Croissance et Développement du Palmier. Chap III*, pp. 226-366.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., Volkoff B., Jolivé C. 1998. Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties. *Soil Sci. soc. Am. J.* **62** : 743-749.
- Bernoux M., Chenu C., Blanchart E., Eglin T., Bispo A., Bardy M., King D. 2011. Le programme GESSOL 2 : Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. *Etude et Gestion des Sols*, **18** (3) : 137 - 145.
- Bertolino A.V.F.A., Fernandes N.F., Miranda J.P.L., Souza A.P., Lopes M.R.S., Palmieri F. 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Journal of Hydrology*, **393** (1-2) : 94-104.
- Blanchart E. 2009. Diversité de la faune du sol. Support de cours du module : Ecologie des sols et des sédiments. Master 2 "Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels et Cultivés (FENEC)" de l'Université de Montpellier II/France. 67 diapositives.
- Bolin B, Sukumar R. 2000. Global perspective. *Land use change and forestry*, 23 – 51.
- Bolte A., Villanueva I. 2006. Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Eur J Forest Res*, 125: 15–26.
- Boivin P., Schäffer B., Sturny W. 2009. Quantifying the relationship between soil organic carbon and soil physical properties using shrinkage modelling. *European Journal of Soil Science*, 60, 265–275.
- van Breugel M., Ransijn J., Craven D., Bongers F., Hall J. S. 2011. Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*. **262** : 1648–1657.
- Brookes, P.C., Powlson D.S., Jenkinson D.S. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus, *Soil Biol. Biochem.* **14** : 319-329.

- Brunet D., Barthès B., Chotte J-L., Feller C. 2007. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. *Geoder-09612*; 12 p.
- Brunner I., Bakker M. R., Björk R. G., Hirano Y., Lukac M., Aranda X., Børja I., Eldhuset T. D., Helmisaari H. S., Jourdan C., Konôpka B., López B. C., Miguel Pérez C., Persson H., Ostonen I. 2013. Fine-root turnover rates of European forests revisited : an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant Soil*, **362** : 357–372.
- Caliman J.P., Daniel C., Tailliez B. 1994. La nutrition minérale du palmier à huile. *Plantation Recherche et Développement*, 36-53.
- Carrère R. 2010. Le palmier à huile en Afrique : le passé, le présent et le futur Mouvement Mondial pour les Forêts Tropicales. Collection du WRM sur les Plantations, **15** : 70p.
- Carlson K.M., Curran L.M., Gregory A.P., Pittman McDonald A., Trigg S.N., Adeney M.J. 2012. Carbon emissions from forest conversion by Kalimantan oil palm plantations. Letters. Advance online publication/www.nature.com/natureclimatechange. 5 p.
- CBD. 2001. Convention sur la Biodiversité. Deuxième rapport annuel. Bénin. Ministère de l'Environnement et de l'Urbanisme, p. 93.
- CENATEL. 2009. Centre National de Télédétection. Projet d'Appui au Développement Rural de l'Ouémé-Plateau (PADRO). Carte d'occupation du sol de l'Ouémé-Plateau à 1/200000 : feuille 1, 2 et 3.
- Chabbi A., Chaplot V., Nunan N., Rumpel C., Moni C., Bardoux G., Charrier X., Terrasson J.P., Arrouays D., Lemaire G., Mariotti A. 2003 : Caractérisation de la variabilité spatiale du sol : base pour une sélection des traitements expérimentaux de l'orepcbb, site de Lusignan. INRA.
- Chaléard J.L. 2002. La place des cultures vivrières dans les systèmes de production en agriculture de plantation : le cas du département d'Agboville (Côte d'Ivoire). *Cah. Sci. Hum.*, **24** (1) : 35-49.
- Chopart J. L., Azevedo M. C. B., Le Me'zo L., Marion D. 2010. Functional Relationship Between Sugarcane Root Biomass and Length for Cropping System Applications. *Sugar Tech*, **12** (3–4) : 317–321.

- Chotte J-L. 2009. Sol (singulier) ou Sols (pluriel). Support de cours du module : Ecologie du sol et des sédiments. Master 2 Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels et Cultivés (FENEC) de l'Université de Montpellier II/France. 40 diapositives.
- Clément M.F. 2011. La matière organique du sol : essentielle, tous en conviennent, mais qui en fait le bilan ? Communication personnelle à la conférence MAPAQ Outaouais, 10 février 2011. 10p
- Cochard B., Amblard P., Tristan Durand-Gasselin. 2005. Oil palm genetic improvement and sustainable development. *OCL VOL.* **12** (2) : 141-145.
- Coe M. T., Latrubesse E. M., Ferreira M. E., Amsler M. L. 2011. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* **105** : 119–131.
- Comas L.H., Eissenstat D.M. 2009. Patterns in root trait variation among 25 co-existing North American forest species. *New Phytologist*, **182** : 919–928.
- Corley R. H. V., Hardon J. J., Wood B. J (eds). 1976. Developments in crop science 1. Oil palm research. Elsevier Scientific Publishing Company. 532 p.
- Corley R. H. V., Hardon J. J., Tan G. Y. 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*. **20** : 307-315.
- Corley R. H. V., Tinker P.B. 2003. The Oil Palm (Fourth edn). Wiley-Blackwell, World Agriculture. 592 p.
- Cornaire B., Daniel C., Zuily-Fodil Y., Lamade E. 1994. Le comportement du palmier à huile sous stress hydrique. Données du problème, premiers résultats et voies de recherche. *Oléagineux*, **49** : 1-12.
- Craswell E. T. and Lefroy R. D. B. 2001. The rôle and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **61** : 7-18.
- Dagnelie P. 1998. Statistique théorique et appliquée : Tome 1. Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique. Bruxelles, De Boeck, p. 511.
- Dassou O. S. 2011. Impact du choix de la méthode d'échantillonnage racinaire dans la détermination des paramètres de développement racinaire chez le palmier à huile

- (*Elaeis guineensis* Jacq.) au Bénin. Mémoire d'Ing. Agro. FSA. Université d'Abomey-Calavi, Bénin. 77 p.
- Deans J. D., Diagne O., Lindley D. K., Dione M., Parkinson JA. 1999. Nutrient and organic-matter accumulation in *Acacia senegal* fallow over 18 years. *Forest Ecology and Management*, **124** : 153 – 167.
- Diels J., Vanlauwe B., Van der Meersch M.K. , Sanginga N., Merckx R. 2004. Long-term soil organic carbon dynamics in a subhumid tropical climate: ^{13}C data in mixed C3/C4 cropping and modeling with RothC. *Soil Biology & Biochemistry* **36** : 1739–1750.
- Dissou M. 1988. Economie de la culture du palmier à huile au Bénin et en Côte d'Ivoire. Approche comparative des politiques agricoles en Afrique. Les Nouvelles Editions Africaines. 210 p.
- Djegui N. 1992. Matière organique et azote dans les sols cultivés sur terres de barre (Bénin). Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (ENSAT), France, p. 208.
- Djegui N., de Boissezon P., Gavinelli E. 1992. Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures. Cah. Orstom, sér. Pédol., **17** (1) : 5-22.
- Djegui N. 1995. Les stocks organiques dans les sols cultivés sous palmeraie et cultures vivrières dans le sud du Bénin. Actes de séminaires: Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. CIRAD, 189 - 193.
- Djegui N, Daniel C. 1996. Le développement du palmier à huile au Bénin : une approche spécifique. *Oléagineux Corps Gras et Lipides*, **3** (2) :125–130.
- Djomo A.N. Ibrahima A., Saborowski J., Gravenhorst G. 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, **260** : 1873–1885.
- de Dorlodot S., Forster B., Pagès L., Price A., Tuberosa R., Draye X. 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science*, **12** (10) : 474-481.

- Drapier J. 1983. Les difficultés de régénération des sapinières vosgiennes. Importance de l'humus et rôle de l'allélopathie. Thes.Doct.3ème cycle. Sciences forestières. Univ. Nancy.109p.
- Dubos B., Alarcon H.W., Lopez J.E., Ollivier J. 2011. Potassium uptake and storage in oil palm organs: the role of chlorine and the influence of soil characteristics in the Magdalena valley, Colombia. *Nutr Cycl Agroecosyst*, **89** : 219–227.
- Dufumier M., Labrousse R., Losch B. 1997. Les plantations des zones tropicales humides : caractéristiques et perspectives. *Plantation Recherche Développement*, **4**(2):81 - 90
- Dufrene E. 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis Guineensis Jacq*). Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-Sud, Orsay. 156p.
- Dufrene E., Ochs R., Saugier B. 1990. Photosynthèse et production du palmier à huile en relation avec les facteurs climatiques. *Oléagineux*, 45, 8-9, fasc. **484** : 345 - 355.
- Durand-Gasselin T., Cochard B. 2005. Oil palm seed distribution. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, **12** (2) :148-153.
- Durand-Gasselin T., Kouame Kouame R., Cochard B., Adon B., Amblard P. 2000. Diffusion variétale du palmier à huile (*Elaeis guineensis Jacq.*). *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, **7** (2) : 207-14.
- Durand-Gasselin, T., Billotte, N., Pomies, V., Mastin G., Potier, F., Amblard, P., Flori, A., Cochard, B. 2009. ID checking by microsatellite type markers (SSR) during the oil palm variety selection and production processes. (8 p.). International Society for Oil Palm Breeders (ISOPB) Seminar, 2009/11/04-05, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Durenkamp, M., Luo, Y., Brookes, P. C. 2010. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction. *Soil Biology and Biochemistry*, **42** (11) : 2026-2029.
- Ebuy J., Lokombe J. P., Ponette Q., Sonwa, D., Picard N. 2011. Allometric equation for predicting aboveground biomass of three tree species. *Journal of Tropical Forest Science*, **23** (2) : 125-132.
- Egbe, A. E., Tabot, P. T., Fonge, B. A., & Bechem, E. 2012. Simulation of the impacts of three management regimes on carbon sinks in rubber and oil palm plantation

- ecosystems of South- Western Cameroon. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, **4** (6) : 154-162.
- Ellert B. H., Bettany J. R. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Science*, **75** : 529-538.
- Ellert B. H., Janzen H. H., Entz T. 2002. Assessment of a Method to Measure Temporal Change in Soil Carbon Storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **66** : 1687–1695.
- Elong GJ. 1983. Les plantations villageoises de palmier à huile de la Socapalm dans le bas-Moungo (Cameroun) : un projet mal intégré aux préoccupations des paysans. *Les Cahiers d’Outre-Mer* [En ligne], **224** : p. 11.
- Evans, S. E., & Wallenstein, M. D. 2011. Soil microbial community response to drying and rewetting stress: does historical precipitation regime matter, *Biogeochemistry*, **109** (1-3) : 101-116.
- Fan R.Q., Zhang X.P., Yang X.M., Liang A.Z., Jia S.X., Chen X.W. 2013. Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, **23** (3) : 312-320.
- Fang C., Moncrieff J.B. 2005. The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition. *Plant and Soil*, **268** : 243–253
- Fares A., Abbas F., Ahmad A., Deenik J.L., Safeeq M. 2008. Response of selected soil physical and hydrologic properties to manure amendment rates, levels, and types. *Soil Science*, **173** (8) : 522-533.
- Fasinmirin J.T., Reichert J.M. 2011. Conservation tillage for cassava (*Manihot esculenta* crantz) production in the tropics. *Soil & Tillage Research*, **113** (1): 1-10.
- Feller, C. 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols, **XVII** (4) : 339-346.
- Feller, C., & Fritsch, E. 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l’ouest, en particulier), **XXVI** (1) : 25-36.
- Follin JC. 2000. Enjeux de la recherche sur le palmier à huile en Afrique. *Oléagineux Corps Gras et Lipides*, **7** (2) : 138-139.

- Fournier S. 2000. Savoir-faire artisanaux et semi-artisanaux d'extraction d'huile de palme au Bénin : performances techniques et bilans économiques. Document de travail, Cirad-Tera, 24 p.
- Fournier S, Okounlola-Biaou A, Adjé A.I. 2001. L'importance des filières locales: le cas de l'huile de palme au Bénin. *Oléagineux Corps Gras et Lipides*, **8** (6) : 646-653.
- Fournier S, Muchnik J, Requier-Desjardins D. 2002. Enjeux et contraintes du développement de la filière huile de palme au Bénin : une approche par les systèmes agro-alimentaires localisés. *Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne]*, **220** : 475-494.
- Foster H.L., Prabowo Noto E. 1996. Variation in potassium fertilizer requirements in oil palm in North Sumatra. *In : Proceedings of 1996 Porim International Palm Oil Congress*, 143–152.
- Frisque M. 2007. Gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire, Université Libre de Bruxelles. 102 p.
- Frazão A L. 2012. Greenhouse gas emission and soil carbon dynamics in the Brazilian oil palm production. Thesis presented to obtain the degree of Doctor in Science. University of São Paulo. 94p.
- Frazão L.A., Paustian K., Pellegrino Cerri C.E., Cerri C.C. 2013. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *GCB Bioenergy*, **5** : 384–390.
- Frisque M. 2007. Gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire, Université Libre de Bruxelles. 102 p.
- Gagnon, 2009. Impact des différentes formes d'azote (Urée, NH_4^+ , NO_3^-) sur la croissance des plants et sur le lessivage des engrais. *Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers*. Support de formation : Ressources Naturelles et Faunes. Québec. 72p.

- Gavinelli A., Feller C., Larré-Larrouy M. C., Bacye B., Djègui N., Nzila J. de D. 1995. A routine Method to study soil organic matter by particle-size fractionation: Examples for tropical soils. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal*, **26** (1-12) : 1749-1760.
- Germer J, Sauerborn J. 2008. Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. *Environ Dev Sustain.*, **10** : 697–716.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2001. Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité AFRIQUE. Rapport spécial du Groupe de travail II. 48p.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. 1998. Le Sol vivant. Bases de pédologie biologie des sols. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne. ISBN 2-88074-367-2. Cours en ligne.
- Goh K. J., Amit S. 1993a. The root system of the oil palm (*Elaeis guineensis*, Jacq). I : A modified soil core method for root study. *Elaeis*, **5** (1) : 1-11.
- Goh K. J., Amit S. 1993b. The root system of the oil palm (*Elaeis guineensis*, Jacq). II : Indirect estimations of root length, diameter and surface area. *Elaeis*, **5** (2) : 75-85.
- Goh K-J., Härdter R. 2003. General Oil Palm Nutrition. In: Fairhurst, T., Härdter, R. (Eds.), Oil Palm Management for Large and Sustainable Yields. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), pp. 191–230.
- Gold, M.H., Alic, M. 1993. Molecular biology of the lignin-degrading Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Microbiological Reviews* **57** : 605–622.
- Gorissen A., Kuikman P.J., Van Ginkel J.H., Van De Beek H., Jansen A.G. 1996. Espas-An advanced phytotron for measuring carbon dynamics in a whole plant-soil system. *Plant and Soil*. **179** : 81-87.
- Gregory P. J., Atkinson C.J., Bengough A. G., Else M. A., Fernández-Fernández F., Harrison R.J., Schmid S. 2013. Contributions of roots and rootstocks to sustainable, intensified crop production. *Journal of Experimental Botany*, **64** (5) : 1209-1222.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2000. L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie. Rapport spécial. Résumé à l'intention du décideur. 30 p.

- Gu, C., & Riley, W. J. 2010. Combined Effects of Short Term Rainfall Patterns and Soil Texture on Soil Nitrogen Cycling A Modeling Analysis. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, **1** : 1-18.
- Guerrero C., Zornoza R., Gómez I., Mataix-Beneyto J. 2010. Spiking of NIR regional models using samples from target sites: Effect of model size on prediction accuracy. *Geoderma*, **158** : 66–77.
- Halim M., Conte P., Piccolo A. 2003. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils induced by exogenous humic substances. *Chemosphere* **52** (2003) : 265–275.
- Hartmann C. 1991. Evolution et comportement des sols sablo-argileux ferrallitiques sous culture du palmier à huile. Cas de la plantation R. Michaux à Dabou en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, Spécialité Pédologie. 230p.
- Härdter R., Fairhurst T. 2003. Introduction, in : Oil Palm Management for large and sustainable yields. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI). 1 - 12.
- Henry M., Picard N., Trotta C., Manlay R. J., Valentini R., Bernoux M., Saint-André L. 2011. Estimating Tree Biomass of Sub-Saharan African Forests : a Review of Available Allometric Equations. *Silva Fennica*. **45** (3B) : 477 - 569.
- Henry M., Besnard A., Asante W.A., Eshun J., Adu-Bredu S., Valentini R., Bernoux M., Saint-André L. 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa.
- Henson I. E, Chang K. C., Siti Nor Aishah M., Chai S H., Hasnuddin Mhd Y., Zakaria A. 1999. The oil palm trunk as a carbohydrate reserve. *Journal of Oil Palm Research*, **11** (2) : 98-113.
- Hinsinger P., Plassard C., Tang C., Jaillard B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*, **248** : 43–59.
- Hirsch R. D. 1995. Oil palm in Africa: La nécessaire Relance. *Plantation Recherche Développement*, **2** (6) : 19-30.
- Houghton R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus*, **55B** (2) : 378-390.

- Houghton R. A. 2005. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology*, **11** (6) : 945–958.
- IGN. 1968. Institut Géographique National - Paris. Carte Régulière de l'Afrique de l'Ouest à 1/200000. Carte topographique, République du Dahomey, feuille Porto-Novo, NB - 31 - XV.
- Imada S., Taniguchi T., Acharya K., Yamanaka N. 2013. Vertical distribution of fine roots of *Tamarix ramosissima* in an arid region of southern Nevada. *Journal of Arid Environments*, **92** : 46-52.
- Isaac M.E., Gordon A.M., Thevathasan N., Oppong S.K., Quashie-Sam J. 2005. Temporal changes in soil carbon and nitrogen in West African multistrata agroforestry systems: a chronosequence of pools and fluxes. *Agroforestry Systems*, **65** : 23–31.
- Jacquemard J.C. 1998. Oil Palm. (The Tropical Agriculturalist), Macmillan Education Ltd, in cooperation with CTA, London, UK, 144p.
- Jaffré T. 1983. Evolution de la biomasse épigée et du stock de carbone d'une culture pérenne : le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Laboratoire de Botanique. Projet interéquipes - forêt ivoiriennes p.l.k.e.n./o.r.s.t.o.m. ABIDJAN - (Côte d' Ivoire). 9p.
- Janoš P., Vávrová J., Herzogová L., Pilařová V. 2010. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study. *Geoderma* **159** : 335–341.
- Jantalia C.P., Resck D.V.S., Alves B.J.R., Zotarelli L. Urquiaga S., Boddey R.M. 2007. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. *Soil & Tillage Research* **95** : 97–109.
- Jordan A., Zavala, L.M., Gil J. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *CATENA*, **81** (1) : 77-85.
- Jourdan C. 1995. Modélisation de l'architecture et du développement du système racinaire du palmier à huile (*Elaeis guineensis*, Jacq.). Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II. 243 p.
- Jourdan C., Rey H. 1996. Architecture racinaire du palmier à huile. Modélisation et simulation. *Plantation, Recherche, Développement*, (3)5 : 313-327.

- Jourdan C., Rey H. 1997a. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, **189** : 33-48.
- Jourdan C., Rey H. 1997b. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. I. The model. *Plant and Soil*, **190** : 217–233.
- Jourdan C., Rey H. 1997c. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. II. Estimation of root parameters using the RACINES postprocessor. *Plant and Soil*, **190** : 235–246.
- Jourdan C., Michoux-Ferrière N., Perbals G. 2000. Root système architecture and gravitropism in the oil palm. *Annals of Botany*, **85** : 861-868.
- Juhé-Beaulaton D. 1998. La palmeraie du Sud Bénin avant la colonisation : essai d'analyse historique, Chastanet M (ed.). Plantes et paysages d'Afrique. Une histoire à explorer : Paris, Karthala-CRA, 327-352.
- Jourdan C., Thongo A., Nodichao L., Noel C., Dechazal M., Saint-André L., Roupsard O., Nouvellon Y., Joffre R., Epron D., Hame O., RouzièreA. 2003. Fine root dynamics and turnover within tropical perennial plantations. Poster.
- Jourdan C., Silva E. V., Gonçalves J.L.M., Ranger J., Moreira R.M., Laclau J.-P. 2008. Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest Ecology and Management*, **256** : 396–404.
- Kahlon M.S., Lal R., Ann-Varughese M. 2013. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil & Tillage Research*, **126** : 151-158.
- Kangas, A. & Maltamo, M. (eds.). 2006. Forest inventory. Methodology and applications. Managing Forest Ecosystems 10. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Kansou K. 2003. Structure et biomasse du palmier à huile (*Elaeis guineensis*) : Résultats préliminaires. Rapport de stage au Cirad-PT Smart/Indonésie. 77p.
- Kautz T., Amelung W., Ewert F., Gaiser T., Horn R., Jahn R., Javaux M., KemnY., A., Kuzyakov Y., Munch J.C., Pätzold S., Peth S., Scherer H.W., Schlöter M., Schneider H., Vanderborght J., Vetterlein D., Walter A., Wiesenberger G.L.B., Köpke U. 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil biology et biochemistry*. **57** : 1003-1022.

- Khalid H., Zin Z. Z., Anderson J. M., 1999. Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. 1, Above-ground biomass. *Journal of oil Palm Research*. II, **1** : 23 – 32.
- Khalid H., Zin Z.Z., Anderson J.M. 2000a. Soil nutrient dynamics and palm growth performance in relation to residue management practices following replanting of oil palm plantation. *Journal of Oil Palm Research*, **12** (1) : 25-45.
- Khalid H., Zin Z.Z., Anderson J.M. 2000b. Decomposition processes and nutrients release patterns of oil palm residues. *Journal of Oil Palm Research*, **12** (1) : 46-63.
- Khalid H., Zin Z.Z., Anderson J.M. 2000c. Nutrient cycling in an oil palm plantation : the effects of residue management practices during replanting on dry matter and nutrient uptake of young palms. *Journal of Oil Palm Research*, **12** (2) : 29-37.
- Knecht J.C.X., Ramachandran R., Narayanan R. 1977. Variation des teneurs en éléments nutritifs de la feuille avec l'âge des palmiers dans les prélèvements foliaires. *Oléagineux*, **32** (4) : 139-147.
- Koh L.P., Miettinen J., Liew S.C., Ghazoul J. 2011. Remotely sensed evidence of tropical peatland conversion to oil palm. *PNAS*, **108** (12) : 5127–5132.
- Konan K.E., Koné B., Adon N.B., Diabaté S., Koutou A., Ballo K. 2008. Bien cultiver le palmier à huile en Côte d'Ivoire. Fiche palmier n°1. Eds Centre National de Recherche Agronomique (CNRA), Centre Technique de coopération Agricole et rurale (CTA). 4p.
- Kossoumna Liba'a N, Havard M. 2006. Mutations de la filière cotonnière dans les provinces septentrionales du Cameroun. Perception et stratégies paysannes. *Cahiers de Géographie du Québec*, **50** (139) : 65-82.
- Kuzyakov, Y., Blagodatskaya, E., & Blagodatsky, S. 2009. Comments on the paper by Kemmitt et al. (2008) "Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass – A new perspective" [*Soil Biology & Biochemistry* 40, 61–73]: The biology of the Regulatory Gate. *Biology & Biochemistry* **41** : 435–439.
- Lamade, E., Bouillet, J.-P. 2005. Carbon storage and global change: the role of oilpalm. *Oléagineux Corps gras Lipides*, **12** (2) : 154–160.

- Lardy Chapuis L., Brossard M., Assad Lopes M.L., Laurent J-Y. 2002. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **92** : 147–158.
- Larouche A-R. 1983. La matière organique des sols et ses décomposeurs. Document de Projet. Ed. Ecological Agriculture Projects, McGill University (Macdonald Campus) Ste-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9 Canada. Internet. http://eap.mcgill.ca/La_matière_organique.htm
- Law M.C., Balasundram S.K., Husni M.H.A., Ahmed O.H. Haniff Harun M. 2009. Spatial Variability of Soil Organic Carbon in Oil Palm: A comparaison between Young and Mature Stands. *Int. J. Agric. Res.*, **4** (12) : 402-417.
- Legros S., Mialet-Serra I., Clement-Vidal a., Caliman J-P., Siregar F.A., Fabre D., Dingkuhn M. 2009. Role of transitory carbon reserves during adjustment to climate variability and source–sink imbalances in oil palm (*Elaeis guineensis*). *Tree Physiology*, **2** : 1199–1211.
- Lehmann J. 2013. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant and Soil*, **255** (1) : 319-331.
- Le Toan T., Quegan S., Davidson M.W.J., Balzter H., Paillou P., Papathanassiou K., Plummer S., Rocca F., Saatchi S., Shugart H., Ulander L. 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, **115** : 2850–2860.
- Lemos LCD., de Oliveira EL., de Faria MA., Andrade LAD. 2008 : Spatial variability of soil density and organic matter content in area cultivated with sugar cane (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Ciencia Agronomica*, **39** (2) : 193-202.
- Liddell M.J., Nieullet N., Otávio C. Campoe O. C., Freiberg M. 2007. Assessing the above-ground biomass of a complex tropical rainforest using a canopy crane. *Austral Ecology*, **32** : 43–58.
- Liski J., Ilvesniemi H., Mäkelä A., Westman C. J. 1999. CO₂ Emissions from Soil in Response to Climatic Warming Are Overestimated: The Decomposition of Old Soil Organic Matter Is Tolerant of Temperature. *Ambio*, **28** (2) : 171-174.
- Liu GS., Wang XZ., Zhang ZY., Zhang CH. 2008 : Spatial variability of soil properties in a tobacco field of central China. *SOIL SCIENCE*, **173** (9) : 659-667pp.

- Luo Y., Zhou X. (Eds) 2006. Soil Respiration and the Environment. Elsevier, California (USA), 133p.
- Lynch J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol.* **109** : 7–13.
- MAEP. 2009. Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche. Plan stratégique de relance du secteur agricole, Cotonou, 2009.
- Manlay R. J. Feller C., Swift M.J. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **119** : 217–233.
- Marchaõ R. L., Becquer T., Brunet D., Balbino L. C., Vilela L., Brossard M. 2009. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems. *Soil & Tillage Research* **103** : 442–450.
- Martius C., Tiessen H., Vlek P.L.G. 2001. The management of organic matter in tropical soils: what are the priorities? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **61** : 1-6.
- Maquere V., Laclau J.P., Bernoux M., Saint-Andre L., Gonçalves J.L.M., Cerri C.C., Piccolo M.C., Ranger J. 2008. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science*, **59** : 863–877.
- Marco P., Henry M., Blavet D., Bernoux M. 2010. Variation des stocks de carbone organique du sol après plantation forestière : essai de méta-analyse incluant quelques situations d'Amérique latine. *Bois et forêts des tropiques*, **305** (3) : 21-32.
- Martin G. 1977. Préparation et conditionnement des échantillons pour le diagnostic foliaire du palmier à huile et du cocotier. *Oléagineux*, **32** (3) : 95-99.
- Mbetid-Bessane E, Havard M, Djamen Nana, Patrice, Djonnewa A, Djondang K, Leroy J. 2002. Typologies des exploitations agricoles dans les savanes d'Afrique centrale. Actes du colloque, 27-31 mai 2002, Garoua, Cameroun, p. 10.
- Metay A. 2005. Séquestration de carbone et flux de gaz à effet de serre. Comparaison entre semis direct et système conventionnel dans les Cerrados brésiliens. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. 233p.

- Mialet-Serra, I., Clément A., Sonderegger N., Roupsard O., Jourdan C., Labouisse J-P., Dingkuhn M. 2005. Assimilate storage in vegetative organs of coconut (*Cocos nucifera* L.). *Exp. Agric.* **41** : 1–14.
- Mielke T. 2011. The 22nd Palm and Lauric Oils Conference and Exhibition (POC 2011). In Stories by Hanim Adnan. Global demand for palm oil growing rapidly. Accessed on 04/05/2012. Available at nem@thestar.com.my.
- Morel AC, Saatchi SS, Malhi Y, Berry NJ, Banin L, Burslem D, Nilus R, Ong RC. 2011. Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah. Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. *Forest Ecology and Management*, **262** : 1786–1798.
- Mustin M. 1987. Le compost, gestion de la matière organique. Editions François Dubusc, Paris. 954p.
- Nadwa S. M. 2001. Soil organic carbon (SOC) management for sustainable productivity of cropping and agro-forestry systems in Eastern and Southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **61** : 143–158.
- Ng S.K., Thamboo S. 1967. Nutrients contents of oil palms on Malaya. 1. Nutrients required for reproduction : Fruits bunches and male inflorescence. *The Malaysian Agricultural Journal*, **46** (1) : 3-45.
- Ng S.K., Thamboo S., De Souza P. 1968. Nutrients contents of oil palms on Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *The Malaysian Agricultural Journal*, **46** (3): 332-382.
- Ng S. K., Cheong T. K., Haw K. C., Ooi H. S. H., KaYee L., Kayaroganam P. 2003a. Clonal Oil Palm: Production, Yield Performance and Nutritional Requirements, in : Fairhurst T. and Härdter R.(eds), Oil Palm Management for large and sustainable yields. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI). 13 - 26.
- Ng S. K., von Uexküll H., Härdter R. 2003b. Botanical aspects of the oil palm relevant to crop management, in : Fairhurst T. and Härdter R.(eds), Oil Palm Management for large and sustainable yields. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI). 13 - 26.

- Ngao J., Epron D., Brechet C., Granier A. 2005. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology*, **11** : 1768–1776.
- Ngo K.M., Turner B.L., Muller-Landau H.C., Davies S.J., Larjavaara M., bin Nik Hassan N.F., Lum S. 2013. Carbon stocks in primary and secondary tropical forests in Singapore. *Forest Ecology and Management*, **296** : 81–89.
- Nicoullaud B.; Beaudoin N., Roque J., Couturier A., Maucorps J., King D. 2007 : Cartographie des sols et agriculture de précision. Agriculture de précision. Sciences et technologies ; ed Quae ; 15-23.
- Nodichao L. 2008. Biodiversité racinaire, absorption potassique et résistance à la sécheresse chez le palmier à huile au Bénin. Thèse Université Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 346p.
- Nodichao L., Chopart J-L., Roupsard O., Vauclin M., Aké S., Jourdan C. 2011. Genotypic variability of oil palm root system distribution in the field. Consequences for water uptake. *Plant and Soil*, **341** (1-2) : 505-520.
- Nouvellon Y., Epron D., Marsden C., Kinana A., Le Maire G., Deleporte P., Saint-Andre L., Bouillet J-P., Laclau J-P. 2011. Age-related changes in litter inputs explain annual trends in soil CO₂ effluxes over a full Eucalyptus rotation after afforestation of a tropical savannah. *Biogeochemistry*. DOI 10.1007/s10533-011-9685-9.
- Nouy B., Lubis R.A., Kusnadi T.T., Akiyat, Samaritaan G. 1991. Potentiel de production chez le palmier à huile *Elaeis guineensis*. Résultats des hybrides Deli x La Mé à Nord Sumatra vol. *Oléagineux*, **46** (3) : 91-97.
- Nouy B., Omoré A., Potier F. 1996. Oil palm production cycles in different ecologies: consequences for breeding. In: PORIM Int. Palm Oil Congr. Competitiveness for the 21st century. D. Ariffin et al., Palm Oil Res. Inst., Kuala Lumpur, Malaysia, 62–75.
- Nouy B, Baudouin L, Djégui N, Omoré A. 1999. Le palmier à huile en conditions hydriques limitantes. *Plantation Recherche Développement*, **6** (1) : 31-45.
- Nyamadzawo G., Shukla M.K., Lal R. Spatial variability of total soil carbon and nitrogen stocks for some reclaimed minesols of southeastern Ohio. *Land Degrad. Develop.* **19** : 275–288.

- Ochs R. 1985. Stratégie de mise en oeuvre du contrôle nutritionnel des plantes pérennes. Gestion de la nutrition minérale. Programmation des fumures. *Oléagineux*, **40** (12) : 583-594.
- Ochs R., Olivin J. 1977. Le diagnostic foliaire pour le contrôle de la nutrition des plantations de palmiers à huile. Prélèvement des échantillons foliaires. *Oléagineux*, **32** (5) : 211-216.
- Ouédraogo E., Brussaard L., Stroosnijder L. 2007. Soil fauna and organic amendment interactions affect soil carbon and crop performance in semi-arid West Africa
- Oil World Annual., 2010. The Independent Forecasting Service for Oilseeds, Oils and Meals. ISTA Mielke GmbH, Hamburg, Germany.
- Ollagnier M., Ochs R. 1981. Gestion de la nutrition minérale des plantations industrielles de palmiers à huile. Economies d'engrais. *Oléagineux*, **36** (8-9) : 409-421.
- Osmont K. S., Sibout R., Hardtke C. S. 2007. Hidden Branches: Developments in Root System Architecture. *Annual Review of Plant Biology*, **58** : 93-113.
- Ostonen I., Püttsepp Ü., Biel C., Alberton O., Bakker M. R., Löhmus K., Majdi H., Metcalfe D., Olsthoorn A. F. M., Pronk A., Vanguelova E., Weih M., Brunner I. 2007. Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems*, **141** (3): 426 – 442.
- Österreicher-Cunha P., do Amaral Vargas E. Jr., dos Santos F.A., Mothé B.P.G., Guimarães D.R., da Costa Coutinho H. L. 2012. Influence of Soil and Climate on Carbon Cycling and Microbial Activity of a Heterogeneous Tropical Soil. *Geomicrobiology Journal*, **29** : 399–412.
- Ouédraogo E., Brussaard L., Stroosnijder L. 2007. Soil fauna and organic amendment interactions affect soil carbon and crop performance in semi-arid West Africa. *Biol Fertil Soils*, **44** : 343–351.
- Pallo P.J.F., Sawadogo N., Sawadogo L., Sedogo M. P., Assa A. Statut de la matière organique des sols dans la zone sud-soudanienne au Burkina Faso. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **12** (3) : 291-301.
- Paramananthan. 2003. Land Selection for Oil Palm. In : Fairhurst, T., Härdter, R. (Eds.), Oil Palm Management for Large and Sustainable Yields. Potash & Phosphate Institute

- (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), 27-57.
- Pédro, G. 2007. Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux. Institut de France, académie des Sciences. *EDP Science*, 275 p.
- Peltier R., Forkong C. N., Ntoupka M., Manlay R., Henry M., Morillon V., 2007. Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques*. **294** (4) : 39-50.
- Perrot C., Landaïs E. 1993. Exploitations agricoles : pourquoi poursuivre la recherche sur les méthodes typologiques ? Dossier : méthodes d'études en milieu paysan. *Cah. Rech. Dév.*, **33** : 13-23.
- Pervaiz M.A Iqbal M., Shahzad K., Anwar-Ul H. 2009. Effect, of Mulch on Soil Physical Properties and N, P, K Concentration in Maize (*Zea mays*) Shoots under Two Tillage Systems. *International Journal of Agriculture and Biology*, **11** : **2**. 119-124.
- Pieri C. 1989. Fertilité des terres de savanes : bilan de trente années de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Paris. *Agridoc-international*. *CIRAD-IRAT*. 444 p.
- Pleanjai S, Gheewala S. H., Garivait S. 2007. Environment Evaluation of Biodiesel Production from Palm Oil in a Life Cycle Perspective. *Asian J. Energy Environ*, **8** (1-2) : 15-32.
- Powlson D. S., Hirsch P. R., Brookes P. C. 2001. The role of soil microorganisms in soil organic matter conservation in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **61** : 41-51.
- Quantum GIS Development Team. 2013. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R development core team. 2012. A Language and Environment for Statistical Computing, 3-900051-07-0.
- Rafflegeau S. 2008. Dynamique d'implantation et conduite technique des plantations villageoises de palmier à huile au Cameroun : Facteurs limitants et raisons des pratiques. Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, Agro Paris Tech, France, p. 148.

- Raffleau S., Michel-Dounias I., Tailliez B., Ndigui B., Papy F. 2010. Unexpected N and K nutrition diagnosis in oil palm smallholdings using references of high-yielding industrial plantations. *Agron. Sustain. Dev.* **30** : 777–787.
- Raffin R. 1993. Influence sur les propriétés et les fonctions du sol. In *Mémento du producteur la matière organique*, Editions S.E.R.A.I.L.et l'Information Agricole du Rhône.
- Reinhardt, G., Retteinmaier, N., von Falkenstein, E. 2007. Conclusive Evaluation of Studies Assessing the Environmental Impact of the Use of Palm Oil as a Bioenergy Carrier. Institute for Energy and Environmental Research (IFEU), Heidelberg, Germany. Final Report, 9p.
- Rees R., Ball B., Campbell C., Watson C. 2001. Sustainable Management of Soil Organic Matter. CABI Publishing, Wallingford. 60p.
- Regina I. S. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *Forest Ecology and Management*, **132** : 127-141.
- Ribeiro, S.C., Fehrmann L., Soares C.P.B., Jacovine L.A.G., Kleinn C., Gaspar R.D. 2011. Above and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, **262** (3) : 491-499.
- Rocca F., Saatchi S., H. Shugart , Ulander L. 2011. The biomass mission : mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment* **115** (2011) : 2850–2860.
- Rossi J., Govaerts A., De Vos B., Verbist B., Vervoort A., Poesen J., Muys B., Deckers J. 2009. Spatial structures of soil organic carbon in tropical forests—A case study of Southeastern Tanzania. *Catena* **77** (2009) : 19–27.
- Rueth B., Lennartz B. 2008 : Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in southeast China Source: *PEDOSPHERE*, **18** (4) : 409-420.
- Saïdou A., Dossa A. F. E., Gnanglè P. C., Balogoun I., Aho N. 2012. Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.) et à néré (*Parkia biglobosa* Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, Numéro spécial Agriculture & Forêt-Novembre 2012. 9 p.

- Sampaio E., Gasson P., Baracat A., Cutler D., Pareyn F., Costa Lima K. 2010. Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, **259** : 1135–1140.
- Sayer J., Ghazoul J., Nelson P., Boedhihartono A.K. 2012. Oil palm expansion transforms tropical landscapes and livelihoods. *Global Food Security*, **1** : 114–119.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT® 9.3 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Scherr S. 1999. Soil degradation. A threat to developing-country food security by 2020? International Food Policy Research Institute (IFPRI). Discussion Paper 27. 71 p.
- Singh V., Tewari A., Kushwahab S. P.S., Dadhwal V. K. 2011. Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. *Forest Ecology and Management*. **261** : 1945–1949.
- Sissinto, E. 2000. Etude de la consommation en eau de cinq croisements de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Thèse d'Ing. Agro. FSA. Université National du Bénin, Abomey -Calavi, 110 p.
- Smith OB, Moustier P, Mougeot LJA, Fall A. (eds). 2004. Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone Enjeux, concepts et méthodes. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et Centre de recherches pour le développement international (CRDI). p. 173.
- SNV-Bénin. 2009. Potentialités des filières anacarde et palmier à huile au Benin. Rapport d'études. *Dutch Development Organisation (SNV)*, Bénin. p. 34.
- Soltner D. 1992. Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles, 19^e édition, Sainte Gemmes sur Loire.
- Sowerby A, Blum H, Gray T R G and Ball A S. 2000. The decomposition of *Lolium perenne* in soils exposed to elevated CO₂: comparisons of mass loss of litter with soil respiration and soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* **32** : 1359–1366.
- Stefanowicz, A. M., Kapusta, P., Szarek-Lukaszewska, G., Grodzińska, K., Niklińska, M., & Vogt, R. D. 2012. Soil fertility and plant diversity enhance microbial performance in metal-polluted soils. *The Science of the total environment*, **439** : 211-9.

- Syahrinudin. 2005. The Potential of Oil Palm and Forest Plantations for Carbon Sequestration on Degraded Land in Indonesia. *Ecology and Development Series* **28** : 1–115.
- Tâmara Thaiz S. L., Izildinha Souza M., Steel Silva V. 2010. Effects of water and nutrient availability on fine root growth in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil. *New Phytologist*, **187** (3) : 622-630.
- Tarre S., Beliaevski M., Denekamp N., Gieseke A., de Beer D., Green M. 2001. High nitrification rate at low pH in a fluidized bed reactor with chalk as the biofilm carrier. *Water Science and Technology*, **49** (11–12) : 99–105.
- Teoh K.C., Chew P.S. 1987. Use of Rachis analysis as an indicator of K nutrient status in oil palm. In: *Proceedings of 1987 International Palm Conference*, 262–271.
- Thenkabail P. S., Stucky N., Griscom B. W, M. S. Ashton M. S., Diels J., van der Meer B., E. Enclona E. 2004. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing*. 25, Issue 23.
- Tiessen H., Cuevas E., Chacon P. 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* **371** : 783-785.
- Tobner C. M., Paquette A., Messier C. 2013. Interspecific coordination and intraspecific plasticity of fine root traits in North American temperate tree species. *Frontiers in Plant Science|Functional Plant Ecology*, **4** (242). Doi: 10.3389/fpls.2013.00242.
- Tonassé N.A. 2007. Caractérisation du système racinaire et de la capacité d'absorption hydrique de cinq géotypes du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq), Thèse d'Ing. Agronome, Faculté d'Agronomie/Université de Parakou, Bénin. 111p.
- Ton P, de Haan LJ. 1995. A la recherche de l'agriculture durable au Bénin. Livre. Par Cortie C, Beenakker J, Dietz T, Thissen F, van Bruinessen A. (eds). Instituut voor Sociale Geografie, Universiteit van Amsterdam. 209 p.
- Tracy, S. R., Black, C. R., Roberts J. A., Mooney S.J. 2013. Exploring the interacting effect of soil texture and bulk density on root system development in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, **91** : 38-47.

- Trangmar B.B., Yost R. S., Uehara G. 1985 : Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, vol. 38 ; Academic Press, San Diego; 45- 94 pp.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2013. Palm oil production by country. Internet. [http://www.indexmundi.com/agriculture/commoditypalm oil](http://www.indexmundi.com/agriculture/commoditypalm%20oil).
- Van Wesemael B., BRAHY V. 2006. La matière organique dans les sols. In CEEW op.cit. 468-475.
- Verlag G. C. 2005. The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia. *Ecology and Development Series*, **28** : 112p.
- Vermeulen S., Goad N. 2006. Towards better practice in smallholder palm oil production. Rapport. *International Institute for Environment and Development, London, UK*. <http://ecoport.org>. 57 p.
- Vesterdal L., Leifeld J. 2010. Land-use change and management effects on soil carbon sequestration: Forestry and agriculture. Greenhouse-gas budget of soils under changing climate and land use (BurnOut). COST 639. 2006-2010. 25-32.
- Victoria R., Banwart S., Black H., Ingram J., Joosten H., Milne E., Noellemeyer E. 2012. The Benefits of Soil Carbon. Managing soils for multiple economic, societal. United Nations Environmental Year Book (UYB). 19-33.
- Volkoff B. 1976 a. Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1 /200000. Feuille d'Abomey. Note explicative n°66 (2), ORSTOM (Paris), p. 40, carte h.t.
- Volkoff B. 1976 b. Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1 /200000. Feuilles Abomey et Porto-Novo. ORSTOM (Paris).
- Volkoff B., Faure P., Dubroeuq D., Viennot M. 1999. Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, **6** (2) : 115-130.
- von Uexküll, H.R., Henson I.E., Fairhurst, T. 2003. Canopy Mangement to Optimize Yield. In: Fairhurst, T., Härdter, R. (Eds.), *Oil Palm Management for Large and Sustainable Yields*. Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), pp. 163–180.

- Wakker E. 1999. Forest fires and the expansion of Indonesia's oil-palm plantations. WWF Indonesia, Jakarta, 25p.
- Wang H., Inukai Y., Yamauchi A. 2006. Root Development and Nutrient Uptake. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **25** (3) : 279-301.
- Wang G., Fahey T. J., Xue S., et Liu F. 2013. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabuliformis*, west China. *Oecologia*, **171** (2): 583-590.
- Yamada H., Tanaka R., Sulaiman O., Hashim R., Hamid Z.A.A., Yahya M.K.A., Kosugi A., Arai T., Murata Y., Nirasawa S., Yamamoto K., Ohara S., Yusof M. N. M., Ibrahim W A., Mori Y., 2010. Old oil palm trunk : A promising source of sugars for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy*. **34** : 1608-1 613.
- Wetterlind J., Stenberg B., Jonsson A. 2008 : Near infrared reflectance spectroscopy compared with soil clay and organic matter content for estimating within-field variation in N uptake in cereals. *Plant Soil* **302** : 317–327.
- Williams, C.A., Hanan, N.P., Neff, J.C., Scholes, R.J., Berry, J.A., Denning, A.S., Baker, D.F., 2007. Africa and the global carbon cycle. *Carbon Balance and Management* **2** (3) : 1-13.
- Yamada H., Tanaka R., Sulaiman O., Hashim R., Hamid Z.A.A., Yahya M.K.A., Kosugi A., Arai T., Murata Y., Nirasawa S., Yamamoto K., Ohara S., Yusof M. N. M., Ibrahim W A., Mori Y., 2010. Old oil palm trunk: A promising source of sugars for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy*. 34, 1608-1613.
- Yan N, Marschner P. 2012. Response of microbial activity and bio- mass to increasing salinity depends on the final salinity, not the original salinity. *Soil Biol Biochem* **53** : 50–55.

Biographie de l'auteur

Hervé Nonwègnon Sayimi Aholoukpè né le 17 décembre 1976 à Cotonou au Bénin est marié et père de trois enfants. Il a effectué les études primaires et secondaires de 1981 à 1996 où il a été titulaire d'un baccalauréat scientifique. En 1997, il a débuté les études supérieures en sciences agronomiques à l'Université Nationale du Bénin (actuelle Université d'Abomey-Calavi) et obtint le diplôme d'Agronome Général en 2001 puis celui d'Ingénieur Agronome en 2002. Très tôt, il a manifesté sa passion pour le domaine des sciences du sol et avait effectué son premier stage pratique au Laboratoire des Sciences du Sol, Eau et Environnement (ex-Centre National d'Agro-Pédologie) en 1998.

En 1999, il fut enrôlé par son professeur de pédologie, le Professeur Guillaume L. Amadji, dans les fonctions d'Assistant de recherche. Il a donc participé à l'élaboration et la mise en œuvre de plusieurs protocoles/projets de recherche sur la gestion de la fertilité des sols sous divers agro-systèmes.

De 2004 à 2007, il a été coordinateur d'un projet de sécurité alimentaire et nutritionnelle et s'occupait entre autres de la formation des paysans sur la gestion intégrée de fertilité des sols.

Après ce passage dans le développement agricole, il est revenu à la recherche agricole et occupe depuis 2007, le poste de Chercheur au Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRAPP) de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Au CRAPP, il se charge des techniques et systèmes cultureux d'amélioration de la fertilité des sols sous palmeraies en station et en plantations villageoises. Il est également le secrétaire permanent du comité technique du CRAPP et coordonne les activités scientifiques des chercheurs de la station à travers un suivi-évaluation des projets/protocoles de recherche.

Il débuta ses études du troisième cycle en 2008 et obtint en 2009 le diplôme de Master 2 Recherche en Biologie Géologie Agro-Ressources Environnement (BGAE) de l'Université des Sciences de Montpellier. En 2013, il obtint le diplôme de Docteur en Ecosystèmes et Sciences Agronomiques du Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques de Montpellier/France et de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

Compétences

- Conception et coordination de projet de recherche-développement
- Etude de l'aptitude culturale des sols tropicaux pour les cultures vivrières et pérennes (palmier à huile) : Bénin et Nigéria
- Gestion des pratiques culturales pour une utilisation durable des sols des palmeraies
- Maîtrise de méthodes et techniques d'analyses de laboratoire : Spectrométrie Proche Infra Rouge (SPIR) ; méthodes conventionnelles d'analyses physico-chimiques du sol.
- Etude de la matière organique des sols : Stock de carbone, fractionnement granulométrique...
- Transfert de connaissances théoriques et pratiques à des groupes de scientifiques, agronomes et paysans

Table des matières

Sommaire	viii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	xi
Liste des annexes.....	xv
Résumé	xvi
Abstract	xix
Introduction générale.....	1
1. Problématique.....	1
2. Question de recherche	5
3. Objectifs	5
4. Plan de la thèse	6
Première partie : Etat de l'art et orientation de la recherche.....	8
Introduction de la première partie	8
Chapitre 1 : Etat de l'art de la recherche.....	8
1.1 Introduction du chapitre 1	8
1.2 La matière organique du sol	8
1.3 La culture du palmier à huile en Afrique	17
1.4 La notion de biomasse des plantes	24
1.5 Conclusion du chapitre 1 et hypothèses de recherche.....	34
Chapitre 2 : Cadre d'étude et stratégie de recherche.....	35
2.1 Introduction du chapitre 2	35
2.2 Cadre d'étude	35
2.3 Stratégie de recherche	38
2.4 Conclusion du chapitre 2.....	43
Conclusion de la première partie.....	44
Deuxième partie : Diagnostic agro-pédologique des palmeraies villageoises : Approche régionale exploratoire.....	45
Introduction de la deuxième partie	45
Chapitre 3 : Typologie des palmeraies villageoises	46
3.1 Introduction du chapitre 3	47
3.2 Matériels et méthodes.....	48
3.3 Résultats	52
3.4 Discussion	67
3.5 Conclusion du chapitre 3.....	71

Chapitre 4 : Modes de gestion des feuilles et MOS dans une chronoséquence de palmeraies.....	73
4.1 Introduction du chapitre 4	73
4.2 Matériels et méthodes.....	75
4.3 Résultats	84
4.4 Discussion	90
4.5 Conclusion du chapitre 4.....	94
Conclusion de la deuxième partie	95
Troisième partie : Effet du mode de gestion des feuilles d'élagage sur les compartiments aériens et souterrains des palmeraies : Approche inter et intra parcellaire	98
Introduction de la troisième partie	98
Chapitre 5 : Gestion des feuilles d'élagage et caractéristiques bio-physico-chimiques du sol	100
5.1 Introduction du chapitre 5	100
5.2 (Pré-article) : Matière organique et propriétés physico-chimiques d'un sol ferrallitique sous palmeraie villageoise du sud-Bénin : effet de la gestion des feuilles d'élagage des palmiers.....	101
5.3 (Pré-article) : La gestion des feuilles du palmier à huile affecte l'activité microbienne et le statut de la matière organique d'un sol tropical du Bénin - Afrique de l'Ouest.....	120
5.4 Conclusion du chapitre 5	138
Chapitre 6 : Gestion des feuilles d'élagage et biomasses et minéralo masses des compartiments aériens des palmeraies	141
6.1 Introduction du chapitre 6	141
6.2 Article publié: Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass.	143
6.3 Pré-article : Estimation de la biomasse aérienne du palmier à huile : Equations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc.	159
6.4 Pré-article : Biomasses et minéralo-masses des palmeraies villageoises : Effet des modes de gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile.	173
6.5 Conclusion du chapitre 6	193
Chapitre 7 : Gestion des feuilles d'élagage et développement du système racinaire des palmiers	194
7.1 Introduction du chapitre 7	194
7.2 Matériels et Méthodes	196
7.3 Résultats	200
7.4 Discussion	207
7.5 Conclusion du chapitre 7	213
Conclusion de la troisième partie	215

Quatrième partie : Discussion et Conclusion générales	217
1- Rappel sur la question, les hypothèses et la stratégie de recherche	217
2- Analyse des caractéristiques des palmeraies villageoises du Bénin et de l'effet des modes de gestion des feuilles d'élague sur le système "sol - plante".	218
3- Analyse de la durabilité du système des palmeraies villageoises du Bénin	226
4- Conclusion générale et perspectives	228
Références bibliographiques	232
Biographie de l'auteur.....	258
Table des matières	260
Annexes	263
Annexe 1. Résumés des articles publiés et des pré-articles	263
Chapitre 3 (Article publié) :	263
Chapitre 4 (Pré-article) : Soil carbon stock is affected by management of pruned fronds in palm plantations of smallholders in Western Africa.....	265
Chapitre 5 (Pré-article 1) : Matière organique et propriétés physico-chimiques d'un sol ferrallitique sous palmeraie villageoise du sud-Bénin : effet de la gestion des feuilles d'élague des palmiers.....	266
Chapitre 5 (Pré-article 2) : La gestion des feuilles du palmier à huile affecte l'activité microbienne et le statut de la matière organique d'un sol tropical du Bénin - Afrique de l'Ouest.....	267
Chapitre 6.2 (Article publié):	268
Chapitre 6.3. (Pré-article) : Estimation de la biomasse aérienne du palmier à huile : Equations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc.....	269
Chapitre 6.4. (Pré-article): Biomasse et minéralomasse aérienne des palmeraies villageoises	270
Chapitre 7 (Pré-article) : Développement du système racinaire du palmier à huile dans les plantations villageoises du Bénin : Effet des modes de gestion des feuilles d'élague.....	271
Annexe 2. Indicateurs des modèles de prédiction des paramètres du sol	272
Annexe 3. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone : Chapitre 4	273
Annexe 4-1. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone et d'azote. Chapitre 5.2.....	276
Annexe 4-2. Résultats d'analyse de variance des poids des fractions organiques (Pfrac), des teneurs en carbone (Csol) et en azote du sol (Nsol), de la biomasse microbienne et de la respiration du sol. Chapitre 5.3	278
Annexe 5. Résultats d'analyse de variance des paramètres de production de biomasse et de minéralo-masse aérienne. Chapitre 6.4.	280
Annexe 6. Résultats d'analyse de variance des variables de développement racinaire sur l'horizon 0-100 cm. Chapitre 7	293

Annexes

Annexes

Annexe 1. Résumés des articles publiés et des pré-articles

Chapitre 3 (Article publié) :



Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(3): 978-999, June 2013

ISSN 1991-8631

International Journal
of Biological and
Chemical Sciences

Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Typologie des plantations villageoises de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans le département du Plateau au Bénin

H. AHOLOUKPE^{1,2,3*}, V. P. VISSOH², G. AMADI², P. DELEPORTE³, B. DUBOS⁴,
L. NODICHAO¹, R. GLELE KAKAI², J.L. CHOTTE⁵ et D. BLAVET⁵

¹ Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Benin.

² Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, BP 526 FSA/UAC, Cotonou, Benin.

³ CIRAD, UMR Eco&Sols, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

⁴ CIRAD, UPR Systèmes de pérennes, F-34398 Montpellier, France.

⁵ IRD, UMR Eco&Sols, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

*Auteur correspondant, E-mail. aholoukpeherve@yahoo.fr; Tel : (229) 96720404.

Résumé

Une typologie des palmeraies villageoises du département du Plateau au sud-est du Bénin a été établie à travers : i) une étude cartographique de la couverture pédologique et d'occupation des sols, ii) des entretiens semi-structurés en assemblée générale avec des groupes de producteurs choisis de façon aléatoire dans chaque commune, iii) des entretiens semi-structurés individuels avec quatre vingt dix producteurs dont les palmeraies sont installées sur les terres de barre et étudiées par une analyse factorielle des correspondances multiples. Les terres de barre sont les sols les plus plantés avec le palmier à huile et Adja-Ouèrè et Sakété constituent les communes de grosse production. Les palmeraies du département présentent i) des caractéristiques très peu variables : la densité de plantation, le précédent cultural, les pratiques d'association des cultures vivrières et d'utilisation des engrais et ii) des caractéristiques variables et spécifiques : la restitution des sous-produits de transformation et le recyclage des feuilles d'élégage des palmiers. Parmi les cinq modalités de gestion des

feuilles d'élagage identifiées, l'exportation des feuilles est une pratique dominante dans le département. Sur les terres de barre, on retrouve quatre types de palmeraies qui se différencient par la superficie, les pratiques culturelles et l'âge des palmeraies.

Mots clés : palmeraies villageoises ; sols ; sud-Bénin ; pratiques culturelles ; typologie ; palmier à huile.

Chapitre 4 (Pré-article) :

Soil carbon stock is affected by management of pruned fronds in palm plantations of smallholders in Western Africa

Résumé

Très peu d'informations existent sur le potentiel "puits de carbone" des sols sous palmeraies villageoises au Bénin. Dans cette étude, la biomasse des feuilles restituées en andains au sol et le stock de carbone du sol ont été estimés dans une chronoséquence de palmeraies villageoises où les feuilles de palmier à huile sont totalement restituées en andains (RT) sur les lignes de plantation ou totalement exportées (RN). Vingt deux palmeraies de différentes classes d'âge caractérisées par les modes RT et RN de gestion des feuilles d'élagage ont été choisies dans le département du Plateau au sud-est du Bénin, où la couverture pédologique est dominée par les sols ferrallitiques faiblement désaturés communément appelés "terre de barre". Les palmeraies appartiennent à 4 classes d'âges que sont 4-6, 7-12, 13-20 et > 20 ans. Dans les palmeraies RT les andains ont été mesurés (longueur et largeur) et leur masse sèche a été déterminée. Des prélèvements de sol ont été effectués à 0-5, 5-10, 10-15 et 20 cm sous les andains et dans les interlignes de 9 palmiers par parcelle. La densité apparente du sol a été déterminée par profondeur, le profil de sol a été étudié sous andain et dans l'interligne et le stock de carbone du sol a été calculé pour 200 kgsol.m⁻² de masse de terre équivalente. Les feuilles restituées en andains occupent 10% de la superficie plantée et génèrent une biomasse au sol de 80 t.ha⁻¹ dans les palmeraies de 13-20 ans, qui est significativement différente ($P < 0,05$) à celles des palmeraies de 7-12 et d'âge > 20 ans (respectivement 45 et 48 t.ha⁻¹). Il existe une forte variabilité spatio-temporelle du stock de carbone du sol liée à la restitution des feuilles en andains dans les palmeraies. Sous andains, le profil du sol a été modifié et la densité apparente a baissé par rapport aux interlignes, avec des valeurs très faibles d'environ 0,7 g.cm⁻³ à 0-5 cm dans les palmeraies de 13-20 ans. Au cours du temps, l'effet de la restitution totale des feuilles sur le stock de carbone du sol devient significatif à partir de 13 ans d'âge des palmeraies. L'absence de restitution des feuilles n'a pas induit une variabilité temporelle du stock de carbone.

Mots clés : Stock de carbone ; palmeraie villageoise ; pratiques culturales ; chronoséquence.

Chapitre 5 (Pré-article 1) :

Matière organique et propriétés physico-chimiques d'un sol ferrallitique sous palmeraie villageoise du sud-Bénin : effet de la gestion des feuilles d'élagage des palmiers.

Résumé

La matière organique et les propriétés physico-chimiques du sol ont été étudiées dans les palmeraies de différents âges situées sur un sol ferrallitique appauvri faiblement désaturés du sud-est du Bénin et caractérisées par diverses pratiques de gestion des feuilles d'élagage. Trois palmeraies en restitution totale (RT) et trois en restitution nulle (RN) des feuilles ont été choisies dans deux classes d'âge (7-11 ans et 16-19 ans) pour étudier les stocks de carbone et d'azote pour 650 kg.m⁻² de masse de terre équivalente (MTE). Les trois palmeraies RT de la classe d'âge 16-19 ans ont été retenues pour l'étude des autres paramètres physico-chimiques du sol. Dans les palmeraies RT, les feuilles sont restituées seulement sur la ligne de plantation en andain. Les prélèvements de sol ont été faits dans les andains et interlignes des palmeraies RT et dans les interlignes seules des palmeraies RN, à 0-5 ; 5-10 ; 10-20 ; 20-30 et 30-50 cm de profondeur de sol. Dans les parcelles RT, les stocks de carbone et d'azote sous andain à 16-19 ans sont de 60 MgC.ha⁻¹ et 4 MgN.ha⁻¹. Ces stocks sont significativement supérieurs ($P < 0,05$) aux stocks dans les interlignes des parcelles du même âge, et significativement supérieurs aux stocks sous andains et dans interlignes à 7-11 ans. Il n'existe pas une différence significative au seuil de 5% entre les stocks de carbone et d'azote des interlignes RN de tous les âges. Le recyclage des feuilles en andains a amélioré le pH, la somme des cations échangeables (S) et la CEC sur les 20 premiers centimètres du sol par rapport à l'interligne. Le pH sous andain est en moyenne de 6 et dépasse de 0,5 unité le pH dans l'interligne. Les valeurs de S (11 meq.100g⁻¹) et de CEC (9 meq.100g⁻¹) sous andains dépassent d'au moins deux fois celles dans les interlignes dans la couche 0-5 cm. Au-delà de 20 cm, il n'existe pas une différence significative entre paramètres du sol andain et dans interligne. La CEC est en bonne corrélation avec la teneur matière organique en surface et avec les particules minérales fines en profondeur.

Mots clés : pratiques culturales ; propriétés physico-chimiques du sol ; stock de carbone ; palmeraies.

Chapitre 5 (Pré-article 2) :

La gestion des feuilles du palmier à huile affecte l'activité microbienne et le statut de la matière organique d'un sol tropical du Bénin - Afrique de l'Ouest.

Résumé

La biomasse microbienne, la respiration microbienne et le statut de la matière organique du sol ont été étudiés dans un sol ferrallitique faiblement désaturé du sud-est du Bénin. Le sol est sous des palmeraies villageoises âgées de 17 ans qui sont caractérisées par une restitution totale des feuilles d'élagage du palmier (RT) ou par une restitution nulle des feuilles (RN). Dans les palmeraies RT la restitution se fait en andain seulement sur les lignes de plantation. Deux palmeraies RT et deux palmeraies RN ont été choisies pour l'étude de l'activité microbienne à 0-5, 5-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur de sol. Les fractions granulométriques de la matière organique et les contenus en carbone et en azote des fractions ont été déterminés à 0-5 et 20-30 cm dans les palmeraies RT. La restitution en andain des feuilles a augmenté la biomasse et la respiration microbienne par rapport aux situations de non restitution des feuilles. L'effet a été significatif dans l'horizon 0-5 cm. Sous les andains, le dégagement de CO₂ à 0-5 cm est de près de 10 fois celui à 20-30 cm. Il existe une faible corrélation positive ($r = 0,26$, $P < 0,05$) entre biomasse et respiration microbienne. Sous les andains de feuilles, on obtient une proportion plus importante (34%) de fractions organiques grossières (FO > 50µm) à 0-5 cm que la proportion (23%) des mêmes fractions organiques en profondeur (20-30 cm) sous andain et aux deux profondeurs dans les interlignes. La restitution des feuilles en andains a significativement augmenté les contenus en carbone et en azote des fractions dans le sol par rapport aux interlignes (sans feuilles). Le sol sous andain s'est enrichi en azote (2 mgN.g⁻¹ sol) en surface.

Mot clés : sol, activité microbienne, matière organique, pratiques culturales.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Forest Ecology and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/foreco



Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass

H. Aholoukpè^{a,e,f,*}, B. Dubos^b, A. Flori^c, P. Deleporte^d, G. Amadji^e, J.L. Chotte^f, D. Blavet^f

^a Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Benin

^b CIRAD, UPR Performance des Systèmes de Culture des Plantes pérennes, F-34398 Montpellier, France

^c CIRAD, UMR Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes, F-34398 Montpellier, France

^d CIRAD, UMR Eco&Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes) INRA-IRD-SupAgro-Cirad, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

^e Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, BP 526 FSA/UAC, Cotonou, Benin

^f IRD, UMR Eco&Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes) INRA-IRD-SupAgro-Cirad, Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

(*)Corresponding author : Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, BP 01 Pobè, Benin. Tel : (229) 96720404. E-mail: aholoukpeherve@yahoo.fr

Abstract

Allometric equations were developed to estimate the biomass of oil palm frond with non tree-lethal methods. The study was conducted in oil palm plantations belonging to the Oil Palm Research Center of the *Institut National de Recherches Agricoles du Bénin* (INRAB) and to neighboring smallholders oil palm plantations. Complete measurements of an individual frond biomass and measurements of predictor variables were made by two methods: 1- a tree-lethal (destructive) method and 2- a non tree-lethal method. Measurements were done on twenty-five palm trees of several ages and from different genetic origins. Frond variables measured were: length (L) and dry weight (DW) of the petiole and rachis, dry weight of leaflets, dry weight of a fragment (length = 0.30 m) taken from mid way along the rachis, thickness and width of the petiole cross section (junction of petiole and rachis). Linear regressions were established with biomass data obtained for different parts of the palm frond by the two methods. The results showed that up to rank 9, frond biomass increased with frond position in the crown. From rank 10, fronds were mature and their biomass showed a nearly constant value independently of rank. These results led to the establishment of a simple equation to

estimate frond biomass based on rachis dry weight: $DW_{\text{frond}} = 1.147 + 2.135 * DW_{\text{rachis}}$ ($R^2 = 0.62$). This relationship is closer than Corley's one based on the cross section of the petiole ($R^2 = 0.22$). Rachis dry weight can easily be estimated ($R^2 = 0.94$) using rachis length and linear density (or mass per length) of a fragment of 0.30 m taken from mid way along the rachis. The equation is: $DW_{\text{rachis}} = 1.133 * L_{\text{rachis}} * DW_{\text{fragment}} / 0.30$. The study also showed that one of the applications of our allometric equations is the determination of the average dry weight of mature fronds from at least three mature fronds (rank > 10). This could allow an estimate of the annual production of oil palm fronds biomass, and then the estimate of fronds carbon stock. The latter could contribute to the assessment of environmental impact of forest conversion into oil palm plantations.

Keywords: Allometric equations, Above ground biomass, Frond biomass, Carbon stocks, Oil palm.

Chapitre 6.3. (Pré-article) :

Estimation de la biomasse aérienne du palmier à huile : Equations allométriques d'estimation de la biomasse du tronc.

Résumé

Des équations allométriques basées sur des méthodes non destructrices ont été établies pour l'estimation de la biomasse du tronc du palmier à huile. L'étude a été conduite sur la station de recherche sur le palmier à huile du Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRAPP) de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Sur un échantillon de palmiers à huile, des mesures de la biomasse du tronc ont été faites par dissection et pesée des tranches du tronc, de même que des mesures d'estimateurs envisagés. Vingt palmiers adultes de différents âges ont fait conjointement objet de mesures destructrices et non destructrices. Les variables mesurées sur le tronc sont : hauteur du tronc à partir du collet jusqu'en bas de la feuille 33 (H33) ; masse sèche, diamètre et épaisseur des tranches sectionnées à différentes hauteurs sur le tronc, masse sèche de carottes de tissu du tronc prélevées dans chaque tranche. Les résultats ont montré que la densité du tronc par méthode destructrice évolue en fonction de la hauteur jusqu'à atteindre une valeur maximale vers 1,5 m où elle reste plus moins constante jusqu'en haut. La section du tronc quant à elle décroît rapidement jusqu'à 1,5 m puis très faiblement au-delà de cette hauteur. Les densités des différentes tranches de tronc obtenues par méthodes destructrice (Dref) et non destructrice (Dcar : carottage) sont corrélées linéairement. $D_{\text{ref}} = 1,062 * D_{\text{car}}$ ($R^2 = 0,99$). La masse linéique du tronc estimée à partir de la densité et de la section du tronc, suit la même tendance que la section, en fonction de la hauteur. Elle atteint sa valeur la plus petite qui reste plus ou moins constante au-delà de 1,5 m. Les résultats ont par ailleurs abouti à l'établissement d'une équation qui permet d'estimer la masse linéique de tronc à une hauteur donnée (MLT(h)) en fonction de la masse linéique et du diamètre du tronc mesurés au collet (point 0) et à 1,5 m. $MLT(h) = a * MLT0 * (e^{-(b0-b1 * (MLT1,5/MLT0)) * h} + (c * h) + d * \text{diam}0 + e * \text{diam}1,5 + f$. L'équation établie est intégrable entre deux positions h1 et h2 et permet d'estimer la biomasse du tronc

entre deux hauteurs. Les équations établies sont dépendantes du diamètre du tronc, mais indépendante de la hauteur, de l'âge et de l'origine génétique du palmier. Ces équations pourraient toutefois être validées et améliorées sur un échantillon plus grand incluant des jeunes palmiers.

Mots-clés : équations allométriques; biomasse aérienne ; stock de carbone ; palmier à huile

Chapitre 6.4. (Pré-article):

Biomasse et minéralomasse aérienne des palmeraies villageoises

Résumé

La culture du palmier à huile en milieu villageois prend de plus en plus d'ampleur dans les zones tropicales où cette activité contribue pour une part importante à l'économie des pays. Les palmeraies villageoises de la région du sud-est du Bénin (2°30 - 2°45 E et 6°35 - 7°45 N) sont caractérisées par différents modes de gestion des feuilles d'élagage pouvant induire des effets sur les biomasses et minéralo-masses des palmiers. Douze palmeraies villageoises appartenant à deux classes d'âge (7-11 ans et 16-19 ans) ont été choisies. Elles sont caractérisées soit par une restitution totale des feuilles d'élagage au sol en andain (mode RT) soit par une restitution nulle de ces feuilles (mode RN). Neuf palmiers ont été pris au hasard par parcelle pour des mesures de biomasse des feuilles, des régimes et du tronc. Les teneurs de N, P, K, Ca et Mg ont été déterminées dans les feuilles, les rafles et le tronc par analyse des tissus végétaux. On observe une augmentation significative du poids moyen des feuilles et des régimes ainsi que de la biomasse du tronc entre les parcelles adultes et les parcelles pré-adultes. L'augmentation du poids moyen des régimes ne compense pas la diminution du nombre de régimes par an et on constate une baisse significative de la production de régimes de fruit avec l'âge. Les modes de gestion des feuilles n'entraînent pas de différences sur la production de régime des palmeraies, ni sur la production annuelle de feuille. Les concentrations en éléments minéraux sont très variables suivant les organes du palmier. Les teneurs en N, P, Ca et Mg sont plus élevées dans la feuille alors que l'on observe les teneurs les plus élevées en potassium dans les rafles, puis dans le tronc et enfin dans les feuilles. En fonction de l'âge des palmiers, les teneurs en azote diminuent dans tous les organes. Le potassium a également diminué dans les feuilles et dans le tronc et a augmenté dans les rafles. Les plantations villageoises souffrent d'une déficience en N et en K car les teneurs en N et K des folioles sont toutes inférieures aux seuils optimaux. Cela montre la nécessité du recyclage des résidus organiques (feuilles, rafles et tronc) et d'une bonne application de fumures azotées et potassiques dans les palmeraies villageoises. Les stocks annuels de minéralo-masse dans les feuilles ont augmenté avec l'âge des palmeraies alors qu'elles ont diminué dans les rafles. Les différences ne sont pas significatives pour l'effet des modes de gestion des feuilles.

Mots-clés : pratiques culturales ; nutrition du palmier à huile ; biomasse; palmeraies villageoises.

Chapitre 7 (Pré-article) :

Développement du système racinaire du palmier à huile dans les plantations villageoises du Bénin : Effet des modes de gestion des feuilles d'élague.

Résumé

Le système racinaire du palmier a été étudié dans des palmeraies villageoises situées au sud-est du Bénin et caractérisées par différentes pratiques de gestion des feuilles d'élague des palmiers. Deux palmeraies villageoises en mode de restitution totale (RT) et deux en mode de restitution nulle (RN) des feuilles ont été choisies. Dans les palmeraies RT les feuilles sont restituées seulement sur les lignes de plantation et forment des andains ; les interlignes sont dépourvues de feuilles. Les palmeraies choisies sont toutes âgées en moyenne de 17ans. Quatre palmiers ont été choisis de façon aléatoire par parcelle. Les racines primaires (R1 : $\text{diam} \geq 4 \text{ mm}$), les racines secondaires (R2 : $1,5 \text{ mm} \leq \text{diam} < 4 \text{ mm}$) et les racines fines (RF : $\text{diam} < 1,5 \text{ mm}$), ont été étudiées dans les couches 0-20 ; 20-50 et 50-100 cm de sol, et dans la litière sous andain. Les stocks de carbone du sol ont été déterminés par profondeur. Les paramètres racinaires étudiés sont la densité racinaire (DR), la longueur racinaire (LR), la surface racinaire (SR), et la longueur spécifique racinaire ou "SRL". Les observations ont été faites dans les andains et interlignes du mode RT et dans les interlignes du mode RN. Les résultats ont montré qu'il n'existe pas une différence significative entre les paramètres racinaires des interlignes RT et RN. Sur la profondeur de 100 cm de sol, la restitution totale des feuilles en andains a augmenté significativement ($P < 0,001$) les paramètres DR, LR et SR des RF par rapport aux interlignes. Mais ces paramètres ne sont pas différents entre andains et interlignes pour les racines R1 et R2. Il existe une bonne corrélation positive entre les paramètres racinaires de chaque type de racine. Les DR et LR ont diminué de la surface vers la profondeur sous andain et dans l'interligne. L'effet de la restitution des feuilles a été très localisé sur les RF dont les paramètres de développement sous les andains sont significativement supérieurs à ceux des interlignes dans les 20 premiers centimètres du sol. Au-delà de cette profondeur, il n'existe pas de différence significative entre les paramètres de développement sous andain et dans l'interligne des trois types de racines. Le ratio SRL est en bonne corrélation avec le stock de carbone du sol seulement pour les RF. Le recyclage des feuilles d'élague a favorisé un développement important des R2 et RF dans la litière en plus de l'effet positif sur les RF dans les 20 premiers centimètres de sol sous andain. La pratique de restitution des feuilles offre des avantages aux palmiers pour l'alimentation hydrique et nutritionnelle.

Mots clés : Recyclage matière organique - Système racinaire - Specific Root Length - Palmeraies villageoises - Bénin.

Annexe 2. Indicateurs des modèles de prédiction des paramètres du sol

CAL : 101 éch									VAL : 30 éch				
Constituent	N	Mean	SD	SEC	RSQ	SECV	1-VR	RPDc	SEP	R ²	RPDv	SEP%	Pré-traitement
C_mg	95	7.66	7.31	1.34	0.97	1.50	0.96	4.9	2.74	0.91	3.0	31	Sdt MSC 0011
N_mg	94	0.60	0.42	0.09	0.95	0.11	0.93	3.8	0.20	0.89	2.6	33	Sdt MSC 0011
C/N	101	11.68	2.93	1.12	0.85	1.16	0.84	2.5	2.11	0.34	1.1	15	SNV 1441
pH_eau	99	5.81	0.53	0.23	0.81	0.28	0.71	1.9	0.24	0.72	1.9	4	Detrend 1441
pH_KCl	99	5.28	0.64	0.25	0.85	0.30	0.77	2.1	0.32	0.69	1.8	6	Detrend 1441
P_Olsen	95	2.34	1.60	0.43	0.93	0.55	0.88	2.9	0.37	0.93	3.6	12	SNV 1441
Ca_ech	94	2.70	1.32	0.33	0.94	0.44	0.89	3.0	0.68	0.87	2.5	24	Sdt MSC 1441
Mg_ech	95	1.04	0.70	0.23	0.89	0.29	0.83	2.5	0.39	0.78	2.1	34	Sdt MSC 1441
K_ech	93	0.04	0.04	0.01	0.88	0.02	0.76	2.1	0.01	0.80	2.1	30	SNV 1441
Somme	95	3.94	2.25	0.61	0.93	0.76	0.89	3.0	0.88	0.90	2.9	22	Sdt MSC 0011
CEC	96	4.41	1.62	0.54	0.89	0.63	0.85	2.5	1.043	0.796	2.1	23	SNV 0011
Argile	98	9.94	5.64	2.90	0.74	4.05	0.49	1.4	5.17	0.84	2.1	33	None 1441
Sable	93	77.83	9.42	3.02	0.90	3.32	0.87	2.8	7.972	0.553	1.4	11	Detrend 1441

Annexe 3. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone : Chapitre 4

Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone de 200 kg.m⁻² de masse de terre équivalente : Test de l'effet des facteurs "classe d'âge", "mode de gestion des feuilles" et "positions" et de leurs interactions.

Moyennes des moindres carrés

id_class	mode_gestion_feuil	Position	Valeur estimée	Erreur type	DDL	Valeur du test t	Pr > t
4_6	RN	andain	16.2154	2.0720	19.5	7.83	<.0001
4_6	RN	interligne	16.6159	2.0720	19.5	8.02	<.0001
7_12	RN	andain	20.3143	2.6749	19.5	7.59	<.0001
7_12	RN	interligne	19.8396	2.6749	19.5	7.42	<.0001
13_20	RN	andain	15.8342	2.6749	19.5	5.92	<.0001
13_20	RN	interligne	20.5700	2.6749	19.5	7.69	<.0001
7_12	RT	andain	20.2180	2.6749	19.5	7.56	<.0001
7_12	RT	interligne	15.7312	2.6749	19.5	5.88	<.0001
13_20	RT	andain	26.9493	1.9603	21.8	13.75	<.0001
13_20	RT	interligne	17.4907	1.8914	19.5	9.25	<.0001
> 20	RT	andain	32.3202	3.9049	32.6	8.28	<.0001
> 20	RT	interligne	15.1629	3.2761	19.5	4.63	0.0002

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Age	3	16.7	0.74	0.5432
Gestion Feuilles	1	15.9	0.16	0.6924
Age*Gestion	1	15.9	1.66	0.2164
Position	1	42.4	35.73	<.0001
Age*Position	3	41.4	3.82	0.0167
Gestion*Position	1	40.5	32.29	<.0001
Ages*Gestion*Position	1	40.5	10.10	0.0028

Test des différences entre Ages par Tranche

mode_ gestion_ feuil	Position	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
RN	andain	2	19.5	0.92	0.4149
RN	interligne	2	19.5	0.84	0.4480
RT	andain	2	24.6	3.74	0.0383
RT	interligne	2	19.5	0.26	0.7738

Test des différences entre modes de gestion des feuilles par Tranche

id_class	Position	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
7_12	andain	1	19.5	0.00	0.9800
7_12	interligne	1	19.5	1.18	0.2907
13_20	andain	1	20.3	11.23	0.0031
13_20	interligne	1	19.5	0.88	0.3588

Test des différences entre positions par Tranche

id_class	mode_ gestion_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
4_6	RN	1	40.3	0.09	0.7613
7_12	RN	1	40.3	0.08	0.7803
13_20	RN	1	40.3	7.85	0.0078
7_12	RT	1	40.3	7.05	0.0113
13_20	RT	1	41.5	52.81	<.0001
> 20	RT	1	43.8	33.44	<.0001

Test de l'interaction Age x Position pour chaque Mode de gestion

mode_ gestion_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
RN	5	37.9	1.81	0.1335
RT	5	38.7	18.43	<.0001

Test de l'interaction Age x Mode de Gestion pour chaque Position

Position	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
andain	5	21.6	5.35	0.0024
interligne	5	19.5	0.64	0.6714

Test de l'interaction Mode de Gestion x Position pour chaque Age

Age	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
4_6	1	40.3	0.09	0.7613
7_12	3	37.5	2.43	0.0802
13_20	3	37.8	20.12	<.0001
> 20	1	43.8	33.44	<.0001

Annexe 4-1. Résultats d'analyse de variance des stocks de carbone et d'azote. Chapitre 5.2.

Stock C

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Age	1	7.36	6.25	0.0394
Gestion_feuil	1	7.68	1.98	0.1984
Age*Gestion	1	7.68	15.42	0.0047
Position	1	93.6	89.90	<.0001
Age*Position	1	93.6	47.09	<.0001

Test des Effets par Tranche

Age	feuil	Gestion Position	Num.	DDL Res.	DDL F	Valeur Pr > F
	RN	interligne	1	8.85	1.84	0.2083
	RT	andain	1	8.85	42.78	0.0001
	RT	interligne	1	8.85	2.15	0.1776
16-19	RN		0	.	.	.
16-19	RT		1	93.6	133.56	<.0001
7_11	RN		0	.	.	.
7_11	RT		1	93.6	3.43	0.0672

Stock d'azote

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Age	1	7.44	2.97	0.1261
Gestion_feuil	1	7.61	0.63	0.4525
Age*Gestion	1	7.61	7.25	0.0287
Position	1	93.6	67.16	<.0001
Age*Position	1	93.6	39.96	<.0001

Test des Effets par Tranche

Effet	id_class	Gestion feuil	Position	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
		RN	interligne	1	8.25	0.87	0.3772
		RT	andain	1	8.25	20.91	0.0017
		RT	interligne	1	8.25	1.05	0.3354
	16-19	RN		0	.	.	.
	16-19	RT		1	93.6	105.37	<.0001
	7_11	RN		0	.	.	.
	7_11	RT		1	93.6	1.76	0.1884

Annexe 4-2. Résultats d'analyse de variance des poids des fractions organiques (Pfrac), des teneurs en carbone (Csol) et en azote du sol (Nsol), de la biomasse microbienne et de la respiration du sol.
Chapitre 5.3

Pfrac

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
prof	1	1244	1244	0.746	0.3906	
position	1	1798	1798	1.077	0.3027	
fract	3	612788	204263	122.384	<2e-16	***
prof:position	1	6157	6157	3.689	0.0586	
prof:fract	3	14105	4702	2.817	0.0448	*
position:fract	3	1882	627	0.376	0.7706	
prof:position:fract	3	5054	1685	1.009	0.3934	
Residuals	75	125177	1669			

Csol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
prof	1	260.3	260.29	37.478	1.59e-08	***
position	1	63.5	63.48	9.141	0.00314	**
fract	5	569.4	113.88	16.398	5.82e-12	***
prof:position	1	31.8	31.84	4.585	0.03455	*
prof:fract	5	168.9	33.78	4.865	0.00048	***
position:fract	5	101.0	20.19	2.907	0.01685	*
prof:position:fract	5	31.3	6.26	0.902	0.48293	
Residuals	106	736.2	6.95			

Nsol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
prof	1	0.900	0.8999	28.349	5.71e-07	***
position	1	0.079	0.0793	2.498	0.11697	
fract	5	3.740	0.7480	23.566	7.35e-16	***
prof:position	1	0.063	0.0631	1.987	0.16156	
prof:fract	5	0.658	0.1316	4.147	0.00176	**
position:fract	5	0.167	0.0334	1.051	0.39176	
prof:position:fract	5	0.093	0.0187	0.588	0.70877	
Residuals	106	3.365	0.0317			

Biomasse microbienne

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
prof	3	336432	112144	8.885	0.000174	***
Position	1	108085	108085	8.563	0.006075	**
prof:Position	3	91604	30535	2.419	0.083120	
Residuals	34	429154	12622			

Respiration du sol

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
prof	3	11.959	3.986	7.675	0.000532	***
position	1	5.519	5.519	10.625	0.002647	**
prof:position	3	3.303	1.101	2.120	0.117156	
Residuals	32	16.621	0.519			

Annexe 5. Résultats d'analyse de variance des paramètres de production de biomasse et de minéralo-masse aérienne. Chapitre 6.4.

Biomasse totale de feuilles (kg/an)

Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age	1	8	0.44	0.5257
Gest_feuil	1	8	0.08	0.7821
Class_age*Gest_feuil	1	8	1.95	0.2001

Moyenne générale	Erreur type
58.9715	3.6679

Moyennes par traitement

Effet	Class_age	Gest_ feuil	Valeur estimée	Erreur type
Class_age	13_20		61.4046	5.1871
Class_age	7_12		56.5383	5.1871
Gest_feuil		RN	60.0208	5.1871
Gest_feuil		RT	57.9221	5.1871
Class_age*Gest_feuil	13_20	RN	57.3324	7.3357
Class_age*Gest_feuil	13_20	RT	65.4768	7.3357

Class_age*Gest_feuil	7_12	RN	62.7093	7.3357
Class_age*Gest_feuil	7_12	RT	50.3674	7.3357

Test des Effets par Tranche

Effet	Class_age	Gest_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age*Gest_feuil		RN	1	8	0.27	0.6183
Class_age*Gest_feuil		RT	1	8	2.12	0.1834
Class_age*Gest_feuil	13_20		1	8	0.62	0.4550
Class_age*Gest_feuil	7_12		1	8	1.42	0.2683

Poids sec moyenne d'une feuille (kg)

Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age	1	8	12.17	0.0082
Gest_feuil	1	8	1.56	0.2474
Class_age*Gest_feuil	1	8	0.28	0.6116

Moyenne
générale Erreur
type

2.8036 0.1012

Moyennes par traitement

Effet	Class_age	Gest_feuil	Valeur estimée	Erreur type
Class_age	13_20		3.1566	0.1431
Class_age	7_12		2.4506	0.1431
Gest_feuil		RN	2.6773	0.1431
Gest_feuil		RT	2.9299	0.1431
Class_age*Gest_feuil	13_20	RN	2.9769	0.2024
Class_age*Gest_feuil	13_20	RT	3.3364	0.2024
Class_age*Gest_feuil	7_12	RN	2.3778	0.2024
Class_age*Gest_feuil	7_12	RT	2.5234	0.2024

Test des Effets par Tranche

Effet	Class_age	Gest_feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age*Gest_feuil		RN	1	8	4.38	0.0697
Class_age*Gest_feuil		RT	1	8	8.07	0.0218
Class_age*Gest_feuil	13_20		1	8	1.58	0.2446
Class_age*Gest_feuil	7_12		1	8	0.26	0.6247

Production de regim (kg/an)

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age	1	7	7.00	0.0331
Gest_feuil	1	7	0.19	0.6728
Class_age*Gest_feuil	1	7	0.14	0.7151

Moyennes des moindres carrés

Effet	Class_age	Gest_ feuil	Valeur estimée	Erreur type	DDL	Valeur du test t	Pr > t
Class_age*Gest_feuil	13_20	RN	44.7654	8.2784	7	5.41	0.0010
Class_age*Gest_feuil	13_20	RT	44.2346	8.2784	7	5.34	0.0011
Class_age*Gest_feuil	7_12	RN	71.3347	8.2784	7	8.62	<.0001
Class_age*Gest_feuil	7_12	RT	64.1275	10.1389	7	6.32	0.0004

Test des Effets par Tranche

Effet	Class_age	Gest_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age*Gest_feuil		RN	1	7	5.15	0.0575
Class_age*Gest_feuil		RT	1	7	2.31	0.1724
Class_age*Gest_feuil	13_20		1	7	0.00	0.9651
Class_age*Gest_feuil	7_12		1	7	0.30	0.5990

Nombre de feuilles émises ar an

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age	1	8	1.90	0.2050
Gest_feuil	1	8	1.34	0.2797
Class_age*Gest_feuil	1	8	1.62	0.2390

Moyennes des moindres carrés

Effet	Class_age	Gest_ feuil	Valeur estimée	Erreur type	DDL	Valeur du test t	Pr > t
Class_age*Gest_feuil	13_20	RN	19.3982	2.7048	8	7.17	<.0001
Class_age*Gest_feuil	13_20	RT	19.7031	2.7048	8	7.28	<.0001
Class_age*Gest_feuil	7_12	RN	23.7718	2.7048	8	9.82	<.0001
Class_age*Gest_feuil	7_12	RT	19.9941	2.7048	8	7.39	<.0001

Test des Effets par Tranche

Effet	Class_age	Gest_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age*Gest_feuil		RN	1	8	3.52	0.0976
Class_age*Gest_feuil		RT	1	8	0.01	0.9412
Class_age*Gest_feuil	13_20		1	8	0.01	0.9384
Class_age*Gest_feuil	7_12		1	8	2.96	0.1238

Nfleur_par_an

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age	1	8.02	11.56	0.0093
Gest_feuil	1	8.02	1.98	0.1966
Class_age*Gest_feuil	1	8.02	1.89	0.2066

Moyennes des moindres carrés

Effet	Class_age	Gest_ feuil	Valeur estimée	Erreur type	DDL	Valeur du test t	Pr > t
Class_age*Gest_feuil	13_20	RN	2.7567	1.0788	7.95	2.56	0.0341
Class_age*Gest_feuil	13_20	RT	2.7196	1.0788	7.95	2.52	0.0359
Class_age*Gest_feuil	7_12	RN	7.9176	1.0788	7.95	7.34	<.0001
Class_age*Gest_feuil	7_12	RT	4.9091	1.0882	8.22	4.51	0.0018

Test des Effets par Tranche

Effet	Class_age	Gest_ feuil	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
Class_age*Gest_feuil		RN	1	7.95	11.44	0.0097
Class_age*Gest_feuil		RT	1	8.08	2.04	0.1905
Class_age*Gest_feuil	13_20		1	7.95	0.00	0.9812
Class_age*Gest_feuil	7_12		1	8.08	3.85	0.0848

Teneur en éléments minéraux : %K

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_age	1	7.82	0.16	0.7020
Gestion_feuil	1	7.82	0.50	0.5011
class_age*Gestion_fe	1	7.82	0.01	0.9228
Organe	4	31.1	201.99	<.0001
class_age*Organe	4	31.1	1.90	0.1347
Gestion_feuil*Organe	4	31.1	0.78	0.5469
class_*Gestio*Organe	4	31.1	0.67	0.6172

Test de l'Effet du MODE De GESTION par Tranche

Effet	class_age	Organe	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_*Gestio*Organe	07-11	FOLIOLE	1	37.4	0.00	0.9870
class_*Gestio*Organe	07-11	PETIOLE	1	37.4	0.01	0.9259
class_*Gestio*Organe	07-11	RACHIS	1	37.4	0.12	0.7345
class_*Gestio*Organe	07-11	RAFLE	1	38.3	0.23	0.6346
class_*Gestio*Organe	07-11	TRONC	1	37.4	2.09	0.1571
class_*Gestio*Organe	16-19	FOLIOLE	1	37.4	0.00	0.9701
class_*Gestio*Organe	16-19	PETIOLE	1	37.4	0.01	0.9052
class_*Gestio*Organe	16-19	RACHIS	1	37.4	0.05	0.8168
class_*Gestio*Organe	16-19	RAFLE	1	37.4	3.60	0.0655
class_*Gestio*Organe	16-19	TRONC	1	37.4	0.13	0.7235

GROUPES HOMOGENES SELON LE TEST DE TUKEY

TRAITEMENT	MOYENNE	—	—	—
RAFLE-16-19	2.710	a		
RAFLE-07-11	2.678	a		
TRONC-07-11	0.799		b	
TRONC-16-19	0.462		b	c
FOLIOLE-07-11	0.459		b	c
RACHIS-16-19	0.402		b	c
FOLIOLE-16-19	0.387		b	c
PETIOLE-16-19	0.386		b	c
RACHIS-07-11	0.307			c
PETIOLE-07-11	0.258			c

Teneur en éléments minéraux : %Ca

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_age	1	8.2	1.24	0.2966
Gestion_feuil	1	8.2	0.04	0.8557
class_age*Gestion_fe	1	8.2	1.33	0.2812
Organe	4	31.4	176.98	<.0001
class_age*Organe	4	31.4	2.40	0.0710
Gestion_feuil*Organe	4	31.4	0.47	0.7538
class_*Gestio*Organe	4	31.4	1.14	0.3538

Test de l'Effet du MODE De GESTION par Tranche

Effet	class_age	Organe	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_*Gestio*Organe	07-11	FOLIOLE	1	37	0.32	0.5748
class_*Gestio*Organe	07-11	PETIOLE	1	37	0.40	0.5329
class_*Gestio*Organe	07-11	RACHIS	1	37	1.78	0.1903
class_*Gestio*Organe	07-11	RAFLE	1	38.1	0.21	0.6496
class_*Gestio*Organe	07-11	TRONC	1	37	0.20	0.6591
class_*Gestio*Organe	16-19	FOLIOLE	1	37	3.16	0.0835
class_*Gestio*Organe	16-19	PETIOLE	1	37	0.22	0.6427
class_*Gestio*Organe	16-19	RACHIS	1	37	0.73	0.3982
class_*Gestio*Organe	16-19	RAFLE	1	37	0.76	0.3888
class_*Gestio*Organe	16-19	TRONC	1	37	0.13	0.7223

GROUPES HOMOGENES SELON LE TEST DE TUKEY

TRAITEMENT	MOYENNE	—	—	—
FOLIOLE-16-19	0.876	a		
FOLIOLE-07-11	0.848	a		
PETIOLE-16-19	0.520		b	
PETIOLE-07-11	0.501		b	
RACHIS-07-11	0.485		b	
RACHIS-16-19	0.476		b	
TRONC-07-11	0.291			c
RAFLE-07-11	0.258			c
RAFLE-16-19	0.215			c
TRONC-16-19	0.172			c

Teneur en éléments minéraux : %Mg

Type 3 Tests des effets fixes

Effet	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_age	1	7.78	0.73	0.4189
Gestion_feuil	1	7.78	0.05	0.8355
class_age*Gestion_fe	1	7.78	5.94	0.0416
Organe	4	30.9	52.55	<.0001
class_age*Organe	4	30.9	1.29	0.2966
Gestion_feuil*Organe	4	30.9	1.19	0.3358
class_*Gestio*Organe	4	30.9	1.51	0.2243

Test de l'Effet du MODE De GESTION par Tranche

Effet	class_age	Organe	DDL Num.	DDL Res.	Valeur F	Pr > F
class_*Gestio*Organe	07-11	FOLIOLE	1	25.9	0.87	0.3609
class_*Gestio*Organe	07-11	PETIOLE	1	25.9	1.15	0.2941
class_*Gestio*Organe	07-11	RACHIS	1	25.9	2.19	0.1507
class_*Gestio*Organe	07-11	RAFLE	1	30.2	2.19	0.1490
class_*Gestio*Organe	07-11	TRONC	1	25.9	0.15	0.7030
class_*Gestio*Organe	16-19	FOLIOLE	1	25.9	2.36	0.1367
class_*Gestio*Organe	16-19	PETIOLE	1	25.9	5.75	0.0240
class_*Gestio*Organe	16-19	RACHIS	1	25.9	6.67	0.0158
class_*Gestio*Organe	16-19	RAFLE	1	25.9	0.08	0.7806
class_*Gestio*Organe	16-19	TRONC	1	25.9	0.10	0.7575

GROUPES HOMOGENES SELON LE TEST DE TUKEY

TRAITEMENT	MOYENNE	—	—	—	—
PETIOLE-07-11	0.510	a			
PETIOLE-16-19	0.471	a	b		
FOLIOLE-16-19	0.470	a	b		
FOLIOLE-07-11	0.458	a	b		
RACHIS-16-19	0.427	a	b		
RACHIS-07-11	0.419	a	b		
RAFLE-07-11	0.347		b	c	
RAFLE-16-19	0.271			c	d
TRONC-07-11	0.232				d
TRONC-16-19	0.212				d

Minéralo-masse aérienne : test des effets par classe d'âge et par mode de gestion des feuilles

Organe	Variable	Moyenne Générale	Classe d'âge 7-11 ans					Classe d'âge 16-19 ans				
			Moyenne	Moy. RN	Moy. RT	F RN=RT	P RN=RT	Moyenne	Moy. RN	Moy. RT	F RN=RT	P RN=RT
FOLIOLE	Cafeuil_g	4.544	3.541	3.278	3.804	0.490	0.5036	5.547	5.321	5.773	0.364	0.5631
FOLIOLE	Camass_an_kg	0.094	0.080	0.084	0.076	0.246	0.6329	0.108	0.102	0.113	0.463	0.5154
FOLIOLE	Kfeuil_g	2.213	1.944	1.820	2.068	0.256	0.6263	2.481	2.216	2.747	1.172	0.3106
FOLIOLE	Kmass_an_kg	0.047	0.045	0.048	0.042	0.252	0.6290	0.048	0.043	0.054	0.816	0.3927
FOLIOLE	Mgfeuil_g	2.438	1.903	1.692	2.113	0.818	0.3922	2.972	2.967	2.978	0.001	0.9816
FOLIOLE	Mgmass_an_kg	0.050	0.043	0.044	0.042	0.091	0.7700	0.057	0.057	0.058	0.007	0.9369
FOLIOLE	Nfeuil_g	9.437	8.129	7.911	8.347	0.038	0.8507	10.744	9.617	11.872	1.008	0.3447
FOLIOLE	Nmass_an_kg	0.198	0.186	0.206	0.167	0.511	0.4949	0.210	0.185	0.235	0.838	0.3867
FOLIOLE	Pfeuil_g	0.659	0.550	0.512	0.587	0.357	0.5668	0.768	0.727	0.808	0.411	0.5395
FOLIOLE	Pmass_an_kg	0.014	0.012	0.013	0.012	0.284	0.6087	0.015	0.014	0.016	0.409	0.5405
PETIOLE	Cafeuil_g	2.759	2.122	1.953	2.290	0.170	0.6913	3.396	3.192	3.601	0.249	0.6310
PETIOLE	Camass_an_kg	0.057	0.048	0.050	0.046	0.067	0.8027	0.066	0.061	0.071	0.332	0.5805
PETIOLE	Kfeuil_g	1.807	1.108	1.016	1.199	0.095	0.7652	2.506	2.183	2.829	1.194	0.3063
PETIOLE	Kmass_an_kg	0.037	0.026	0.027	0.025	0.028	0.8707	0.049	0.042	0.056	1.044	0.3369
PETIOLE	Mgfeuil_g	2.551	2.121	1.878	2.363	1.107	0.3235	2.981	3.131	2.830	0.431	0.5300
PETIOLE	Mgmass_an_kg	0.053	0.048	0.049	0.046	0.090	0.7720	0.058	0.060	0.055	0.276	0.6133
PETIOLE	Nfeuil_g	1.332	1.075	1.074	1.077	0.000	0.9939	1.588	1.329	1.848	1.851	0.2107
PETIOLE	Nmass_an_kg	0.028	0.025	0.028	0.022	0.535	0.4854	0.031	0.025	0.037	1.454	0.2623
PETIOLE	Pfeuil_g	0.181	0.129	0.116	0.142	0.596	0.4623	0.232	0.234	0.230	0.017	0.8984
PETIOLE	Pmass_an_kg	0.004	0.003	0.003	0.003	0.064	0.8068	0.005	0.005	0.005	0.000	0.9973
RACHIS	Cafeuil_g	2.843	2.302	2.026	2.578	1.235	0.2988	3.385	3.202	3.568	0.541	0.4829
RACHIS	Camass_an_kg	0.058	0.051	0.051	0.051	0.000	0.9883	0.066	0.062	0.070	0.629	0.4505
RACHIS	Kfeuil_g	2.224	1.492	1.250	1.734	0.335	0.5787	2.956	2.496	3.416	1.208	0.3036
RACHIS	Kmass_an_kg	0.046	0.034	0.034	0.035	0.003	0.9563	0.058	0.048	0.068	1.087	0.3277
RACHIS	Mgfeuil_g	2.456	1.948	1.649	2.248	2.467	0.1549	2.964	3.150	2.779	0.946	0.3592
RACHIS	Mgmass_an_kg	0.050	0.043	0.043	0.044	0.041	0.8453	0.057	0.061	0.054	1.229	0.2998
RACHIS	Nfeuil_g	1.339	1.089	1.036	1.141	0.152	0.7067	1.588	1.356	1.821	2.976	0.1228
RACHIS	Nmass_an_kg	0.028	0.025	0.027	0.023	0.435	0.5281	0.031	0.026	0.036	1.883	0.2073

RACHIS	Pfeuil_g	0.228	0.170	0.155	0.184	0.442	0.5248	0.287	0.289	0.284	0.013	0.9111
RACHIS	Pmass_an_kg	0.005	0.004	0.004	0.004	0.125	0.7329	0.006	0.006	0.006	0.002	0.9642
TOTFEUI	Cafeuil_g	10.146	7.964	7.257	8.672	0.515	0.4935	12.328	11.715	12.942	0.387	0.5512
TOTFEUI	Camass_an_kg	0.209	0.179	0.185	0.173	0.083	0.7807	0.239	0.225	0.254	0.473	0.5112
TOTFEUI	Kfeuil_g	6.244	4.544	4.087	5.002	0.242	0.6357	7.943	6.895	8.992	1.272	0.2920
TOTFEUI	Kmass_an_kg	0.130	0.105	0.109	0.101	0.029	0.8687	0.156	0.132	0.179	1.047	0.3361
TOTFEUI	Mgfeuil_g	7.444	5.972	5.220	6.724	1.495	0.2563	8.917	9.248	8.586	0.289	0.6052
TOTFEUI	Mgmass_an_kg	0.153	0.134	0.136	0.132	0.033	0.8602	0.172	0.178	0.166	0.229	0.6448
TOTFEUI	Nfeuil_g	12.107	10.293	10.021	10.566	0.036	0.8549	13.921	12.302	15.540	1.261	0.2941
TOTFEUI	Nmass_an_kg	0.254	0.237	0.262	0.211	0.509	0.4958	0.272	0.236	0.308	1.002	0.3460
TOTFEUI	Pfeuil_g	1.068	0.848	0.783	0.913	0.505	0.4977	1.287	1.251	1.323	0.151	0.7075
TOTFEUI	Pmass_an_kg	0.022	0.019	0.020	0.018	0.229	0.6449	0.025	0.024	0.026	0.172	0.6893
RAFLE	Carégime_g	4.450	4.043	3.279	4.806	2.884	0.1333	4.857	4.311	5.403	1.841	0.2169
RAFLE	Camass_an_kg	0.019	0.025	0.025	0.025	0.003	0.9602	0.013	0.012	0.015	0.376	0.5592
RAFLE	Krégime_g	51.720	42.026	37.654	46.397	0.643	0.4489	61.414	66.060	56.768	0.908	0.3724
RAFLE	Kmass_an_kg	0.215	0.264	0.289	0.239	0.372	0.5613	0.166	0.181	0.151	0.168	0.6945
RAFLE	Mgrégime_g	5.626	5.124	3.986	6.262	4.344	0.0756	6.128	5.989	6.268	0.082	0.7829
RAFLE	Mgmass_an_kg	0.025	0.033	0.032	0.033	0.027	0.8748	0.016	0.016	0.016	0.000	0.9912
RAFLE	Nrégime_g	15.701	12.624	10.945	14.304	1.318	0.2886	18.778	16.307	21.250	3.567	0.1009
RAFLE	Nmass_an_kg	0.065	0.078	0.081	0.074	0.189	0.6769	0.052	0.045	0.059	0.843	0.3890
RAFLE	Prégime_g	2.058	1.712	1.359	2.065	1.976	0.2026	2.404	2.378	2.430	0.014	0.9106
RAFLE	Pmass_an_kg	0.008	0.010	0.010	0.010	0.000	0.9831	0.006	0.006	0.006	0.000	0.9916
TRONC	Ca	245.463	179.746	144.567	214.926	1.827	0.2134	311.180	236.697	385.662	8.191	0.0211
TRONC	K	677.133	511.131	454.318	567.944	0.237	0.6395	843.134	621.217	1065.052	3.615	0.0938
TRONC	Mg	264.342	152.646	106.738	198.555	2.187	0.1774	376.038	322.634	429.442	2.959	0.1237
TRONC	N	416.200	281.525	256.468	306.582	0.074	0.7920	550.875	353.652	748.098	4.605	0.0642
TRONC	P	50.949	33.995	29.336	38.653	0.945	0.3594	67.904	55.730	80.077	6.456	0.0347

Annexe 6. Résultats d'analyse de variance des variables de développement racinaire sur l'horizon 0-100 cm. Chapitre 7

Densité racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Zone	1	0.88	0.877	1.715	0.191708	
Root_type	3	34.64	11.547	22.589	9.91e-13	***
Zone:Root_type	3	11.17	3.724	7.285	0.000113	***
Residuals	212	108.36	0.511			

Densité racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RN

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Root_type	3	16.18	5.392	9.979	5.28e-06	***
Residuals	140	75.66	0.540			

Densité racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT et RN en zone interligne.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Zone	1	0.15	0.154	0.354	0.553	
Root_type	3	26.27	8.757	20.132	1.27e-11	***
Zone:Root_type	3	0.35	0.118	0.270	0.847	
Residuals	230	100.04	0.435			

Longueur racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Zone	1	158	158	1.515	0.22014	
Root_type	2	22212	11106	106.320	< 2e-16	***
Zone:Root_type	2	1596	798	7.641	0.00068	***
Residuals	158	16505	104			

Longueur racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RN

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Root_type	2	14392	7196	33.8	6.11e-12	***
Residuals	100	21289	213			

Longueur racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT et RN en zone interligne.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Zone	1	9	9	0.062	0.804
Root_type	2	18626	9313	62.168	<2e-16 ***
Zone:Root_type	2	847	424	2.828	0.062
Residuals	167	25017	150		

Surface racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Zone	1	0.00457	0.004566	4.935	0.027741 *
Root_type	2	0.03056	0.015278	16.512	3.08e-07 ***
Zone:Root_type	2	0.01673	0.008367	9.043	0.000191 ***
Residuals	158	0.14619	0.000925		

surface racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RN

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Root_type	2	0.00346	0.001730	1.383	0.256
Residuals	100	0.12511	0.001251		

Surface racinaire 0-100 cm: mode de gestion feuille RT et RN en zone interligne.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Zone	1	0.01010	0.010105	9.195	0.00281 **
Root_type	2	0.02203	0.011015	10.023	7.75e-05 ***
Zone:Root_type	2	0.01413	0.007063	6.427	0.00205 **
Residuals	167	0.18353	0.001099		