



REPUBLIQUE DU BENIN

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET DE L'EAU

Formation Doctorale : Sciences et Techniques de Production Végétale

Option : Santé des sols

Spécialité : Agronomie et sciences du sol

Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi



Thème

Evaluation multicritère de systèmes agroforestiers : cas des associations de cultures annuelles avec des palmiers à huile en phase immature sur le plateau d'Allada au sud du Bénin



Réalisée par : **Hermione K. I. KOUSSIHOUËDE**

Et soutenue publiquement le **19 novembre 2020**

Président du Jury : Prof. Romain GLELE KAKAÏ, Professeur Titulaire, FSA-UAC, Bénin.

Directeur de thèse : Prof. Guillaume Lucien AMADJI, Professeur Titulaire, FSA-UAC, Bénin.

Rapporteur : Prof. Jean SOGBEDJI, Professeur Titulaire, Université de Lomé, Togo.

Rapporteur : Dr. Adolphe ADJANOHOOUN, Directeur de recherche, INRAB, Bénin.

Rapporteur : Prof. Moussa BARAGE, Professeur Titulaire, Université Abdou Moumouni, Niger.

Examineur : Prof. Aliou SAÏDOU, Professeur Titulaire, FSA-UAC, Bénin.

Examineur : Dr. Hervé AHOLOUKPE, Maître de Recherche, CRAPP/INRAB, Bénin.

Invitée : Dr. Cathy CLERMONT-DAUPHIN, Chargée de recherche, UMR Eco et sols, IRD, France.

Invité : Dr. Sylvain RAFFLEGEAU, Chargé de recherche, UMR innovations, CIRAD, France.

Année Académique : 2019-2020

Cette thèse a été financée par l’Institut de la Recherche et du Développement à travers les guichets « Allocation pour une Recherche et Thèse au Sud (ARTS) » et « Jeunes Equipes Associées à l’IRD (JEAI) ».



*A Papa et Maman,
A James, Océane et Auriane.*

REMERCIEMENTS



De l'antiquité à nos jours, des palmes d'or aux palmes académiques, les palmes, insignes d'honneur et de reconnaissance, sont décernées.

A mon tour d'en offrir à toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration du projet de recherche, à sa réalisation et à son évaluation ; qui m'ont aidée, stimulée et soutenue à la fois sur le plan scientifique, moral et logistique...

Cette thèse prend corps dans le projet de recherche « Services écosystémiques des systèmes agroforestiers villageois à base de palmier à huile en Afrique soudano-guinéenne (JEA Servipalm, www.ird.fr) », une collaboration entre plusieurs institutions sur la période 2017-2019. Il s'agit de :

- **l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD)** à travers ses programmes : « Allocation de recherche pour une thèse au Sud (ARTS) » et « Jeunes équipes associées à l'IRD (JEA) » ;
- **l'Unité Mixte de Recherche "Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols et Agro-Ecosystèmes" (UMR Eco & Sols)** ;
- **l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB)**, par l'entremise du Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP) ;
- **la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (FSA/UAC).**

Je voudrais remercier les responsables de ces administrations, qui, par leurs décisions ont permis la concrétisation de cette thèse. *Mesdames / Messieurs, à vous mes palmes !*

Je voudrais tout d'abord remercier mon mentor de toujours, celui au début et à la fin de ce projet, le **Docteur Hervé Aholoukpè** (Maître de Recherches au CAMES, actuel directeur du Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP)). Vous avez été là à toutes les étapes de ma vie académique : membre de mes jurys de soutenances de licence et de master. Vous avez cru en moi. C'est de vous la graine qui aboutit aujourd'hui au palmier « scientifique » qu'est cette thèse. C'est vous qui avez créé les synergies, organisé les actions autour de ce projet malgré vos multiples occupations. Vous avez fait preuve d'une attention particulière et d'un grand sens de responsabilité qui forcent mon respect et mon admiration. Je ne vous oublierai jamais. *Recevez aujourd'hui ces palmes que je vous offre avec déférence !*

Au **Professeur Guillaume Amadji** (Professeur titulaire des Universités du CAMES), mon directeur de thèse. Vous êtes pour mon « Papa scientifique ». Je vous ai connu, j'avais encore 17 ans, fraîchement bachelière, presque ingénue. Votre cours de pédologie m'a donné goût aux sciences du sol. Tel un père, vous m'y avez initié. Et depuis ce temps, vous êtes là pour moi, à m'élever aussi bien scientifiquement qu'humainement. 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. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Au **Docteur Cathy Clermont-Dauphin** (Chargée de Recherche à l'UMR Eco & Sols de Montpellier), mon encadrante principale, ma « maman scientifique ». Vous avez accepté maintenir cette opportunité de thèse pendant que rien au départ n'aurait d'une fin heureuse. Vous m'avez fait confiance sans même me connaître ! Je me souviens des séances de travail qu'on tenait dans votre bureau à Dakar au début de cette thèse, où vous avez changé ma vision agronomique. Vous m'avez initié au raisonnement systémique. Vous avez toujours prêté oreille à mes préoccupations scientifiques. Je me souviens aussi de vos mots « *Hermione, surtout fait toi confiance !* » à la fin de mon premier stage au Sénégal. Tel un credo, ces mots m'ont porté dans mes moments de doute et de faiblesse. J'ai été honorée de faire ce chemin à votre côté. Recevez mes sincères remerciements. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Au **Docteur Bernard Barthès**, (Ingénieur de Recherche à l'UMR Eco & Sols de Montpellier, Correspondant IRD de cette JEAI), vous avez donné de votre crédit pour le maintien de cette opportunité de thèse, vous avez accepté ce pari. Vos hautes expériences scientifiques et managériales ont fortement contribué à l'aboutissement de ce travail. Vous avez su me faire profiter lors de nos réunions de vos savoirs dans le but de m'aider au mieux dans la conduite de mes travaux. Je tiens également à saluer votre contribution pour la relecture minutieuse et avertie de mes articles. Je vous témoigne toute ma reconnaissance. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Mes vifs remerciements vont également à l'endroit de monsieur **Bernard Dubos**. Sa contribution, ses suggestions et avis d'expert du palmier à huile m'ont été d'un appui précieux dans la conduite de cette thèse. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Mes remerciements au **Docteur Lydie Chapuis-Lardy**. En votre qualité de coordinatrice du projet << *Beyond climate, soil C sequestration to sustain family farming in the Tropics (SoCa)* >> (financé par la fondation BNP Paribas et porté par l'IRD), vous m'avez fait profiter de moult facilités financières. Merci pour votre soutien et votre sollicitude. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Mes remerciements au **Docteur Laurent Cournac** précédemment directeur du Laboratoire Mixte de recherche « Intensification Ecologique des Sols (LMI IESOL) » pour la qualité de l'accueil dans les locaux dudit laboratoire. *Avec respect, recevez mes palmes !*

J'adresse ma reconnaissance à tous les membres de mon comité de thèse. Il s'agit du **Professeur Romain Glèlè Kakaï**, du **Professeur Euloge K. Agbossou** et du **Docteur Augustin Aoudji**. Merci à tous pour vos contributions à l'amélioration des travaux. *Avec respect, recevez mes palmes !*

Mes remerciements à **Jérémie Adjibodou**, **Haniel Hinkati**, **Alexandre Sèvi**, vous avez été les chevilles ouvrières de ce travail. Soyez-en remercié.

J'exprime toute ma gratitude aux **Docteurs Valère Salako**, **Ulrich Allé** et **Mathieu Hounsou** pour leurs contributions dans l'aboutissement de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à tous ces agriculteurs qui ont accepté mettre leurs champs et parfois leur domicile à notre disposition. Messieurs **Joyeux Cakpo**, **Cyrille Gbovidemlan**, **Yves Montcho**, **Pierre Latomey**, **Nicolas Agboton**, **Léonard Aïvètindé**, **Patrice Kaba**,

Achille Dossou, Zacharie Hessou, Irénée Adjagbè, Sébastien Toha, Pascal Akodé , Mathias Saclé. Recevez mes sincères remerciements.

Aussi, voudrais-je remercier tous mes amis et camarades de l'Unité de Recherche Eco-Pédo de la Faculté des Sciences Agronomiques, en particulier **Elvire Sossa, Emile Padonou, Richard Hodomihou, Issiakou Houssoukpèvi, Rodrigue Daassi, Lucas Adoho.** Vous m'avez toujours soutenu et assisté dans toutes les étapes. Merci pour ces bons moments de collaboration et d'échanges.

Je remercie **Fréjus et Cédric Koussihouèdé** ainsi que **Arnaud et Michaël Houessou** pour tout leur soutien.

C'est aussi le moment pour moi de dire toute ma gratitude à mes collègues du Laboratoire Mixte International Intensification Ecologique des sols (LMI IESOL) de Dakar (Sénégal), en particulier, **Adama Tounkara, Espoir Gaglo, Sophie Djiba, Christian Nadieline, Falilou Diallo, Rachelle Ntoma Obone, Paul Ndiaga Ciss, Oscar Malou, Sitor N'dour, Médoune Mbengue,** pour tous les échanges constructifs et les bons moments de fraternité et de convivialité.

Un grand merci à **Ben Souleymane Diatta et Bineta Fall Ngom** pour leur sollicitude, leur gentillesse et leur fraternité.

Je n'oublie pas **Katyna Olodo, Arlette Zaiya, Zeynabou Diop et Mauricelle Kegbe** « mes sœurs d'une autre mère » pour leur fraternité, amitié et solidarité.

Mes remerciements à tous les chercheurs et à tout le personnel du Laboratoire Mixte Intensification Ecologique des sols (LMI IESOL) et du Laboratoire des Moyens Analytiques (LAMA) de l'IRD de Dakar (Sénégal), en particulier mon « tonton » **Lamine Sagna** pour sa gentillesse.

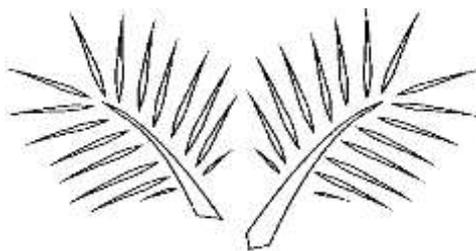


TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
RESUME.....	xii
ABSTRACT	xiii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Etat de l’art et problématique de la recherche	4
1.1. Le palmier à huile : caractéristiques biologiques et optima écologiques	5
1.2. Importance économique et enjeux environnementaux liés à la production du palmier à l’échelle mondiale	9
1.3. La production de palmier à huile au Bénin.....	11
1.3.1. Zones de production et types de système de culture à palmier au Bénin.....	11
1.3.2. Histoire de la filière palmier à huile béninoise et place des plantations villageoises dans le contexte actuel de la filière	12
1.3.3. Le modèle de conduite technique des palmeraies immatures en milieu paysan au Sud-Bénin.....	19
1.4. Logique socioéconomique des modes de conduite technique du palmier à huile.....	20
1.5. Fonctionnement biophysique des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile ...	22
1.5.1. Mécanismes en jeu dans les systèmes agroforestiers	22
1.5.2. Cas des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile	27
1.6. Evolution du sol dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile.....	35
1.7. Cadre de l’étude, problématique et stratégie de recherche.....	37
1.7.1. Cadre de l’étude	37
1.7.2. Stratégie de recherche	41
1.8. Objectifs, hypothèses de recherche, démarche et activités associées	43
1.8.1. Objectifs, hypothèses de recherche	43
1.8.2. Démarche globale et activités associées.....	43
Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin.....	47
2.1. Introduction	48
2.2. Materials and Methods	49

2.2.1. Study area	49
2.2.2. Survey.....	50
2.3. Results	53
2.3.1. The oil palm agroforestry systems on the Allada plateau	53
2.3.2. Farmers' perceptions and motivations for choosing a particular agroforestry system.....	59
2.3.3. Economics of the main associated crops in the agroforestry systems.....	61
2.3.4. Relationship between socio-economic characteristics and the selection of the associated crop	63
2.4. Discussion	64
2.4.1. Diversity of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau	64
2.4.2. A variety of choices with different performances	65
2.4.3. Varying farmers' perceptions and farm characteristics lead to alternative cropping systems	66
2.5. Partial conclusion	68
Chapitre 3 : Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile	69
3.1. Introduction	70
3.2. Matériels et méthodes.....	71
3.2.1. Région d'étude	71
3.2.2. Dispositifs expérimentaux et collectes de données	72
3.2.3. Traitement statistique des données.....	77
3.3. Résultats	79
3.3.1. Caractéristiques climatiques de la période d'étude	79
3.3.2. Réserves utiles des sols des parcelles.....	80
3.3.3. Humidité du sol et performances des cultures en fonction de la distance au palmier	80
3.3.4. Humidité du sol en fonction de la distance au palmier dans les systèmes maïs et manioc	81
3.3.5. Rendements et biomasses des cultures associées en fonction de la distance à l'arbre	84
3.4. Discussion	87
3.4.1. Performances du maïs dans les systèmes maïs et ananas.....	87
3.4.2. Compétition pour la lumière et performances des cultures associées sous la couronne de l'arbre.....	88
3.4.3. Humidité du sol et performances du maïs et du manioc en fonction de la distance à l'arbre	88

3.5. Conclusion partielle.....	90
Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin.....	83
4.1. Introduction	91
4.2. Materials and Methods	93
4.2.1. Study area	93
4.2.2. Characteristics of the immature oil palm intercropping systems in the Allada plateau	93
4.2.3. Experimental layout	96
4.2.4. Sampling, morphometric measurements and analysis	98
4.2.5. Statistical analysis	100
4.3. Results	101
4.3.1. The chemical properties of soils in the intercropping systems	101
4.3.2. Palm leaf nutrient concentrations	102
4.3.3. Differences in palm growth indicators between the cropping systems.....	105
4.3.4. Relationship between leaf nutrient concentrations and soil nutrient levels	106
4.3.5. Simplified N and K budget in soil.....	106
4.4. Discussion	107
4.4.1. Differences in palm N and P nutrition between the systems.....	107
4.4.2. The effect of the pineapple crop succession on oil palm K nutrition and growth	108
4.4.3. Differences in soil fertility between the intercropping systems at the end of the immature period	109
4.4.4. Relationship between profitability of the crop succession and growth of the immature oil palms.....	110
4.5. Partial conclusion	111
Chapitre 5 : Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature	112
5.1. Introduction	113
5.2. Matériels et méthodes.....	115
5.2.1. Zone d'étude	115
5.2.2. Matériel végétal et mesures.....	115
5.2.3. Démarche d'analyse des données.....	117
5.2.4. Analyses statistiques	118
5.3. Résultats	119
5.3.1. Evolution de la biomasse de la feuille du palmier immature en fonction de sa position dans la couronne.....	119

5.3.2. Test des équations d’Aholoukpè et al. (2013) et de Henson et Tayeb Dolmat (2003) sur des palmiers immatures	119
5.3.3. Développement d’un modèle allométrique pour l'estimation de la biomasse d’une feuille de palmier immature	121
5.4. Discussion	123
5.4.1. Différences entre la biomasse des feuilles du palmier immature en fonction du rang.....	123
5.4.2. Qualité de prédiction de la biomasse des feuilles de palmiers immatures par les modèles préexistants	123
5.4.3. Importance de la longueur des parties de la feuille dans la prédiction de la biomasse foliaire du palmier à huile immature	124
5.5. Conclusion partielle.....	124
Discussion générale et perspectives	119
1. Introduction	125
2. Résumé de la démarche - Atouts et limites des outils.....	125
3. Propositions pour l’amélioration des performances des systèmes de culture étudiés	128
4. Perspectives.....	129
Conclusion générale	125
Références bibliographiques	127
Annexes	xiii
Biographie de l'auteur	xxiv

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Pratiques recommandées par le CRAPP et pratiques paysannes en palmeraies immatures	20
Tableau 2 : Développement végétatif des appareils aériens et racinaires à 4 ans d'âge des palmiers dans l'étude de Daniel et de Taffin (1974).	29
Tableau 3 : Rendements de combinaisons de cultures annuelles (soja, maïs, macabo) associés au palmier ou non.	31
Tableau 4 : Equations allométriques d'estimation de la biomasse aérienne du palmier adulte	35
Tableau 5 : Synthèse de la littérature sur l'effet de l'introduction de culture annuelles sur les caractéristiques de sols dans les plantations de palmier (ou autres espèces proches) en région tropicale	37
Tableau 6 : Activités développées dans cette thèse en fonction des objectifs spécifiques	46
Tableau 7 : Socio-economic variables selected for the oil palm agroforestry systems in southern Benin (adapted from Pattanayak et al., 2003)	52
Tableau 8 : Common practices for immature oil palm and the main associated crops	57
Tableau 9 : Economics of the associated crops oil palm plantations in southern Benin over one crop growing cycle	62
Tableau 10 : Household characteristics of farms surveyed	63
Tableau 11 : Caractéristiques des parcelles d'étude	74
Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA le modèle retenu sur l'humidité des sols aux profondeurs 0-40 cm et 40-80 cm. (n=1584 pour le maïs et 2112 pour le manioc)	83
Tableau 13 : Technical management of the oil palm fields over the three-year immature period	97
Tableau 14 : Nutrient concentrations of oil palm leaf 17 and soil properties at 0-10 cm depth and 1 m from the trunk, depending on the intercropping system (mean \pm standard errors)	103
Tableau 15 : Growth indicators of the tree for each agroforestry system: total number of green leaves (NGL), vigor index (VI) and length of leaf 17 (L17) (mean \pm standard errors)	106
Tableau 16 : Correlation coefficients between soil nutrient concentrations in the 0-10 cm soil layer at 1 m from the trunk and oil palm leaf 17 nutrient concentrations	106
Tableau 17 : Estimated N and K budgets over three years for the associated crops in the intercropping systems	107
Tableau 18 : Histoire de la gestion agronomique de chaque palmeraie	116
Tableau 19 : Matrice de la corrélation entre les variables indépendantes	121
Tableau 20 : Modèles allométriques d'estimation de la biomasse sèche des feuilles et paramètres statistiques associés	122

LISTE DES FIGURES

- Figure 1:** Images de palmier à huile ; a) palmier immature de 3 ans d'âge ; b) Morphologie du palmier à huile adulte sur pied (10 - 12 ans d'âge)..... 7
- Figure 2:** Organisation foliaire du palmier à huile ; a) phyllotaxie du palmier ; b) différentes parties d'une palme (10 - 12 ans d'âge)..... 7
- Figure 3:** Photos (colonne de gauche) et simulations (colonne de droite) de systèmes racinaires de palmier à huile du stade plantule à l'âge adulte. 8
- Figure 4:** Importations des principales huiles végétales à l'échelle mondiale sur la période 1964-2015 (millions de tonnes)..... 10
- Figure 5:** Zones de production et principaux acteurs de la filière palmier à huile au Bénin... 17
- Figure 6:** Quelques usages du palmier à huile en milieu rural au Bénin..... 18
- Figure 7:** Divers processus d'interactions entre espèces pour l'acquisition des ressources abiotiques en peuplements plurispécifiques (colonne de gauche) et leur déclinaison en exemples concrets sur des systèmes agroforestiers (colonne de droite). 26
- Figure 8:** Etat hydrique en saison sèche et rendement par arbre des palmeraies associées au *Pueraria* par rapport à celles conduites en sol nu. Le palmier a été considéré comme physiologiquement sec pour une ouverture stomatique < 5. Les nombres de jours sont la moyenne de mesures effectuées tout au long de la saison sèche. 28
- Figure 9:** Rendements et surface foliaire du macabo (*Xanthosoma sagittifolium*) sous et hors ombrage sur deux sols différents par leur fertilité. Il n'y a pas de différences significatives entre les rendements et surface foliaire entre les zones considérées. 30
- Figure 10:** Rendements en régime de palmeraies adultes (10 ans d'âge) associées en permanence au manioc pendant leur jeune âge et à une rotation maïs/niébé. Les lettres a et b indiquent que la différence entre les rendements des deux modalités est significative au seuil de 5%..... 32
- Figure 11:** Teneurs foliaires en N et K des 18 palmeraies villageoises adultes étudiées par Rafflegeau et al. (2010) au Cameroun. 33
- Figure 12:** Carte pédologique de la zone d'étude ; a) les différents types d sols ; b) leurs proportions. 40
- Figure 13:** Diagramme ombrothermique du sud du Bénin : moyennes mensuelles sur 30 ans (1988-2018)..... 40
- Figure 14:** Typical oil palm agroforestry systems on the Allada Plateau, southern Benin..... 55
- Figure 15:** Main oil palm agroforestry systems developed by smallholders in the Allada region (Southern Benin). 3a (top-left), Oil palm tree with Pineapple; 3b (top-right), with Tomato; 3c (bottom-left), with Maize; 3d (bottom-right), with Cassava. The annual crops are maintained no longer than the immature period of the trees. *Crédit photos: H. Koussihouèdé* 56

Figure 16: Farmers' prioritization of the main motivations for choosing a given oil palm agroforestry system	60
Figure 17: Conditional inference tree discriminating the main factors influencing the choice of oil palm agroforestry systems (n=54 farmers)	64
Figure 18 : Carte du plateau d'Allada montrant les sites d'étude.	73
Figure 19 : Schéma du dispositif d'étude ; A : palmeraie vue d'en haut; B : dispositif d'étude vu de près.	75
Figure 20 : Diagramme ombrothermique du sud du Bénin sur la période septembre 2017-septembre 2017-2018.	79
Figure 21: Réserve utile des sols des parcelles d'étude suivant les horizons du sol. M1, M2 (...) sont les parcelles décrites dans le Tableau 11.	80
Figure 22: Profil hydrique du sol dans le système maïs. a) pendant la période humide ; b) pendant la période sèche ; P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2. (n=3 à 5).	82
Figure 23: Profil hydrique du sol dans le système manioc. a) pendant la période humide ; b) pendant la période sèche ; P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2. (n=3 à 5).	82
Figure 24 : Evolution de l'humidité du sol sur la profondeur 0-40 cm en fonction de la distance à l'arbre dans le système maïs. P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2.....	83
Figure 25 : Evolution de l'humidité du sol sur la profondeur 0-40 cm en fonction de la distance à l'arbre dans le système manioc. P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2.	84
Figure 26: Rendements en grains et quantité de biomasse aérienne du maïs suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans les systèmes maïs et ananas (n=4 pour Z0 et n=8 pour Z1 et Z2).	85
Figure 27 : Rendements et quantités de biomasse du maïs suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans le système manioc (n=4 pour Z0 et n=8 pour Z1 et Z2).	86
Figure 28 : Rendements et quantités de biomasse du maïs suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans le système tomate (n=4 pour Z0 et n=8 pour Z1 et Z2).	87
Figure 29 : Box plot of the soil chemical properties in the 0-10 cm soil layer at 1 m and 4.5 m from the palm stipe.....	102
Figure 30: N, P, K, Mg and Ca concentrations in oil palm leaf 17 at field level for each intercropping system (n=30).	104
Figure 31: The PCA plots: (a) PCA loadings for the nutrient concentrations in oil palm leaf 17 (first two axes); (b) PCA scores for the nutrient concentrations in oil palm leaf 17 (first two	

axes) in each of the two plots per field. The larger points are the centroids for each intercropping system..... 105

Figure 32: Variation de la biomasse sèche des feuilles du palmier immature suivant leur rang. 119

Figure 33: Graphes d'ajustement des valeurs estimées par rapport aux valeurs observées sur les feuilles. a) valeurs observées de biomasse sèche du rachis versus valeurs estimées par l'équation 1 de Aholoukpè et al. (2013) ; b) valeurs observées de biomasse sèche d'une feuille versus valeurs estimées par l'équation 2 de Aholoukpè et al. (2013) ; c) valeurs observées de biomasse sèche d'une feuille versus valeurs estimées par l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003). 120

Figure 34 : Droites de régression de la biomasse des feuilles par rapport aux variables morphométriques de la feuille. a) biomasse des feuilles en fonction de la longueur du pétiole ; b) biomasse des feuilles en fonction de la longueur totale de la feuille..... 122

RESUME

Le secteur béninois de la production de palmier à huile est aujourd'hui animé presque exclusivement par des petits planteurs ruraux installés en agriculture familiale. Sur le plan technique, alors que les bonnes pratiques de conduite des palmeraies immatures recommandent la culture associée avec une plante de couverture, le système d'exploitation villageois se caractérise par l'association du palmier avec diverses cultures vivrières au cours des trois premières années de plantation formant ainsi un système agroforestier. Notre objectif dans cette thèse était d'évaluer les performances des systèmes agroforestiers à base de palmier dans le plateau d'Allada au Sud du Bénin (2°30 - 2°45 E et 6°35 - 7°45 N). Dans une première étape, des enquêtes ont été réalisées aux échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole respectivement en vue de caractériser la diversité des systèmes de culture et leurs logiques socioéconomiques respectives. Cette étape a utilisée 160 interviews d'agriculteurs et 13 enquêtes en focus groups. Dans une seconde étape, une démarche de diagnostic agronomique régional a été développée sur un réseau de 15 parcelles paysannes afin de mettre en évidence les effets des pratiques des agriculteurs sur les performances agronomiques des systèmes identifiés. Différentes variables d'état du milieu et des plantes cultivées ont été collectées à cette étape et des équations allométriques permettant de prédire rapidement l'état de croissance foliaire des jeunes arbres ont été mis au point. L'ensemble de notre travail montre que quatre principaux types de système à base de palmier sont développés dans la région en fonction des cultures annuelles les plus fréquemment associées aux jeunes palmiers. Chaque système répond à des objectifs socioéconomiques qui varient en fonction de l'exploitation. Le fonctionnement biophysique des systèmes agroforestiers avec des jeunes palmiers est tel que la compétition pour le potassium du sol entre le palmier et les cultures annuelles associées est le principal processus qui détermine les différences de nutrition potassique et de croissance du jeune arbre entre parcelles. La comparaison des profils hydriques du sol et les mesures de rendements des cultures de maïs situés proches et loin du palmier montrent que le maïs subit une compétition pour l'eau exercée par l'arbre, alors que dans le cas de l'association palmier-manioc, le manioc ne subit pas de compétition pour l'eau exercée par l'arbre. L'ensemble des résultats et des connaissances produites dans ce travail permettent de formuler des propositions pour l'amélioration des performances de production de ces palmeraies villageoises.

Mots-clés : Agroforesterie à base de palmier à huile, système de culture, déterminants socioéconomiques, diagnostic agronomique, durabilité.

ABSTRACT

Smallholders are the main players who deliver the bulk of Benin's national oil palm production. While extension services recommend to associate juvenile oil palm (<3 years) with a cover crop, smallholder farming system is characterized by the association of the palm tree with various food crops forming a temporary oil palm-based agroforestry system. The objective of this thesis was to assess the performance of palm-based agroforestry systems in the Allada plateau in Southern Benin (2° 30' - 2° 45' E and 6° 35' - 7° 45' N). Firstly, surveys were carried out at the plot and farm scales respectively in order to characterize the diversity of cropping systems and their respective socio-economic rationality. This step involved 160 interviews with farmers and 13 focus group surveys. Secondly, a regional agronomic diagnostic approach was developed on a farmer's field network of 15 farmers in order to gain insight into the effects of farmers' practices on the agronomic performance of the juvenile oil palm. Various agronomic performance and soil fertility indicators were collected. Allometric equations allowing rapid prediction of the leaf growth status of juvenile oil palm were also developed. We showed that four main types of oil palm-based agroforestry system are developed in the region based on the annual crops most commonly associated with young palms. Each system responds to socioeconomic objectives that vary upon the exploitation. The competition for the K of the soil between the oil palm and associated annual crops is the main process that determines the differences in K nutrition and growth of juvenile oil palms between fields. The comparison of the water profiles of the soil and the measurements of yields of corn crops located near and far from the oil palm show that the corn undergoes a competition for water exerted by the tree, whereas in the case of the association of oil palm with cassava, cassava does not experience competition for water from the oil palm. The findings from this study provides opportunities for proposals to be developed on improving the production performance of these oil palm plantations

Keywords: Oil palm-based agroforestry, cropping system, socioeconomic determinants, agronomic diagnosis, sustainability.

« *Un jour, je volerai* » dit la chenille ; tout le monde se mit à rire sauf le papillon.

Introduction générale



Les effets combinés de l'augmentation de la population, du niveau de vie et de l'adoption de régimes alimentaires de meilleures qualités nutritionnelles dans les pays en développement devraient aboutir à une hausse de 70% de la demande alimentaire mondiale d'ici 2050 (Bruinsma, 2009; Tilman et al., 2011). L'utilisation de certaines cultures alimentaires à des fins industrielles, notamment comme biocarburants, devrait aussi se développer. Dans le même temps, les ressources naturelles, et en particulier les terres arables et l'eau, vont devenir moins disponibles (FAO, 2006 ; Danielsen et al., 2009). La pression sur les systèmes agricoles sera accrue par le réchauffement global, la fréquence des accidents climatiques (sécheresses, inondations, etc.) et les modifications dans le régime saisonnier des précipitations.

L'agriculture de la région-ouest africaine sera particulièrement touchée par ces changements (Roudier, 2012) alors que c'est une région où la population croît le plus vite et où la pauvreté affecte le plus grand nombre (Desa, 2019). L'augmentation de l'exode rural corollaire des baisses combinées de la disponibilité des terres et des rendements dans cette région entraînera une baisse de la population dans les campagnes et une hausse dans les villes (Cros, 2014). Ainsi, une main-d'œuvre rurale moins nombreuse devra produire plus sur une surface agricole plus faible et dans des conditions climatiques moins favorables (Bruinsma, 2009).

Malgré sa forte productivité, l'agriculture industrielle encore appelée « agriculture à haut niveau d'intrants », n'est pas une option durable. Plusieurs travaux montrent qu'elle a beaucoup contribué non seulement à la dégradation de l'environnement par ses fortes émissions de gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique, mais aussi à la pollution des eaux, des sols et de l'atmosphère par les pesticides et par l'épuisement des ressources naturelles dont la biodiversité.

Le défi d'une agriculture durable mais aussi productive, en termes économique et environnemental, nécessite de nouveaux paradigmes en agronomie et oriente vers la mise au point de systèmes de culture basés sur l'imitation du fonctionnement écologique des écosystèmes naturels (Altieri, 2002; Doré et al., 2011; Malézieux et al., 2009). L'objectif d'optimisation de la production agricole reste aujourd'hui comme par le passé le but de la recherche agricole. Cependant, différemment d'antan, les moyens pour y parvenir devront désormais reposer sur des bases plus économes en intrants et peu nocives pour l'environnement.

L'agroforesterie est une pratique ancienne et très répandue en agriculture familiale tropicale. Elle correspond à « la mise en culture d'une parcelle avec une association simultanée ou séquentielle d'arbres et de cultures ou d'animaux, afin d'obtenir des produits et des services

utiles à l'homme » (Torquebiau et al., 2002). Les agriculteurs y voient un moyen d'augmenter la rentabilité de leurs terres, de diversifier leurs productions et leurs sources de revenus. Les agronomes y voient en outre une pratique susceptible de valoriser différents processus écologiques pour la production de services, tout en contribuant à préserver la biodiversité des espèces végétales en particulier dans les pays tropicaux où la destruction des forêts au profit des cultures annuelles s'accélère (Torquebiau et al., 2002). Les systèmes agroforestiers peuvent en effet être une des solutions privilégiées pour atteindre plusieurs objectifs à la fois : 1) mitigation du changement climatique via la séquestration du carbone (Lorenz et Lal, 2014; Seneviratne et al., 2015) ; 2) conservation de la biodiversité ; 3) sécurité alimentaire via une production alimentaire diversifiée et stable (Waldron et al., 2017) ; 4) augmentation de la production alimentaire via une meilleure efficacité des ressources. Ainsi, dans le cas des systèmes agroforestiers à base de palmeraie, Germer et Sauerborn (2008), rapportent qu'une palmeraie adulte permettrait de stocker à travers sa biomasse et son sol 135 Mg de CO₂ atmosphérique net par hectare. En termes de conservation de la biodiversité, les résultats de plusieurs études suggèrent que le maintien des palmeraies à huile avec d'autres espèces végétales forestières dans des paysages agricoles mixtes pourrait servir de tampons et de couloirs reliant des réserves forestières éloignées et fournir un habitat aux espèces de la faune forestière tout en procurant des moyens de subsistance aux populations locales (Beukema et al., 2007; Bhagwat et al., 2008).

Les avantages en termes de sécurité alimentaire des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile, sont suggérés par les nombreux travaux qui montrent que les différentes espèces de plantes généralement associées aux jeunes palmiers (Aholoukpè et al., 2013; Nchanji et al., 2016) peuvent présenter des sensibilités différentes aux perturbations environnementales et des complémentarités pour l'exploitation des ressources du sol (Kuyah et al., 2019), telles que les rendements de la culture annuelle en agroforesterie puissent être similaires à celui de la culture annuelle conduite en monoculture.

Cependant, ces avantages des systèmes agroforestiers (SAF) pourraient être variables en fonction des conditions du milieu et des pratiques des agriculteurs, et un travail d'évaluation qui ne serait centré que sur une seule parcelle pourrait biaiser cette évaluation. Dans une perspective d'amélioration de la durabilité de ces systèmes agroforestiers, il est donc essentiel d'évaluer les performances de ces systèmes *in-situ* en tenant compte de leur diversité de conduite technique. Il est important en outre de comprendre la rationalité socioéconomique des

choix faits par les agriculteurs afin de les prendre en compte dans nos propositions d'innovations et en assurer ainsi l'adoption par les agriculteurs.

Cette thèse est centrée sur les jeunes palmeraies plantées avec la variété sélectionnée de palmier à huile vulgarisée par le Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (CRA-PP/INRAB), selon un dispositif régulier de plantation à densité comprise entre 130 et 150 arbres.ha⁻¹ et associées à des successions de cultures vivrières pendant les 3 à 4 premières années de la plantation. Ces premières années de la plantation correspondent à la période immature du palmier. Les palmeraies plantées à forte densité avec une variété de palmier locale, exploité en rotation jachère / cultures vivrières (palmier jachère) existent également au Bénin (Brouwers, 1993; Daane et al., 1997; Yemadje et al., 2012) mais ne sont pas prises en compte dans cette thèse.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les effets des systèmes de culture et leurs déterminants socioéconomiques sur le fonctionnement biophysique et les performances des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile cultivés par les agriculteurs de la région du plateau d'Allada au sud du Bénin. Cette thèse est donc en phase avec les objectifs de l'état béninois qui en accord avec les objectifs sous-régionaux souhaite favoriser le développement de la filière palmier à huile pour faire face à l'important accroissement de la demande sous-régionale en oléagineux et pour améliorer les moyens d'existence des populations rurales (MAEP, 2011; UEMOA, 2013).

Après cette introduction générale, le document de thèse est organisé en six chapitres. Les chapitres correspondent à des articles publiés ou des pré-articles à soumettre. Dans le chapitre 1 sont abordés l'état de l'art et la problématique de la recherche. Dans le chapitre 2 sont présentées l'étude de la caractérisation des systèmes agroforestiers et l'identification des facteurs socioéconomiques influençant le choix de ces systèmes. Les chapitres 3, 4 et 5 présentent les études réalisées sur le fonctionnement biophysique des systèmes de culture identifiés dans le chapitre 2. Dans le chapitre 3, la disponibilité en eau du sol et des performances productives des cultures vivrières dans ces systèmes a été évaluée. Dans le chapitre 4 est présentée l'étude réalisée sur l'évaluation des performances nutritionnelles et végétatives du palmier. Dans le chapitre 5 est présentée une méthode d'estimation de la biomasse foliaire des palmeraies en phase immature. Dans le chapitre 6, après une revue des objectifs et des hypothèses, la discussion générale, les limites et les perspectives de ce travail de recherche sont présentées. Enfin, la conclusion générale relate les principaux résultats.

Chapitre 1 : Etat de l'art et problématique de la recherche



1.1. Le palmier à huile : caractéristiques biologiques et optima écologiques

Le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Figure 1a et b) est une monocotylédone pérenne de la famille des arécacées (anciennement appelée palmacées), une des plus anciennes familles de plantes à fleurs (Cros, 2014). Son origine botanique est localisée dans les forêts humides du golfe de Guinée (Afrique de l'ouest) (Corley et Tinker, 2003; Hartley, 1988) d'où il s'est diffusé dans les régions intertropicales humides du globe, en particulier en Asie du Sud-Est, en Amérique du Sud et en Afrique. L'épithète "*guineensis*" traduit d'ailleurs ce fait (Jacquemard et al., 2001). D'un point de vue botanique, le palmier à huile est une herbe géante. Toutefois, dans la suite de cette thèse, nous ferons référence au palmier en tant qu'arbre, en nous appuyant sur sa nature pérenne. Il existe trois grands types génétiques de palmier à huile : *dura*, *pisifera* et *tenera*. Le type *dura* se distingue par des fruits à coque épaisse, à pulpe fine et à grosse amande, et constitue l'essentiel des peuplements naturels et sub-spontanés. Le type *pisifera* se caractérise par des fruits sans coque. Il produit très rarement de régimes arrivant à maturité du fait d'une anomalie de la fécondation. Enfin, le type *tenera*, hybride des deux précédents, se caractérise par des fruits à coque fine, à pulpe épaisse et à petite amande. Il offre le meilleur rendement en huile avec une répartition respective d'environ 90% et 10% d'huile de palme extraite de la pulpe et d'huile de palmiste extraite de l'amande. Les palmeraies sélectionnées sont plantées uniquement avec cet hybride.

Le cycle de développement du palmier à huile dure environ 25 ans. Ce cycle se subdivise en une phase immature correspondant aux 3 ou 4 premières années pendant lesquelles la plante développe sa végétation et reste improductive (Figure 1a), puis d'une phase productive pendant laquelle l'arbre est exploité. Le palmier à huile adulte est constitué d'une couronne de feuilles au centre de laquelle se situe le bourgeon terminal placé à l'extrémité d'une tige appelée stipe en forme de colonne cylindrique légèrement conique (Figure 1b). Les feuilles sont produites en succession spiralée à partir du méristème et occupent dans la couronne un rang précis à un instant donné. Environ 26 à 30 feuilles sont émises par an chez les palmiers de 2 à 4 ans (Nodichao, 2008). Les spirales peuvent être orientées vers la gauche ou vers la droite (Figure 2a). Une feuille de palmier à huile (ou palme) est composée d'un pétiole dont la base s'insère dans le stipe, d'un rachis dans le prolongement du pétiole à partir du point C et de folioles insérées sur le rachis (Figure 2b). Au cours de la phase immature du palmier, le stipe croît essentiellement en diamètre. Ce n'est qu'à partir de 4 ans qu'un allongement internodal a lieu. La croissance en hauteur dépend alors des facteurs environnementaux et génétiques et varie

entre 25 et 50 cm par an (Cros, 2014; Hartley, 1988). Le système racinaire du palmier à huile est de type fasciculé (Figure 3). En perpétuel renouvellement, il est constitué de plusieurs types de racines formant un tapis dense au voisinage immédiat de l'arbre (Figure 3). 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 : diamètre > 4 mm), les racines secondaires (RII : $1,5 < \text{diamètre} < 4$ mm), les racines tertiaires (RIII) et quaternaires (RIV). Les deux derniers types sont souvent regroupés et désignés par le terme de racines fines (Rf : diamètre < 1,5 mm) constituant les racines absorbantes du palmier alors que les deux premiers types (racines primaires et secondaires) sont qualifiées de racines d'exploration (Jourdan et Rey, 1996). Sur le plan horizontal, Nodichao (2008) montre que 75 % à 82 % des racines absorbantes des palmiers de 4 ans sont dans un rayon de 3 m autour de l'arbre et que la plus grande partie de ces zones se trouvent entre 1,5-3 m du palmier. Erhabor et al. (2002) au Nigéria montrent sur des palmiers de 2 ans que la zone de concentration racinaire horizontale la plus élevée se situait entre 15 et 90 cm de la base du palmier.

Sur le plan vertical, Erhabor et al. (2002) montrent sur des palmiers de 2 ans que la plupart des racines sont rencontrées dans les 30 premiers cm du sol. Les travaux suggèrent qu'à trois ans d'âge, la biomasse racinaire fine des palmiers se concentre dans un rayon de 1 à 2 m du centre du palmier sur le plan horizontal et dans les 40 premiers cm du sol sur le plan vertical. A l'aisselle de chaque feuille se trouve une inflorescence dont le devenir dépend des conditions environnementales (niveau de satisfaction des besoins en nutriment et en eau notamment). Une inflorescence pourra avorter ou devenir mâle ou femelle. Une fois fécondées, les inflorescences femelles évoluent normalement en régimes. Un régime est constitué d'un rachis (ou pédoncule) portant des épillets sur lesquels se trouvent les drupes (fruits à noyaux). Un fruit pèse entre 10 et 30 g et se compose généralement d'une amande (faite d'un embryon et d'albumen), d'un endocarpe ligneux (coque), de mésocarpe (pulpe) et d'un exocarpe (peau). La pulpe des fruits fournit l'huile de palme et l'amande l'huile de palmiste.

En termes de conditions écologiques, le palmier à huile nécessite plus de 1800 heures/an d'ensoleillement et une pluviométrie annuelle de 1800 mm, avec des périodes sèches ne dépassant pas 2-3 mois (Nouy et al., 1999). L'humidité relative de l'air doit être supérieure à 75% tout au long de l'année. La plante tolère des températures quotidiennes optimales de 27-28°C, avec des valeurs mensuelles moyennes comprises entre 21 et 32°C.

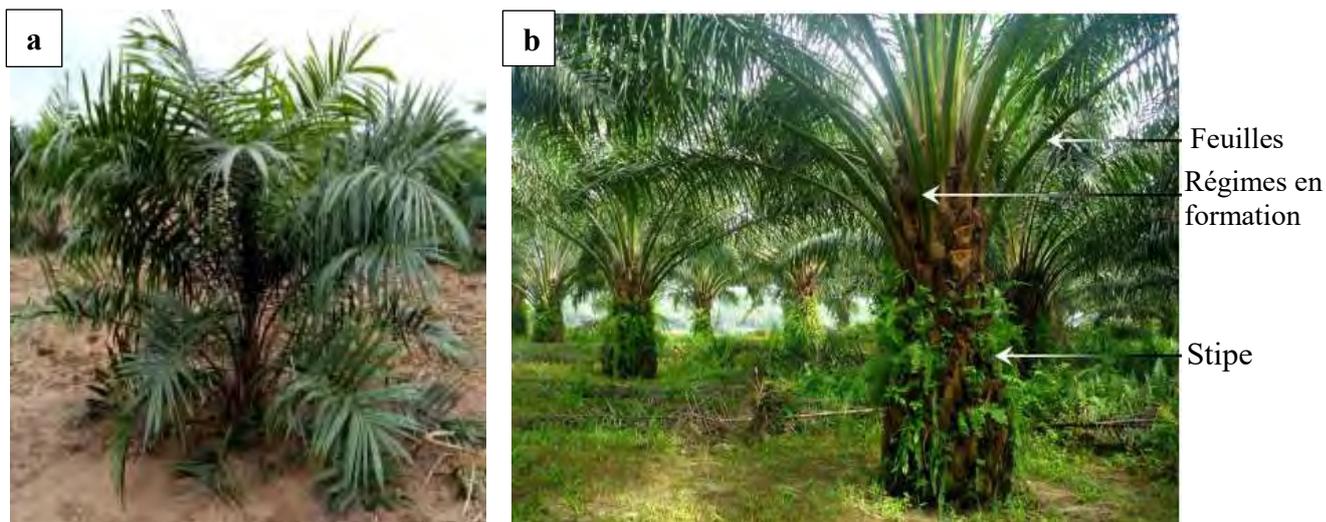


Figure 1: Images de palmier à huile ; a) palmier immature de 3 ans d'âge ; b) Morphologie du palmier à huile adulte sur pied (10 - 12 ans d'âge).

Crédit photos : a) Koussihouédé Hermione ; b) © C. Bessou, Adapté de (Cirad, 2010).

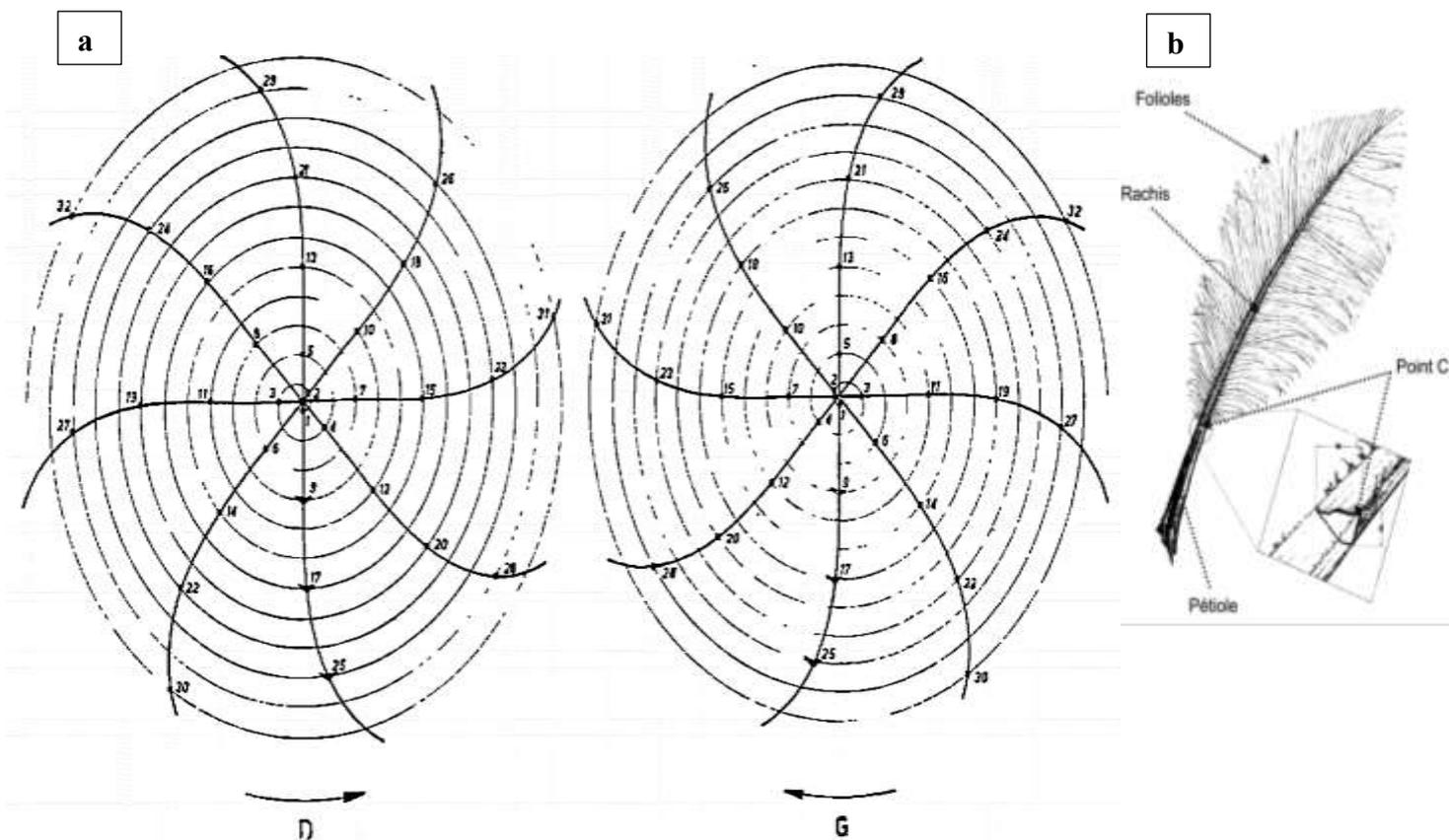
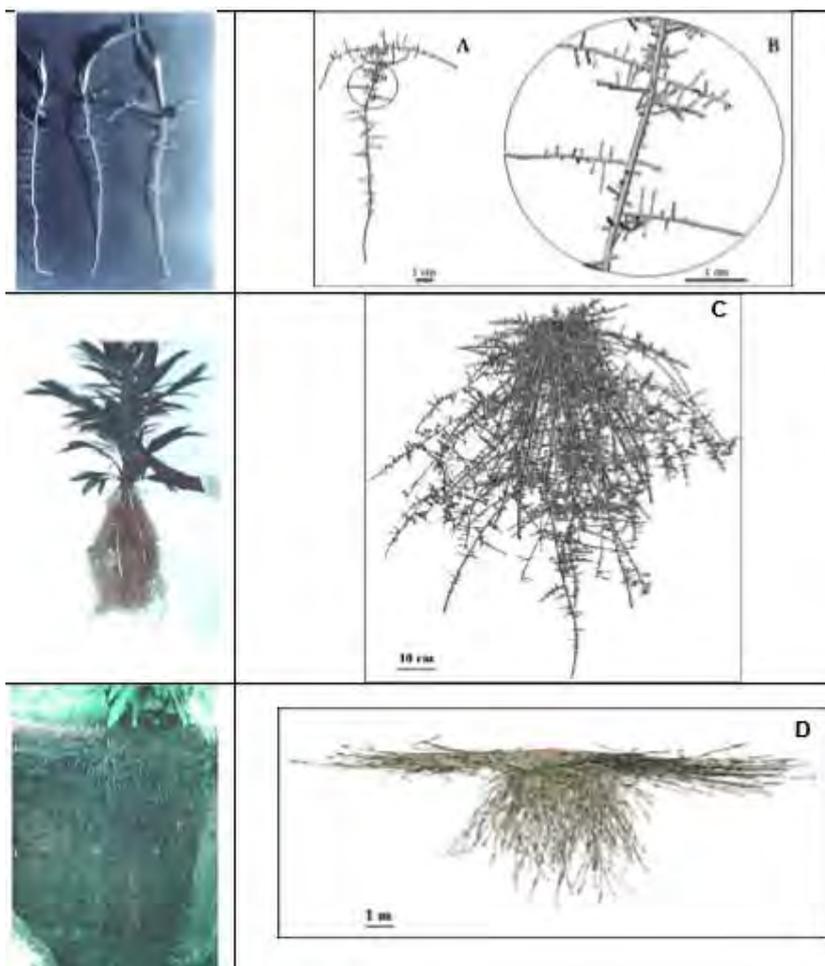


Figure 2: Organisation foliaire du palmier à huile ; a) phyllotaxie du palmier ; b) différentes parties d'une palme (10 - 12 ans d'âge).

Sources : a) Olivin et Ochs (1977); b) Corley et al. (1971)



A : Système racinaire de la plantule de palmier à huile à 1 mois ;
B : Architecture racinaire de la plantule montrant la disposition des différents types de racines ;
C : Système racinaire d'un jeune palmier à huile d'1 an d'âge ;
D : Système racinaire du palmier à huile adulte (10 ans d'âge).

Figure 3: Photos (colonne de gauche) et simulations (colonne de droite) de systèmes racinaires de palmier à huile du stade plantule à l'âge adulte.

Source : extrait du document d'Habilitation à diriger des recherches de C. Jourdan soutenu publiquement le 17 /12 /2014.

1.2. Importance économique et enjeux environnementaux liés à la production du palmier à l'échelle mondiale

A l'échelle mondiale, la production d'huile de palme repose sur des systèmes d'exploitation diversifiés allant de la ferme familiale de quelques hectares au périmètre agro-industriel de plusieurs milliers d'hectares. Dans les plus grands pays producteurs, les plantations de palmiers à huile établies par les petits exploitants existent parallèlement aux plantations industrielles. Cependant, si la majeure partie de la production mondiale est fournie par ces agro-industries, la part de production fournie par les petits producteurs demeure importante. Environ 40% de la superficie mondiale de terre cultivée en palmier appartient aux petites exploitations familiales de moins de 50 ha (Rival et Levang, 2014).

La culture commerciale du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) à grande échelle a démarré en Afrique et en Asie du Sud-Est au début du 20^{ème} siècle, puis s'est développée dans toute la zone tropicale. Il s'agit aujourd'hui de la première plante oléagineuse au monde en termes de production (Corley et Tinker, 2016). Grâce à la sélection du *Tenera*, variété améliorée à haut rendement et de progrès agronomiques conséquents, la production d'huile de palme a été multipliée par 2 entre 2005 et 2019 et dépasse aujourd'hui 73 Mt (USDA, 2018, p. 20). A l'échelle mondiale, la culture du palmier à huile ou Elaéculture, a pour objectif principal, la production d'huile de palme issue des pulpes du fruit et dans une moindre mesure, d'huile de palmiste issue de l'amande de la noix. L'huile de palme est destinée principalement à l'industrie alimentaire et bioénergétique. L'huile de palmiste est utilisée dans l'industrie cosmétique (Fontanel, 2012; Keng et al., 2009; Vermaak et al., 2011). L'Asie du Sud-Est réalise aujourd'hui l'essentiel de la production.

Deux pays se distinguent : l'Indonésie et la Malaisie qui totalisent à eux seuls 85 % des approvisionnements (USDA, 2018). L'Afrique qui fournissait 80 % des exportations mondiales en 1960, a vu sa production considérablement chutée du fait notamment de la supériorité des rendements en Asie du Sud-Est, des coûts de production trop élevés pour un produit dont le prix a baissé avec l'expansion des productions asiatiques (Follin, 2000). Le Nigéria, premier producteur africain d'huile de palme délivre environ 1% de la production mondiale (USDA, 2018). La surface cultivée en palmier représente seulement 7% des surfaces mondiales en oléagineux mais réalise environ 39% de la production (Rival et Levang, 2014).

Les caractéristiques physico-chimiques et fonctionnelles particulières de l'huile de palme en font une huile très intéressante pour les industries de l'agroalimentaire (Mba et al., 2015). Ce fait justifie le maintien du niveau élevé des exportations mondiales d'huile de palme sur

plusieurs années (Priyati 2018, Figure 4) malgré la controverse sur sa qualité nutritionnelle et la « *croisade anti huile de palme* » menée par certains politiques et ONG occidentaux (Rival et Levang, 2014, P.8). A l'heure actuelle, la demande globale en huile de palme dépasse l'offre, portée par l'augmentation de la consommation consécutive à la croissance démographique et l'élévation du niveau de vie dans les pays tels que la Chine, l'Inde et d'autres pays d'Asie ces dernières années (Carter et al., 2007; Turner et al., 2008). A l'avenir, cette tendance risque de se renforcer au regard de ses cours mondiaux toujours à la hausse, de la faiblesse des coûts de production du palmier par rapport aux autres huiles végétales (par exemple, moins 20% que le soja), l'engouement pour les biocarburants pour remplacer les énergies fossiles (Rival et Levang, 2014).

Toutefois, l'expansion de la culture du palmier à huile est sujette à de nombreuses controverses notamment sur le plan environnemental. Le palmier à huile couvre de vastes superficies de terres (12 millions d'hectares en 2004) (Dronne, 2005). Les abattages et brûlis de forêt tropicale sur des hectares, vivier de biodiversité animale et végétale au profit des plantations de palmier, peuplements monospécifiques sont fortement décriés. Même si certains auteurs considèrent que les plantations de palmier à huile peuvent stocker du carbone dans leur biomasse (Germer et Sauerborn, 2008; Jaffré et Namur, 1983; Lamade et Bouillet, 2005, Aholoukpè, 2013), les critiques faites aux palmiers en tant que « *champions de la destruction des forêts en Asie* » (Rival et Levang, 2014, P.20) et support de l'agriculture industrielle ont encore plus d'écho que leur capacité à concilier plusieurs objectifs à la fois : production, sécurité alimentaire et préservation de l'environnement.

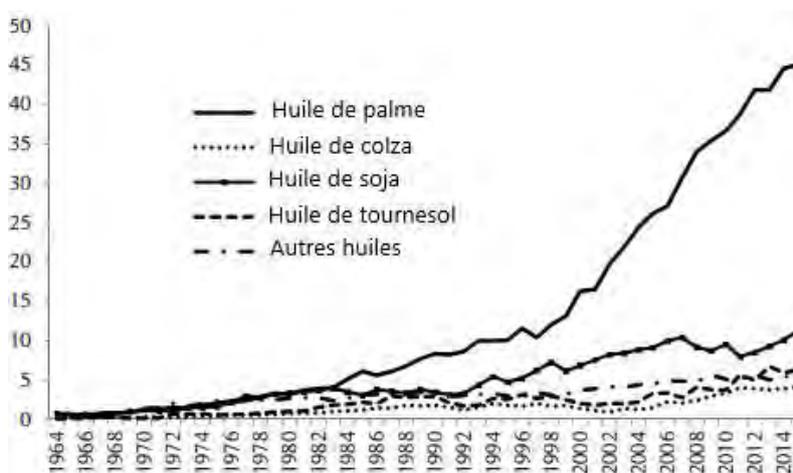


Figure 4: Importations des principales huiles végétales à l'échelle mondiale sur la période 1964-2015 (millions de tonnes).

Source : USDA-FAS (2016) cité par Priyati et Tyers (2016) et traduit de l'anglais.

1.3. La production de palmier à huile au Bénin

1.3.1. Zones de production et types de système de culture à palmier au Bénin

Le Sud du Bénin (1°40 - 2°45 E et 6°20 - 7°45 N), est la région écologiquement propice au palmier. Cette « zone palmier » n'occupe que 20% du territoire national, mais 67% de la population y vit (Fournier et al., 2001) (Figure 5). Les départements de l'Ouémé, du Plateau, de l'Atlantique, du Mono, du Couffo et dans une moindre mesure du Zou et Collines sont concernés (Fournier et al., 2001). Le climat de la région est de type soudano-guinéen avec un régime pluviométrique bimodal (avril-juin et septembre-novembre). La pluviométrie annuelle varie de 900 mm à 1300 mm, avec des déficits hydriques annuels importants fluctuant entre 400 et 700 mm et faisant du Bénin une zone marginale pour la production industrielle du palmier à huile (Follin, 2000; Nouy et al., 1999). Le palmier est le plus souvent retrouvé sur les sols ferrallitiques dominant dans la région (Aholoukpè, 2013; Juhé-Beaulaton, 1998).

Trois systèmes d'exploitation des peuplements palmiers coexistent dans le sud du Bénin: ce sont les palmeraies sub-spontanées, naturelles ; les palmeraies plantées avec du matériel végétal non sélectionné issu des repousses des palmeraies sub-spontanées et les palmeraies plantées avec du matériel végétal sélectionné.

Dans les palmeraies sub-spontanées, le peuplement palmier, natif, est volontairement laissé sur les parcelles et exploité en cueillette pour leur fruit. Les cultures vivrières sont associées de façon permanente aux palmiers dans ce type de système. Ce type de système d'exploitation est notamment rencontré dans les banlieues de Porto-Novo et d'Abomey (Adjè et Adjadi, 2001). Les palmeraies plantées avec la variété locale non sélectionné (type *dura*) sont le plus souvent rencontré dans les départements du Mono et du Couffo, notamment sur le plateau Adja (Daane et al., 1997; Brouwers, 1993; Yemadjè et al., 2012). Dans ce type de système, des arbres relativement jeunes issus des repousses de palmier subspontané sont transplantées à forte densité sur les parcelles (de 400 à 1600 palms.ha⁻¹, Brouwers, 1993). Selon Brouwers (1993), ce type de système se caractérise par deux étapes: une première étape de jachère à palmier adulte (la jachère débute quand les palmiers ont environ 10 ans d'âge) puis une seconde étape où le peuplement palmier est progressivement abattu pour laisser place à une nouvelle palmeraie où les jeunes palmiers seront associées à une succession de culture annuelle sur 10 ans au moins. L'extraction du vin de palme après abattage des palmiers pour la production du *sodabi*, un alcool de consommation locale est l'objectif principal visé par les paysans

propriétaires de ce type de palmeraie. La production de régimes dans ce cas est une activité secondaire.

Dans les deux premiers type de système, le matériel végétal est essentiellement constitué de *dura* dont les graines contiennent moins de pulpe. Le peuplement palmier ne bénéficie d'aucun entretien. Toutes ces raisons expliquent la faible productivité en huile de ces palmeraies sub-spontanées (Adjè et Adjadi, 2001).

Les palmeraies plantées avec du matériel végétal sélectionné *tenera* sont celles volontairement plantés par l'agriculteur selon un dispositif plus ou moins régulier, dans le but principal de produire des régimes et s'oppose aux palmeraies sub-spontanées sus-décrits. Ces plantations dont la production revêt, pour les agriculteurs une haute valeur économique, bénéficient des opérations d'entretien de la part ceux-ci. Ce troisième système d'exploitation à laquelle nous nous référons comme étant les palmeraies ou plantations villageoises est celle concerné par cette thèse.

1.3.2. Histoire de la filière palmier à huile béninoise et place des plantations villageoises dans le contexte actuel de la filière

L'analyse historique de l'extension de la palmeraie au Sud du Bénin suggère que l'exploitation traditionnelle du palmier à huile était pratiquée dans la région du Sud du Bénin bien avant l'arrivée des premières explorations occidentales (Juhé-Beaulaton, 1998). La plante y était présente de façon naturelle. Les régimes de palmiers des « peuplements naturels ou sub-spontanées » étaient exploités en cueillette. L'extraction de l'huile se faisait de manière traditionnelle par foulage au pied et lavage à l'eau. Les premières tentatives de culture de palmier datent de la seconde moitié du 19^e siècle avec l'action du roi Guézo, qui régnait sur le trône du royaume du Dahomey de 1818 à 1858 (Fournier et al., 2001; Juhé-Beaulaton, 1998). En effet, l'Europe en pleine industrialisation, avait besoin de matières premières pour ses savonneries. La demande européenne en huile de palme devient donc de plus en plus forte. Dans le même temps, le commerce des esclaves, source majeure de revenu pour le royaume commençait à décliner dès 1848, date de son abolition en France. Le commerce de l'huile de palme s'est alors peu à peu substitué à celui des esclaves (Fournier et al., 2001; Juhé-Beaulaton, 1998). Il s'en suit une incitation de la population par le roi à la culture du palmier notamment dans la région d'Abomey pour satisfaire la demande européenne. Ce sont là les premières tentatives de culture du palmier et d'organisation de la filière.

Vers les années 1900, le Dahomey devient une colonie française. L'administration coloniale française qui a succédé au royaume continua l'organisation de la filière. L'industrialisation de la filière commence vers 1950. Le *secteur pour la rénovation de la palmeraie* (SRP) est créé en 1947 avec pour mission d'aménager la palmeraie naturelle existante mais aussi de développer la culture du palmier, par l'introduction d'un paquet technologique complet (plants sélectionnés, intrants, itinéraires techniques améliorés...). Un programme de plantation industrielle de variétés améliorées de palmier appelé « plan palmier » est mis en place. *L'institut de recherche sur les huiles et les oléagineux* (IRHO) est créé dès 1941 à Pobè pour venir en appui au SRP et fournir le matériel végétal sélectionné et le paquet technologique adapté. Quatre huileries sont implantées dans le sud du pays. Ces huileries sont alimentées en régimes par les peuplements sub-spontanés disponibles aux alentours des usines, par les blocs de plantations industrielles installées mais aussi les productions de paysans volontaires à qui on distribuait le matériel végétal sélectionné. La *société nationale des huileries du Dahomey* (SNADAH) est également créée dans la même période pour gérer les quatre usines. La transformation artisanale des productions des petits paysans qui exploitaient des palmeraies naturelles en cueillette n'est cependant pas remise en cause. L'année 1960 est celle des indépendances des colonies françaises en Afrique. Le nouvel état du Dahomey ainsi constitué a hérité des huileries et des plantations de l'administration coloniale. La *société nationale pour le développement rural* (SONADER) est mise sur pied dès 1962 pour prendre la relève du SRP avec pour mission « *de conduire les opérations de développement tendant à l'augmentation de la production agricole et la modernisation rurale* » (Dissou, 1972 ; P 472). Le modèle mis en place par les nouveaux dirigeants est fondé sur un système de zonage du territoire agricole et de spécialisation des terres. Ce modèle s'appuie sur des expropriations massives. Les terres soustraites aux paysans sont alors réparties en zones à palmier à huile (ZOPAH) qui approvisionnent les huileries ; mais aussi des zones de cultures annuelles (ZOCA) et des zones de pâturage et de boisement. Les nouvelles palmeraies industrielles installées dans les ZOPAH sont gérés par des coopératives de production appelées *coopératives d'aménagement rural* (CAR), sous tutelle de la SONADER. Les paysans expropriés étaient d'office déclarés membres des CAR et devront percevoir un loyer annuel en compensation. Entre 1960 et 1974, les constitutions de blocs de plantation ont entraîné l'expropriation de 17000 paysans propriétaires terriens. 27000 hectares de palmiers sélectionnés sont plantés et gérés par les CAR (Fournier et al., 2001). Toutefois, ces ex-proprétaires terriens qui estiment que la contrepartie financière est trop faible, se plaignent d'incessants retards dans le paiement et font des remous.

A partir de 1974, une réforme politico-administrative va intervenir au sommet de l'état. Le pays rentre dans une ère de dictature militaire, change de nom et devient Bénin. La SONADER (devenu *société béninoise pour le palmier à huile*, SOBEPALH en 1975) est démantelée en 1982. Un nouveau modèle est mis en place. Les palmeraies industrielles d'alors sont transformées en fermes d'état et mises sous la tutelle des *centres d'appui régional au développement rural* (CARDER). Les huileries sont quant à elles absorbées par la *société nationale pour l'industrie des corps gras* (SONICOG) qui est créée.

Les huileries mises en place par l'administration coloniale commencèrent par décliner. Entre 1971 et 1975, l'état béninois met en place trois complexes agroindustrielles en installant des huileries d'une capacité totale de 50 tonnes de régimes à l'heure chacune aux alentours des blocs de plantations industrielles gérées par les CAR (Figure 6, Fournier et al., 2001). Une savonnerie est également installée dans la région de Porto-Novo (savon Palmida® Figure 5). Jusque dans les années 75, ce modèle a permis à l'huile de palme béninoise de rester concurrentielle sur les marchés internationaux et l'huile de palme figure parmi les premières recettes d'exportations béninoises.

A partir des années 1975, d'importantes difficultés apparaissent sur le plan commercial ; ce sont notamment la baisse des cours mondiaux suite à l'augmentation de la production asiatique (Fournier et al., 2001). D'autres facteurs comme la mauvaise gestion des grandes palmeraies industrielles (manque d'entretien, vols de régimes, etc.), l'accroissement du déficit hydrique qui survient au cours des décennies 70 et 80 ont des conséquences sur le rendement des palmiers qui baissent considérablement. Fournier et al. (2001) rapportent par exemple que la production des coopératives du département de l'Atlantique est divisée par quatre entre 1975 et 1989. Cette baisse du rendement provoque l'augmentation du prix de revient du litre d'huile de palme. L'huile de palme béninoise perd sa compétitivité sur les marchés internationaux. La capacité d'exportation de la filière, d'environ 75 % en 1950, n'atteint plus que 15 % en l'an 2000 (Fournier et al., 2001). Plus aucun investissement public n'est réalisé dans le secteur du palmier à huile industriel après 1975. Au cours des années 1990, la privatisation des sociétés publiques survient sous la pression des instances économiques internationales. Le gouvernement béninois décide alors de la privatisation des usines gérées par la SONICOG. Parallèlement, l'année 1990 est celle du renouveau démocratique au Bénin. Fort de ce nouvel environnement plus propice aux réclamations, la contestation des ex-proprétaires terriens prend de l'importance, et ceux-ci, désormais réunis en association adoptent des méthodes de plus en plus fortes pour récupérer

leurs terres. Ces tensions autour de la question foncière nuisent gravement à la gestion des CAR qui s'enlisent jusqu'aujourd'hui dans des conflits internes incessants.

Dans le même temps, la demande interne du pays en huile de palme et celle du marché régional s'accroissent avec l'augmentation de la population et l'amélioration des moyens d'existence. Cette situation a conduit l'état à désormais s'orienter vers les petits planteurs privés, incitant ces derniers à la création de plantations privées de palmier à huile. Dès 1993, la diffusion du matériel végétal sélectionné en milieu villageois a été promue sous l'impulsion du *Centre de Recherches Agricoles sur les Plantes Pérennes* (CRA-PP, ex IRHO de Pobè) pour soutenir cette politique (Adjadi, 2008; Fournier et al., 2002). La prépondérance des plantations villageoises dans la filière actuellement est conséquence de cette politique (Figure 6). On dispose de peu de statistiques sur les superficies réellement plantées avec le palmier à huile sélectionné en milieu villageois. Toutefois, Lawani (2016, comm. pers.) a estimé à environ 70000 ha, la superficie totale des plantations villageoises de palmier à huile au Bénin. La transformation des noix en huile de palme est essentiellement artisanale et semi-artisanale et faite par les agriculteurs eux-mêmes (Fournier et al., 2001). La couverture de la demande en huile est effectuée à 83 % par le secteur artisanal qui produit de l'huile de palme brute. Cette production est complétée par des importations d'huile de palme raffinée (10 %) et le secteur industriel (7 %) (Fournier et al., 2001). L'importance sociale, culturelle et culturelle dont bénéficie le palmier à huile du fait des divers usages de ses composantes est très marquée et participe également de l'engouement des ruraux pour cette plante (Mensah, 1999) (Figure 7).



Légende

-  Limites pays
-  Zone inapte à la production
-  Zone de faible production
-  Zones de moyenne production
-  Zone de forte production

Acteurs de la filière

-  Centre de Recherche Agricole Plantes Pérennes
-  Complexe de Houin-agamè
-  Complexe du grand Agony
-  Complexe du grand Hinvi
-  Industrie Béninoise des Corps Gras
-  Villes
-  Fortes production
-  Limites départements



0 50 100 km



Figure 5: Zones de production et principaux acteurs de la filière palmier à huile au Bénin.

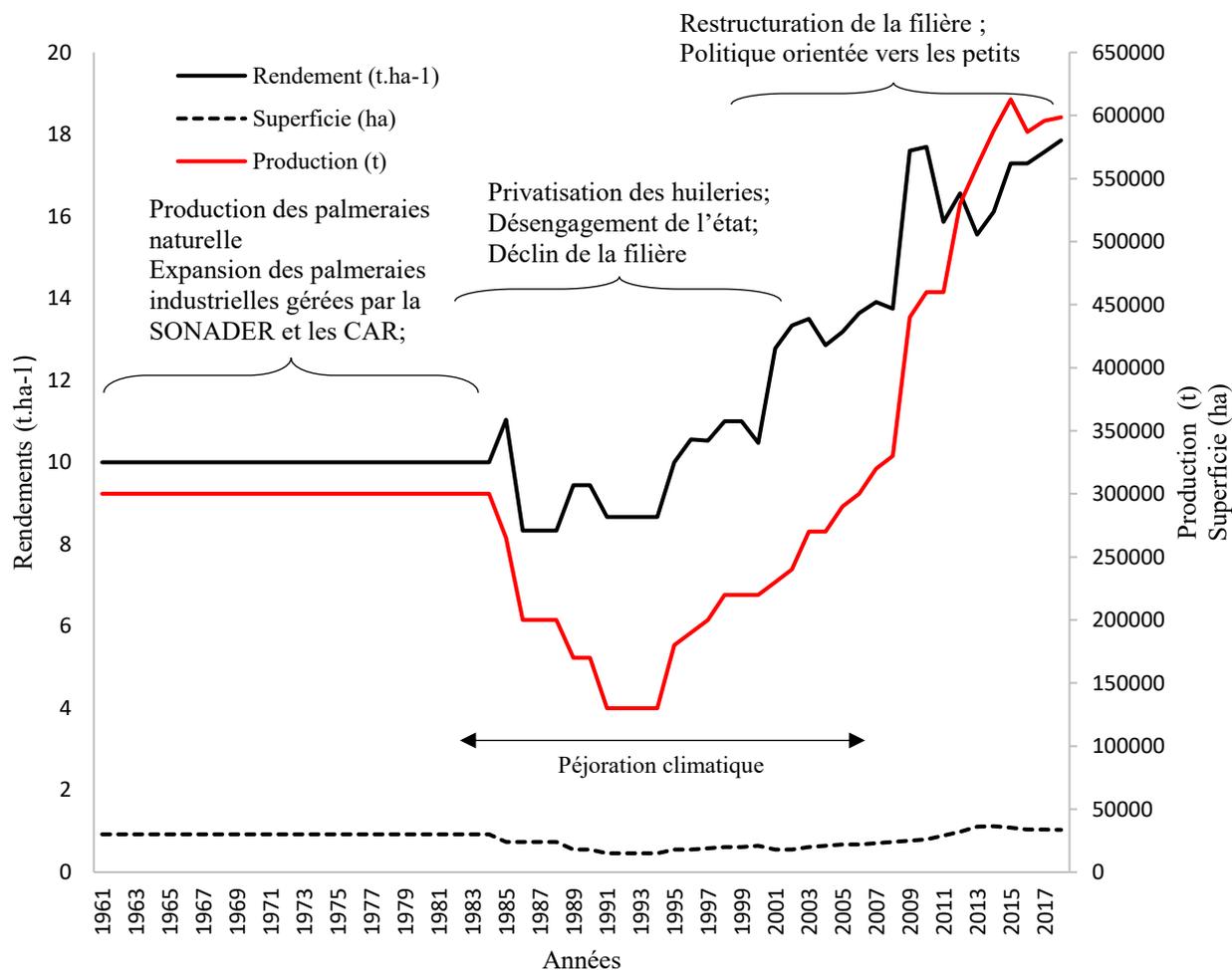


Figure 6 : Historique de la filière palmier à huile au Bénin.

Source : FAOSTAT, 2020



Figure 7: Quelques usages du palmier à huile en milieu rural au Bénin.

Crédit photos : E. Akpo, 2009 pris dans Akpo (2014), texte traduit de l'anglais

1.3.3. Le modèle de conduite technique des palmeraies immatures en milieu paysan au Sud-Bénin

Le Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP) assure la mise au point et la distribution exclusive du matériel végétal sélectionné (*Tenera*) à travers son réseau de pépiniéristes agréés, réparti dans toutes les zones de production. Le centre émet et vulgarise également les recommandations techniques pour l'installation et la bonne conduite des plantations (Aholoukpè et al., 2014). Cependant, du fait de contraintes foncières et/ou socio-économiques, des différences s'observent entre les itinéraires techniques recommandés et la conduite des plantations par les agriculteurs, particulièrement pendant les trois premières années correspondant à la période immature de l'arbre (Aholoukpè et al., 2013).

Le dispositif de plantation recommandé est plus ou moins respecté en milieu paysan (Aholoukpè et al., 2013). D'autres pratiques sont par contre plus rarement appliquées, comme par exemple le semis d'une légumineuse de couverture et la fertilisation minérale (Aholoukpè et al., 2013). En fait, la majorité des agriculteurs associent des cultures vivrières aux palmiers immatures. Le palmier immature devient ainsi la culture pivot d'un système agroforestier associant de nombreuses espèces vivrières. Le tableau 1 compare les pratiques recommandées par le CRAPP pour les palmeraies immatures (Aholoukpè et al., 2014) aux pratiques paysannes (Aholoukpé et al., 2013; Djegui et al., 1992). On peut noter que ces recommandations ont été le plus souvent établies dans des conditions peu représentatives de la parcelle d'agriculteur au Bénin. En particulier, il s'agit en majorité de palmeraies cultivées en pure et en station de recherche et non en association avec une rotation de cultures annuelles pendant la phase immature, comme c'est souvent le cas dans les palmeraies villageoises. Il n'est donc pas assuré qu'elles restent pertinentes dans le cas de plantations villageoises conduites en association culturale pendant la phase immature.

Tableau 1: Pratiques recommandées par le CRAPP et pratiques paysannes en palmeraies immatures.

Pratiques	Pratiques recommandées	Pratiques paysannes
Matériel végétal	Variétés sélectionnées <i>Tenera</i>	Idem
Dispositif de plantation	Dispositif en quinconce de 9 m x 9 m : Densité de 143 palmiers/ha	Idem
Entretien des ronds et des interlignes entre les palmiers immatures	Réalisation des ronds* sur un rayon de 1,5 à 2 m. Fréquence de nettoyage des ronds: 6 fois la première année et 4 par la suite ; Semis du <i>Pueraria Javanica</i> ; Rabattage de la végétation dans les interlignes ou herbicidage pour favoriser l'installation du <i>Pueraria</i> ;	Association systématique de cultures vivrières (maïs, tomate, niébé, arachide, manioc, piment, patate douce...). Pas de réalisation et d'entretien des ronds. Les cultures vivrières couvrent tout l'espace.
Fertilisation minérale	Dose : idéalement selon un diagnostic foliaire annuel, sinon doses normatives annuelles sur sol dégradé: - an 0 : 350 kg.ha ⁻¹ urée et 200 kg.ha ⁻¹ KCl ; - an 1 : 400 kg.ha ⁻¹ urée et 200 kg.ha ⁻¹ KCl ; - an 2 : 500 kg.ha ⁻¹ urée et 500 kg.ha ⁻¹ KCl ; - an 3 : 500 kg.ha ⁻¹ urée et 500 kg.ha ⁻¹ KCl.	Pas de diagnostic foliaire. Apport occasionnel d'engrais : Urée, NPK ou KCl

*Ronds : espace circulaire au sol de 1 à 2m de rayon délimité par les feuilles du jeune palmier.

Source : Tableau réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Aholoukpè et al. (2014) et Aholoukpè et al. (2013).

1.4. Logique socioéconomique des modes de conduite technique du palmier à huile

De nombreux travaux rapportent que malgré la promotion de la monoculture d'une seule espèce de cultures annuelles par la plupart des gouvernements dans le cadre des politiques de « révolution verte », les agriculteurs africains restent attachés à la pratique agroforestière (Garrity et al., 2010; Mbow et al., 2014). La conduite technique des parcelles agroforestières dépend de la manière dont l'agroforesterie est perçue par l'agriculteur et cadre avec ses stratégies et objectifs de production. Par exemple, Bucagu et al. (2013) rapportent qu'au Rwanda les préférences des agriculteurs possédant des bovins laitiers se tournent vers le *Calliandra calothyrsus* à cause de son rôle dans la galactogénèse.

Les objectifs de production conduisant aux choix techniques peuvent présenter des différences notables en fonction des caractéristiques structurelles de l'exploitation. Par exemple, plusieurs auteurs rapportent que les modes de gestion de la fertilité du sol au sein de l'exploitation sont susceptibles de varier entre les ménages de statut social différent, les propriétaires de bétail et

ceux qui n'en possèdent pas, ou entre ceux qui produisent pour le marché et ceux qui priorisent la subsistance (Chikowo et al., 2014; Tiftonnell et al., 2005a, 2005b). Même au sein d'un groupe d'agriculteurs homogènes par le statut social, les choix techniques peuvent être contrastés en fonction des objectifs de l'agriculteur. Par exemple, Tiftonnell et al. (2005b) rapportent que parmi les agriculteurs les plus nantis, certains tirent leur revenu principalement des activités non agricoles et cultivent des petites portions de terre pour l'autoconsommation alors que d'autres cultivent de grandes surfaces principalement avec des cultures à valeur commerciale pour le marché.

Dans le cas des systèmes à palmier à huile immature, peu d'études abordent le sujet des liens entre les choix techniques et le contexte socioéconomique des agriculteurs. Les connaissances produites au Bénin par Brouwers, 1993 et Yemadjè (2013) sur les aspects socioéconomiques liées au palmier à huile ont porté sur les systèmes à jachère palmier rencontrés sur le plateau Adja. De même, on trouve peu de travaux d'évaluation des revenus associés à ces systèmes. Nchanji et al. (2016) au Cameroun est l'une de rares références sur la manière dont les petits exploitants de palmier à huile utilisent le système agroforestier à base de palmier immature comme moyen d'améliorer leurs moyens de subsistance. L'étude rapporte que les agriculteurs qui associent des cultures vivrières au palmier en phase immature obtiennent un revenu annuel moyen de 705 000 FCFA par hectare là où 160 875 FCFA est dépensé annuellement pour le désherbage dans le cas de la conduite de la palmeraie en pure. Ce revenu est de 39% plus élevé que le salaire minimum garanti au Cameroun.

Dans une revue des théories et modèles d'analyse utilisés dans les études sur les facteurs influençant le choix d'une pratique agricole ou agro forestière, Meijer et al. (2016) distinguent des facteurs intrinsèques et des facteurs extrinsèques et discutent des interrelations entre eux. Les études sur les facteurs intrinsèques s'intéressent aux attitudes, motivations, connaissances et perceptions explicitées par les agriculteurs vis-à-vis de la pratique (Douthwaite et al., 2002; Mekoya et al., 2008; Sileshi et al., 2008). Les études sur les facteurs extrinsèques s'attachent à établir les liens statistiques entre les caractéristiques socioéconomiques des exploitations (e.g. niveau d'éducation, possession d'engins motorisés) et le choix ou l'adoption de la pratique (Adesina et al., 2000; Jerneck et Olsson, 2014). Cependant, si les rôles des facteurs extrinsèques dans l'adoption des pratiques sont relativement bien documentés (Mercer, 2004; Montambault et Alavalapati, 2005; Pattanayak et al., 2003), très peu de références existent sur le rôle des facteurs intrinsèques malgré leur importance pour la conception d'améliorations techniques appropriées pour une région cible (Meijer et al., 2016).

Du point de vue méthodologique, les approches participatives telles que mises en œuvre par Bucagu et al. (2008) paraissent plus adaptées que les questionnaires directifs pour collecter les données qualitatives et mettre en évidence les facteurs intrinsèques de choix. Les approches participatives offrent aux agriculteurs la possibilité de partager leurs connaissances et perceptions avec les chercheurs, ce qui peut aider à identifier les opportunités et contraintes pour concevoir les options d'amélioration. De telles approches sont proposées dans cette recherche.

Au plan statistique, Giller et al. (2011) proposent, afin de tenir compte de la diversité des facteurs qui peuvent affecter la sélection des pratiques agricoles, d'utiliser des méthodes mixtes combinant à la fois des données qualitatives sur les perceptions des agriculteurs et l'économétrie basée sur l'utilisation de modèles statistiques. Parmi les modèles économétriques, les modèles paramétriques sont majoritairement utilisés (Mercer, 2004), par exemple les modèles de régression Logit (Adesina et al., 2000 ; Adesina et Chianu, 2002) ou Probit (Pattanayak et Mercer, 1998) à variable dépendante binaire (1=adopte ; 0=n'adopte pas), les modèles Tobit à variable dépendante de type censuré (Rajasekharan et Veeraputhran, 2002). Des modèles paramétriques plus complexes : équations simultanées basées sur les modèles Probit multi-étagés (Hassan, 1998) ; modèles Logit à paramètres aléatoires (Asrat et al., 2010) sont également utilisés dans les études sur l'adoption de pratiques par les agriculteurs. Toutefois, les interactions entre variables dépendantes et indépendantes peuvent être multivariées et non linéaires. Une alternative non paramétrique aux méthodes de régression est de s'appuyer sur les arbres de décision qui permettent de prendre en compte non seulement les relations non linéaires mais aussi de visualiser les interactions complexes entre une variable expliquée et des variables explicatives qui peuvent être de type continu ou catégoriel (Breiman, 2017; N'Danikou et al., 2015). Cette alternative non paramétrique est également proposée dans cette thèse.

1.5. Fonctionnement biophysique des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

1.5.1. Mécanismes en jeu dans les systèmes agroforestiers

Dans les agrosystèmes monospécifiques, les individus possédant des traits fonctionnels similaires peuvent rapidement entrer en concurrence pour l'ensemble des ressources abiotiques (lumière, nutriments, eau). En revanche, dans les agrosystèmes plurispécifiques (dont les agro forêts) où des individus possédant différents traits fonctionnels sont mélangés, la concurrence pour les ressources peut être plus faible que dans les plantations monospécifiques. Trois

processus d'interactions entre espèces associées ont été mis en évidence dans ces systèmes plurispécifiques : ce sont la compétition, la complémentarité et la facilitation.

- **La compétition** survient quand la demande totale des deux espèces pour une ressource abiotique est supérieure à l'offre du milieu (Figure 7a). Des exemples de relations de compétition entre cultures annuelles et arbres associés non seulement pour la captation de la lumière mais aussi pour l'eau et les nutriments et leur impact sur les rendements des cultures annuelles sont rapportés par plusieurs études. Par exemple, Zomboudré et al. (2005) ont montré, en comparant des systèmes Karité/maïs, que l'effet d'ombrage de l'arbre était plus accentué pour le maïs situé sous les houppiers de type « boule » plus compact, que sous les houppiers de type « balai » et que les rendements du maïs étaient aussi moins importants sous les houppiers en boule que sous les houppiers en balai. Ollivier et al. (1994) démontrent dans un système où des jeunes cocoteraies sont associées sur les quatre premières années avec une succession de cultures à tubercules au Vanuatu, que la transmission du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) maximal en première année de la plantation du cocotier associé à la culture de manioc s'est progressivement réduite en relation avec la croissance des arbres pour ne laisser passer à quatre ans d'âge des cocotiers qu'un rayonnement de l'ordre de 30 à 40 % du rayonnement incident pour le manioc. L'auteur montre que cette compétition pour la lumière explique les baisses de rendement de l'ordre de 14 t.ha⁻¹ pour le manioc sur les parcelles à association cocotier- manioc après quatre cycles de cultures.

Sous climat semi-aride en Chine, Gao et al. (2013) ont étudié plusieurs variables pouvant expliquer le fonctionnement d'un système de culture en couloir à base de pommier (*Malus pumila*). Dans cette étude, l'assimilation nette, le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA), le taux d'humidité et de nutriments (NPK) dans le sol ont été étudiés en lien avec les rendements du soja et de l'arachide à 0,5 m ; 1,5 m et 2,5 m de la rangée d'arbres. Leurs résultats montrent une diminution significative de l'humidité du sol, des teneurs en NPK des sols et des rendements des cultures au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'arbre. Les résultats de Gao et al. (2013) montrent également que les rendements des cultures n'étaient pas significativement différents à 2,5 m des arbres comparativement au témoin agricole (sans arbre) montrant que l'effet de la compétition exercée par le pommier sur les cultures s'estompait à 2,5 m des arbres.

- **La complémentarité** survient entre espèces quand celles-ci sont quasiment indépendantes l'une de l'autre vis-à-vis de l'utilisation des ressources (lumière, eau, nutriments) (Figure 7b). C'est le cas lorsque deux espèces associées utilisent des formes différentes d'une même

ressource ou lorsqu'elles utilisent la ressource sous la même forme mais de façon différée dans le temps ou dans l'espace (Chesson, 2000; Fridley, 2001). Des exemples de complémentarité existent pour l'utilisation de l'eau et la lumière comme dans le cas des parcs à *Faidherbia albida* dont l'enracinement profond et la phénologie inversée (Roupsard et al., 1999) permet aux cultures annuelles de bénéficier d'un accès privilégié à la ressource en eau et à la lumière à cette période.

Dans le cas des systèmes cocotier/cacaoyer, Braconnier et al. (1998) montrent que le cacaoyer s'accommode de l'effet d'ombrage imposé par le cocotier et que sa consommation en eau n'est pas affectée par l'association avec le cocotier. La complémentarité pour les nutriments survient quand les périodes de besoins intenses de chaque espèce sont très contrastées dans le temps ou quand l'une des espèces a la capacité de fixer son azote à partir de l'atmosphère. C'est par exemple le cas dans les systèmes associant de jeunes hévéas avec une légumineuse de couverture comme le *Pueraria phaseoloides* (Clermont-Dauphin et al., 2016). Dans le même ordre d'idées, Ollivier et al. (1994) au Vanuatu montrent sur une parcelle portant un système agroforestier à base de cocotier que la rotation intercalaire d'igname, taro, patate douce et arachide n'a compromis ni la nutrition minérale des cocotiers ni leur développement végétatif par rapport au témoin cocoteraie pur à sol nu après quatre ans.

- **La facilitation** survient dans les cas où une espèce facilite l'accès aux ressources pour une autre espèce associée (Figure 7d). Par exemple, les processus d'ascension de l'eau via les racines profondes des arbres, au bénéfice des cultures annuelles à enracinement superficiel ont souvent été évoqués dans les systèmes agro forestiers (Sun et al., 2014). Clermont-Dauphin et al. (2018) démontrent que les cultures associées peuvent modifier les traits fonctionnels des racines des hévéas en Asie du Sud-Est pour faciliter l'accès à l'eau pour l'arbre notamment en période de sécheresse. Une méta-analyse par Félix et al. (2018) sur les systèmes agroforestiers à base d'arbustes de la bande sahélienne démontre que la majorité des références parviennent à la conclusion que les espèces ligneuses vivaces dans ces systèmes créent localement des îlots de ressources à leur proximité (ajout de litière, pourriture de racines, ascenseur hydraulique) qui améliorent les conditions de croissance et les rendements des cultures qui leur sont associées. En effet, ces études rapportent une incidence globalement positive sur la teneur en carbone du sol (de l'ordre de +20 à 75%) et des rendements de mil et sorgho associés globalement plus élevés en présence des arbustes (de l'ordre de -25 à + 120%). D'autres exemples de facilitation dans les systèmes agroforestiers sont liés au contrôle naturel des pestes

via notamment les différences de sensibilité des espèces présentes aux attaques de parasites (Lokossou et al., 2012).

Différents types de relations peuvent survenir concomitamment pour l'utilisation de différentes ressources (Figure 7c et d). Par exemple, Saidou et al. (2012) au Bénin ont montré que la présence des arbres de karité dans une culture de céréales a une influence positive sur l'humidité pondérale et la température du sol et cette influence est d'autant plus importante que le volume du houppier est grand. La température est plus élevée dans la surface de sol hors houppier comparativement aux zones sous houppier du karité, surtout lorsque ces arbres sont de gros diamètre. Les teneurs en carbone organique, en azote total et en calcium du sol sont aussi plus élevées sous houppier que hors houppier, grâce (au moins en partie) à la litière des feuilles qui permettent de recycler à la surface des sols des nutriments prélevés en profondeur par les arbres. Cependant, les arbres de karité ont eu une influence négative sur les rendements en grains et en paille du maïs (-47% et -33% respectivement sous houppier), l'effet de la compétition exercée par l'arbre de karité pour l'acquisition de la lumière étant prépondérante sur les relations de facilitation constatées sur le microclimat, la disponibilité des nutriments et de l'eau du sol.

A notre connaissance, des relations de type complémentarité ou facilitation n'ont encore jamais été démontrées dans le cas des systèmes agroforestiers à palmier tels que ceux rencontrés au sud du Bénin. Comme le soulignent Schroth et al. (2001), il est important d'approfondir les études sur les relations entre la strate arborée et les autres groupes de végétation en agroforesterie. Si les différents mécanismes de compétition, de complémentarité et de facilitation ne sont pas connus et évalués et si leur lien avec la gestion technique n'est pas mis à jour, aucune prédiction de la production ne peut être effectuée et l'amélioration de la gestion technique du territoire agroforestier ne peut être réalisée de manière adéquate.

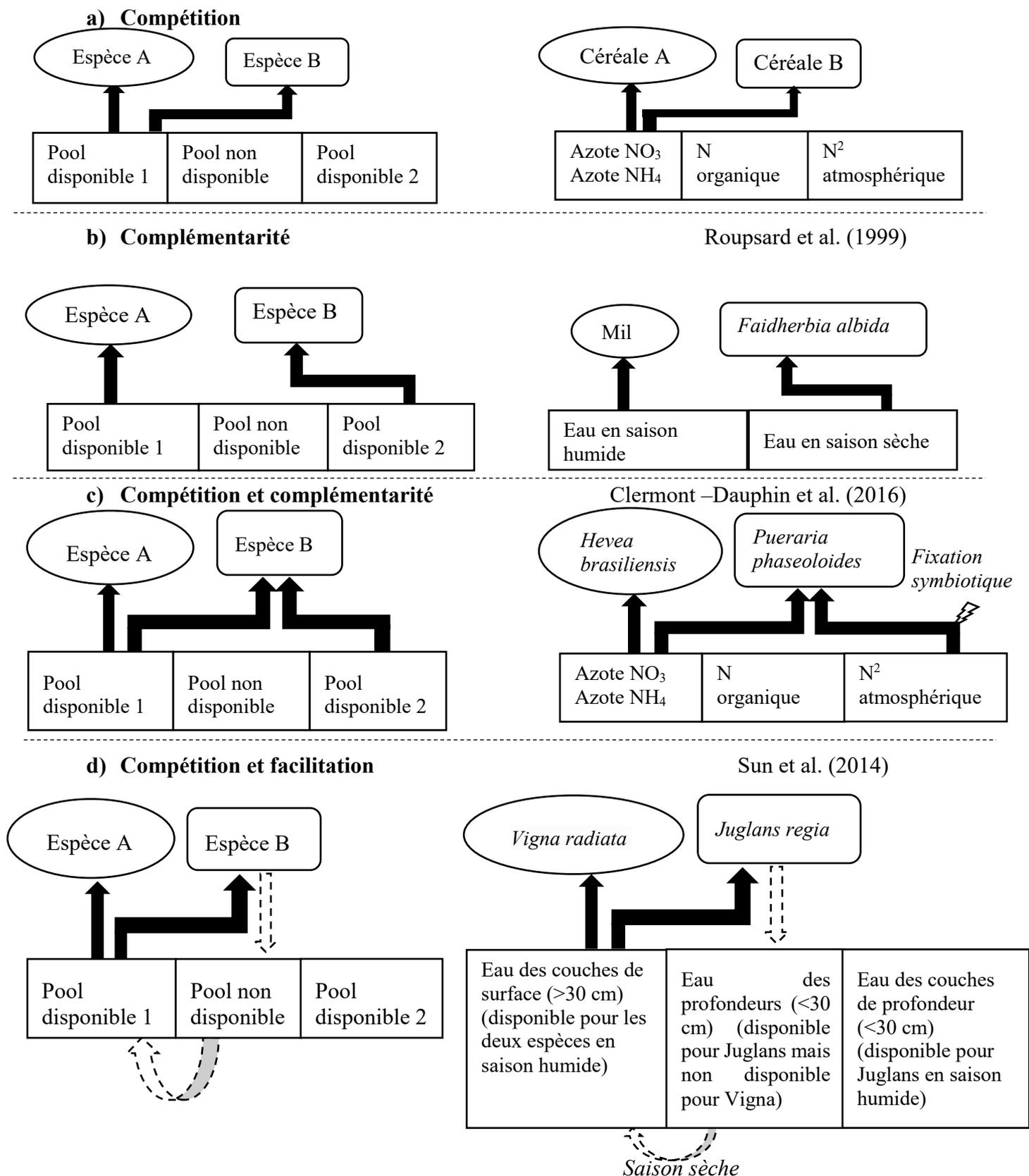


Figure 8: Divers processus d'interactions entre espèces pour l'acquisition des ressources abiotiques en peuplements plurispécifiques (colonne de gauche) et leur déclinaison en exemples concrets sur des systèmes agroforestiers (colonne de droite).

Source : adapté de Hinsinger et al. (2011).

1.5.2. Cas des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

1.5.2.1. Effet de la compétition pour les ressources abiotiques du sol sur les états et performances du palmier à huile et des cultures associées

A l'échelle mondiale comme au Bénin, des écarts de rendements en huile de palme importants sont notés entre les petites exploitations et les plantations industrielles où les pratiques agricoles intensives en intrants peuvent assurer un haut niveau de rendement. Par exemple, en Indonésie, le rendement des petits exploitants est estimé à 50%, inférieur au rendement potentiel de l'arbre, alors que le rendement dans les agro-industries est estimé entre 85% et 90% du rendement potentiel de la plante (Cramb et McCarthy, 2016; Lee et al., 2014). Au Cameroun, des différences de rendements de l'ordre de 2 à 14 t.ha⁻¹ sont rapportées entre les petites exploitations de palmier à huile et les plantations industrielles (Bakoumé et al., 2002; Rafflegeau et al., 2010).

Au Bénin, il existe peu de données sur les rendements effectifs des petites exploitations agricoles de palmier à huile, mais on sait qu'ils sont généralement inférieurs au rendement obtenu en station de recherche au CRA-PP (Adjè, 2004) et insuffisants pour satisfaire la demande intérieure. Les travaux sur les effets de la culture annuelle associée sur le fonctionnement du palmier en phase immature et ses performances de production sont rares. De même, peu de références sont retrouvées dans la littérature sur les effets du palmier sur les performances de production des cultures annuelles dans ces systèmes. Les études les plus complètes sur ces différentes questions sont fournies par Daniel et de Taffin (1974) ; Salako et al. (1995) ; Erhabor et al. (2002) ; Adjè (2004) ; Rafflegeau et al. (2010). Quelques spécificités de ces travaux sont rapportées ci-dessous.

1.5.2.1.1. Daniel et de Taffin (1974) : mise en évidence d'une compétition pour l'eau exercée par une légumineuse associée et plasticité racinaire du palmier

Ces auteurs ont travaillé sur l'effet de la conduite des palmeraies en sol nu par rapport à leur conduite en association avec le *Pueraria javanica* au jeune âge. L'étude a été réalisée en station de recherche au Bénin. L'état hydrique et les rendements des palmiers en fonction des traitements à différents âges sont présentés par la Figure 8. Il ressort de ce graphique que le palmier conduit en sol nu a toujours un rendement supérieur au palmier avec *Pueraria*. De plus, le nombre de jours de stress hydrique du palmier est largement diminué dans le cas de palmier avec *Pueraria* (Figure 8). Ces résultats suggèrent l'existence d'une compétition pour l'eau exercée par le *Pueraria* qui participe à une perte de rendement de 17 kg soit environ 40% de régime de palme

par arbre associée au *Pueraria* à 6 ans d'âge des arbres. Le développement des appareils aérien et racinaire des palmiers à 4 ans d'âge montre que les palmiers en sol nu présentent un meilleur développement de l'appareil aérien et racinaire que ceux conduits en association avec le *Pueraria* et qu'ils produisent moins de racines d'exploration (Racines I et II, voir 1.1) que les palmiers conduits avec *Pueraria*, mais plus de racines fines absorbantes (Racines III et IV, voir 1.1) (Tableau 2). Ces observations suggèrent que la compétition pour l'eau exercée par le *Pueraria* a obligé le palmier à privilégier le déploiement de ces racines en profondeur pour aller chercher l'eau au moment où le palmier sur sol nu a développé son réseau de racines en surface pour améliorer sa disponibilité en nutriments. Malheureusement, l'étude ne fournit pas des données sur la nutrition minérale des palmiers dans les deux traitements considérés. L'étude ne fournit pas non plus les données détaillées sur les accidents climatiques ayant prévalu ni sur la gestion technique en année 4 qui pourraient permettre d'expliquer la baisse de rendement dans les deux situations malgré le faible nombre de jours de stress hydrique du palmier en sol nu. L'association de *Pueraria* aux jeunes palmeraies à huile constitue une pratique recommandée (voir 1.3.3.). La réalisation et le nettoyage des ronds lors des associations palmier-*Pueraria* est également recommandée pour limiter les effets de la compétition hydrique rapportée par Daniel et de Taffin (1974).

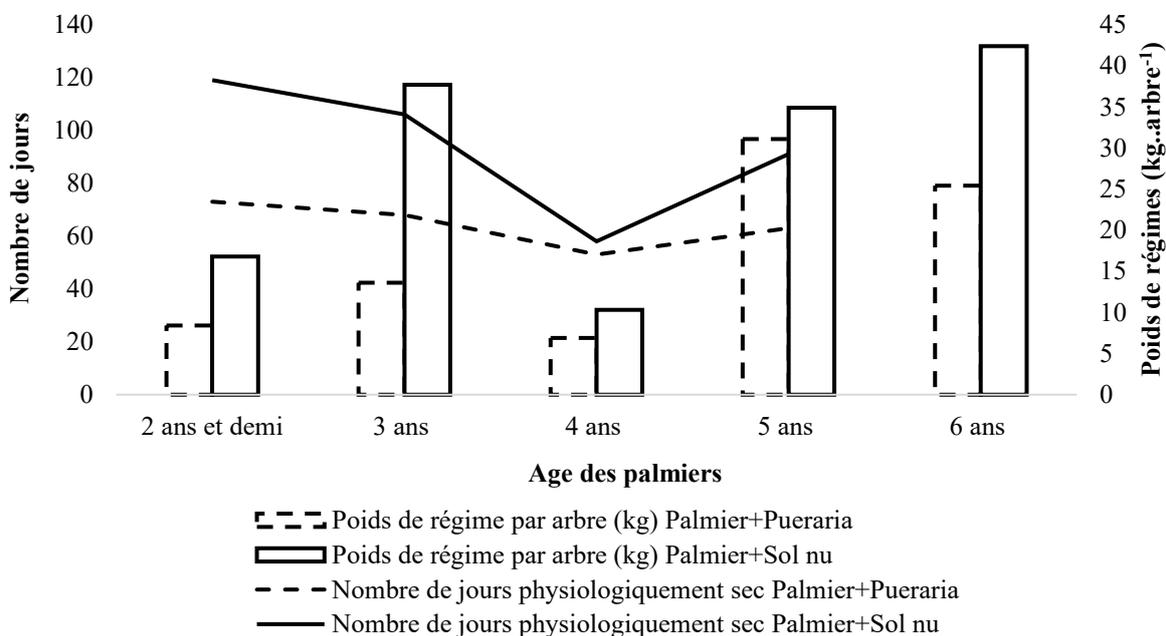


Figure 9: Etat hydrique en saison sèche et rendement par arbre des palmeraies associées au *Pueraria* par rapport à celles conduites en sol nu. Le palmier a été considéré comme physiologiquement sec pour une ouverture stomatique < 5. Les nombres de jours sont la moyenne de mesures effectuées tout au long de la saison sèche.

Source : Graphique réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Daniel et de Taffin (1974).

Tableau 2: Développement végétatif des appareils aériens et racinaires à 4 ans d'âge des palmiers dans l'étude de Daniel et de Taffin (1974).

Mode de gestion	Paramètres végétatifs aériens			Densité racinaire par type de racine (g.m ⁻²)		
	Circonférence au collet (cm)	Longueur 4 ^e feuilles (cm)	Nombre de feuilles émises sur 18 mois	RI+II	RIII+RIV	Total
Palmier + Pueraria	231	356	25,4	163 (47%)	181 (53%)	344 (100%)
Palmier + sol nu	265	394	27,5	140 (34%)	272 (66%)	412 (100%)

Toutes les valeurs mentionnées sont les moyennes sur 12 arbres, RI= racines primaires issues du stipe ; RII=racines secondaires dérivant des RI ; RIII et RIV = racines tertiaires (RIII) et quaternaires (RIV) absorbantes et peu lignifiées.

Source : Tableau réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Daniel et de Taffin (1974).

1.5.2.1.2. Salako et al. (1995) : l'adaptation de la culture annuelle au manque de lumière augmente en sol riche

L'étude de Salako et al. (1995) concerne uniquement les états et performances de la culture annuelle dans le cadre de son association avec le palmier. L'étude compare sur deux sols de fertilité différente des paramètres végétatifs (surface foliaire, longueur du pétiole et nombre de feuilles) et les rendements de macabo sous et hors effet de l'ombrage exercé par des palmiers de cinq ans. L'étude parvient à des rendements similaires du macabo dans les deux zones (sous ombrage vs. hors ombrage) quelle que soit la fertilité du sol (Figure 9). L'étude montre également des changements morphologiques du macabo : augmentation de surface foliaire et allongement du pétiole pour pallier la faible luminosité dans la zone sous ombrage. Les changements morphologiques sont plus importants sur sol riche. Cela suggère que les cultures annuelles arrivent mieux à s'adapter à la faible luminosité quand les conditions minérales et hydriques ne sont pas limitantes. Les rendements moyens de macabo obtenus sur sol riche (11,7 t.ha⁻¹) étaient proches des rendements généralement obtenus dans la région (entre 12 et 20 t.ha⁻¹), suggérant une faible compétition de l'arbre dans le cadre de ces agrosystèmes.

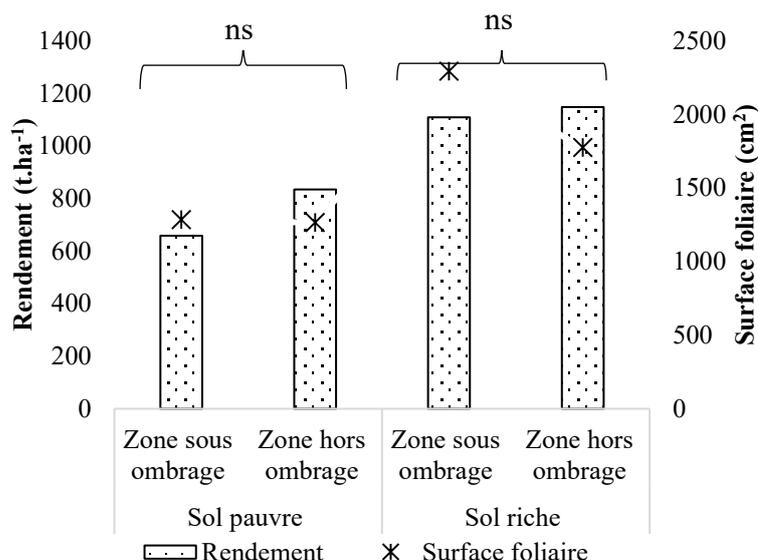


Figure 10: Rendements et surface foliaire du macabo (*Xanthosoma sagittifolium*) sous et hors ombrage sur deux sols différents par leur fertilité. Il n'y a pas de différences significatives entre les rendements et surface foliaire entre les zones considérées.

Source : Graphique réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Salako et al. (1995).

1.5.2.1.3. Erhabor et al. (2002) : faible compétition du palmier sur des cultures de maïs ou soja associées. Mais forte compétition de l'addition d'une racine tubéreuse (macabo) dans ces systèmes

Erhabor et al. (2002) comparent sur des parcelles en monoculture et des parcelles d'association de ces cultures avec des palmiers de deux ans : 1) la distribution du système racinaire du palmier sur une profondeur de 90 cm et une distance de 2,25 m ; 2) les rendements des cultures annuelles (maïs, soja, macabo). Des combinaisons de plusieurs cultures annuelles associées au palmier ont également été testées. Bien qu'il n'existe pas de différences significatives entre les profondeurs racinaires suivant la nature des cultures associées, l'étude montre des baisses de concentration racinaire sur le plan vertical chez les palmiers en association bispécifique ou trispécifique incluant le macabo. Toutefois, les différences sont non significatives et cette tendance n'est pas observée sur le plan horizontal. L'auteur montre aussi que les rendements du maïs et du soja ne sont pas affectés par la présence du palmier mais sont significativement plus faibles sur les parcelles portant des associations doubles et triples incluant le macabo (Tableau 3). Cependant, le rendement du macabo reste stable quel que soit le nombre de cultures qui lui est associé. Ces résultats suggèrent que la disponibilité des ressources du sol (eau et nutriments) est suffisante pour couvrir les besoins d'au plus deux peuplements associés (e.g. Palmier - maïs). Sur les parcelles portant plus de deux peuplements, le peu de ressources

existants est absorbé par le macabo qui exerce une forte compétition grâce à ses racines tubéreuses. Cette compétition du macabo serait aussi à la base de la réduction des rendements des autres peuplements annuels ainsi que de la baisse racinaire des palmiers présents dans ces associations. La compétition pour la lumière n'a pas été limitante dans cette étude. Toutefois, l'étude ne rapporte pas de mesures sur les états nutritionnels et hydriques ainsi que les rendements des palmiers dans le cadre de ces associations.

Tableau 3 : Rendements de combinaisons de cultures annuelles (soja, maïs, macabo) associées au palmier ou non.

	Soja	Maïs	Macabo	Total de Racines sur 90cm (mg.cm⁻³)
Soja seul	1,4a	-	-	-
Maïs seul	-	2,6a	-	-
Palmier+Soja	1,3a	-	-	2,88a
Palmier+Maïs	-	2,5a	-	2,9a
Palmier+Maïs+Soja	-	-	-	2,88a
Palmier+Macabo	-	-	3,6a	2,89a
Palmier+Macabo+Soja	0,8b	-	3,3a	2,77a
Palmier+Macabo+Maïs+Soja	0,7b	1,5b	3,2a	2,75a

Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5%.

Tableau réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Erhabor et al. (2002).

1.5.2.1.4. Adjè (2004) : baisse de production du palmier de 19% quand il est associé avec du manioc par rapport à une association avec graminées et légumineuses

Adjè (2004) compare, grâce à des essais de longue durée en station de recherche au Bénin, les effets combinés de l'association de cultures vivrières et de la densité de plantation du palmier sur une série d'indicateurs d'états et de performances du peuplement palmier. L'auteur met en évidence un développement végétatif plus faible et une baisse de production du palmier de 19% quand l'arbre est associé avec du manioc comparé à son association avec des graminées et légumineuses (Maïs / Niébé) (Figure 10). Par contre, les rendements en régimes des palmeraies conduites en associations aux graminées et légumineuses sont semblables aux palmeraies conduites en association avec du *Pueraria javanica* à densité égale du palmier. L'auteur indique que la variabilité interannuelle des rendements en régimes sur les deux parcelles (parcelles palmier- Maïs / Niébé et palmier – *Pueraria*) est la conséquence des épisodes de sécheresse entre les années. Il note une teneur satisfaisante des feuilles de palmier en azote mais une déficience prononcée en potassium aussi bien dans les palmiers associés à une plante de couverture (*Pueraria javanica*) que dans ceux associés aux cultures annuelles (graminées et

légumineuses), toute chose égale par ailleurs. Des mesures de l'ouverture de stomates réalisées dans cette étude ont permis de mettre en évidence un déficit hydrique plus important des palmiers associés aux cultures annuelles (maïs et niébé) par rapport aux parcelles palmier associées au *Pueraria*. Il est donc peu probable que les différences de rendements de l'arbre soient liées aux nutriments ; cependant, la compétition pour l'eau pourrait expliquer les rendements souvent plus faibles de l'arbre dans le cadre de l'association avec la rotation Maïs/Niébé que dans le système palmier-*Pueraria*. Cette même étude de Adjè (2004) met en évidence l'effet de la compétition pour la lumière sur les performances du manioc. Il rapporte, en effet, une baisse totale de rendements de l'ordre de 10,85 t.ha⁻¹ de manioc après cinq cycles consécutifs de manioc dans la palmeraie.

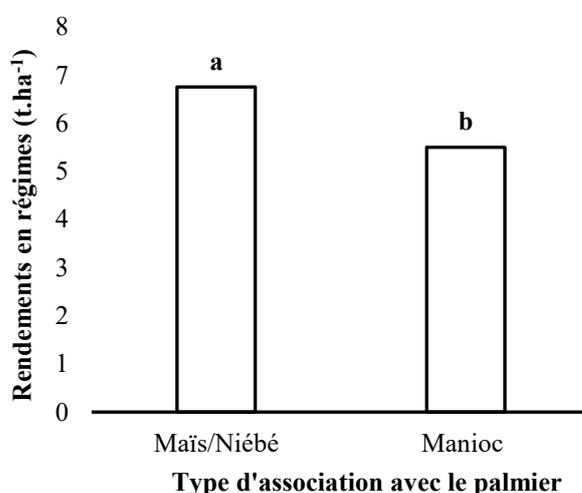


Figure 11: Rendements en régime de palmeraies adultes (10 ans d'âge) associées en permanence au manioc pendant leur jeune âge et à une rotation maïs/niébé. Les lettres a et b indiquent que la différence entre les rendements des deux modalités est significative au seuil de 5%.

Source : Graphique réalisé personnellement sur la base des données rapportées par Adjè (2004).

1.5.2.1.5. Raffleau et al. (2010) : la conduite de la phase immature affecte la nutrition azotée et potassique ainsi que la production du palmier adulte

Au Cameroun où la pratique d'association de cultures vivrières aux palmiers a également cours, Raffleau et al. (2010) démontrent, en confrontant sur un réseau de palmeraies villageoises camerounaises les teneurs foliaires en N et K de plantations adultes et les modes de conduite technique des mêmes palmeraies pendant la phase immature, que le mode d'usage de la terre précédant l'installation de la palmeraie, la fréquence d'association de cultures pendant la phase immature de l'arbre et les pratiques de fertilisation potassique affectent la nutrition azotée et

potassique et par conséquent, le rendement du palmier à huile une fois adulte. Ils montrent que les déficiences en N sont les plus importantes dans les situations où la fréquence des cultures annuelles est importante, alors que la déficience en K est généralement liée aux pratiques de fertilisation (apport ou non de KCl) (Figure 11). Ils signalent que les plantes à tubercules associées au stade immature du palmier sont responsables à la fois de déficience azotée et potassique du palmier une fois adulte. Un des intérêts de ce travail est d'avoir été réalisé dans le cadre des parcelles d'agriculteurs et en comparant des modes de conduite réels de leurs palmeraies.

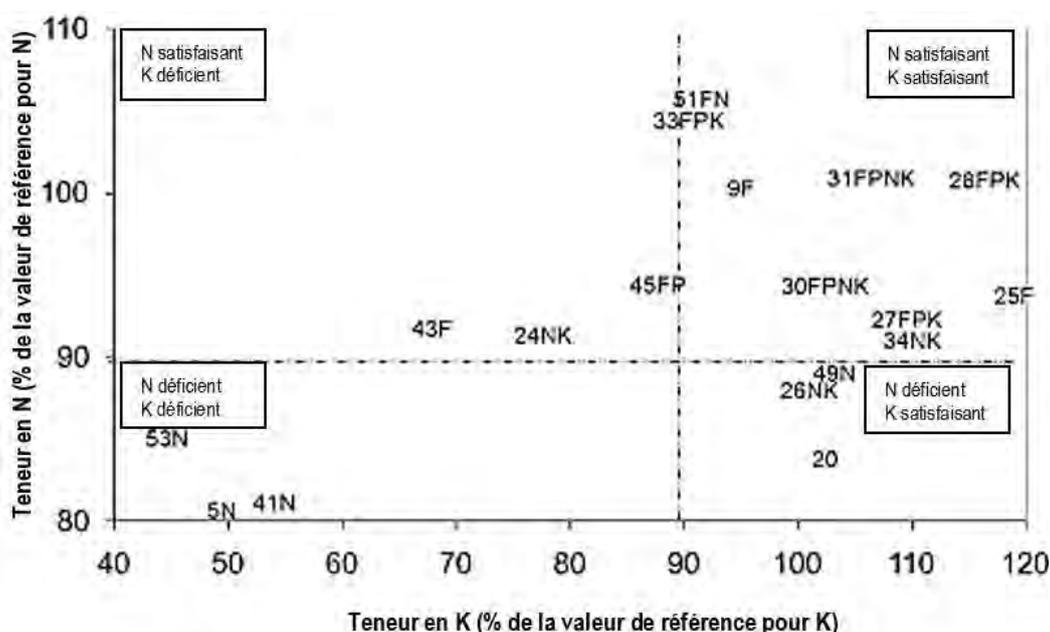


Figure 12: Teneurs foliaires en N et K des 18 palmeraies villageoises adultes étudiées par Rafflegeau et al. (2010) au Cameroun.

Une teneur en N et K supérieure à 90% de la valeur de référence est considérée comme satisfaisante. Les chiffres sont les numéros attribués aux parcelles par les auteurs. Les symboles utilisés sont : F=Forêt + quelques cultures vivrières; FPK=Forêt + quelques cultures vivrières + Pueraria + applications régulières de KCl ; NK= plusieurs cultures + absence de Pueraria + applications régulières d'urée +KCl ; N=Mosaïque de cultures + absence de Pueraria + faible application de N et K.

Source : Adaptée de Rafflegeau et al. (2010).

1.5.2.2. Intérêt de l'évaluation de la production de biomasse totale du palmier

De nombreuses questions de recherche ne peuvent être correctement traitées sans une estimation fiable de la biomasse totale du palmier. Une de ces questions est par exemple celle de l'évaluation de l'impact des changements d'usage des terres sur la séquestration du carbone et par conséquent la mitigation du changement climatique: forêt naturelle versus plantations de palmier à huile sous fond de controverse générée par les déforestations massives au profit de

plantation de palmier à huile en Asie du Sud-Est (voir sous chapitre 1.2.). Les plantations adultes sont le plus souvent concernées par ces estimations (Germer et Sauerborn, 2008; Reijnders et Huijbregts, 2008). Une autre question faisant appel à une telle estimation est celle de l'analyse de la croissance du palmier au cours du temps en vue de mettre en évidence les périodes à forte vitesse de croissance et sa répartition entre différents organes (Corley et Tinker, 2016; Jaffré et Namur, 1983). Un troisième objectif de l'estimation de la biomasse totale des palmiers est la mesure des quantités d'éléments (nutriments et eau) absorbées en vue de faire des bilans, de calculer les efficacités des nutriments apportés et de raisonner les recommandations de fertilisation (Goh et al., 2003).

La manière la plus évidente d'estimer la biomasse totale du palmier serait de détruire des plants entiers et les peser ; mais ceci est difficile à réaliser en particulier sur des parcelles d'agriculteurs. On ne pourrait plus repasser sur les mêmes arbres pour évaluer des dynamiques dans le temps. De plus, le temps de travail serait important car il faudrait manipuler une grande quantité de biomasse fraîche et calculer leur teneur en eau en vue d'évaluer des biomasses sèches par hectare. La méthode destructive d'estimation de la biomasse totale du palmier a été par exemple utilisée par Jaffré (1983) et Syahrudin (2005) en Indonésie. En vue de simplifier le travail, Jaffré (1983) limite les mesures de biomasse et de stock de carbone à un arbre moyen par plantation.

Une alternative pour éviter la destruction des palmiers est de s'appuyer sur des relations allométriques. Ces méthodes allométriques ont l'avantage d'être moins chères, plus rapide que les méthodes destructives et peuvent être répétées sur les mêmes plants à différents moments. Des relations allométriques d'estimation de la biomasse aérienne du palmier ont été mises au point par Aholoukpè et al. (2013) ; Corley et Tinker (2003) ; Dewi et al. (2009) ; Khalid et al. (1999) et Thenkabail et al. (2004) pour des palmeraies adultes (Tableau 4). Cependant, ces équations préexistantes ne sont pas universellement valables. Par exemple, Corley et Tinker (2016, P.96) recommandent de vérifier les constantes dans les équations dans les circonstances particulières d'intérêt pour éviter les inexactitudes liées à la faible précision des méthodes préexistantes pour l'estimation de la biomasse du tronc. Ainsi, les équations allométriques établies pour les palmiers adultes ne sont pas pertinentes pour des palmiers immatures (Corley et Tinker, 2016; Henry et al., 2011). Des équations allométriques adaptées aux palmeraies immatures sont conçues dans le cadre de cette thèse, comme une contribution aux études futures visant à pousser la question de l'évaluation multicritère de ces systèmes agroforestiers et de leurs marges d'amélioration.

Tableau 4: Equations allométriques d'estimation de la biomasse aérienne du palmier adulte

Références	Compartiment de la biomasse aérienne concernée	Equations	Variables incluses	Région d'étude
Khalid et al. (1999)	Biomasse aérienne (BA) fraîche (kg)	$BA=725+197h_{totale}$	hauteur totale de l'arbre (en m)	Malaisie
Thenkabail et al. (2004)	Biomasse aérienne (BA) sèche (kg)	$BA=0,3747h_{tronc}+3,6334$	h_{tronc} =hauteur du tronc (en m)	Afrique de l'ouest
Dewi et al. (2009)	Biomasse aérienne sèche (BA) (kg)	$BA=0,0976h_{totale} +0,0706$	h_{totale} =hauteur totale de l'arbre (en m)	Indonésie
Corley et Tinker (2003)	Biomasse aérienne sèche (BA) (kg)	$BA=BA_{tronc} + B_{feuille}$		Malaisie
	Biomasse sèche d'une feuille (Bfeuille) (kg)	$B_{feuille}=0,02wd+0,21$	w =largeur de la feuille (mm) ; d =épaisseur de la feuille (mm)	
Aholoukpè et al. (2013)	Biomasse sèche d'une feuille mature (Bfeuille) (kg)	$B_{feuille}=1,147+2,135*[1/3*(PS_{rachis17}+PS_{rachis21}+PS_{rachis25})]$	$PS_{rachis}=1,133*PS_{frag}/L_{frag}*L_{rachis}$; PS_{rachis} resp. 17 ; 21 ; 25= PS_{frag} ; 25= PS_{rachis} ; PS_{frag} = poids sec d'un fragment de 0,30 m découpé au lieu du rachis ; L_{frag} =longueur du fragment ; L_{rachis} =longueur du rachis	Bénin

1.6. Evolution du sol dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

Les états du sol peuvent également être modifiés par l'association de cultures vivrières au palmier à huile. Au Nigéria, Erhabor et Filson (1999) étudiant les variations annuelles de la fertilité des sols sous peuplement pur et mixte de palmier à huile et cultures vivrières (maïs, soja, macabo), rapportent une baisse plus importante des taux de matières organiques, d'azote et des bases échangeables dans les palmeraies à association que dans les palmeraies conduites en pure, au bout des trois premières années de la plantation dans la couche (0-30 cm). L'étude rapporte des différences de teneurs en matière organique du sol de l'ordre de 19 ; 46 et 33% respectivement sous maïs, soja, macabo par rapport à la palmeraie pure. Au Vanuatu, Ollivier et al. (1994) parviennent à une conclusion similaire sur des parcelles d'association cocotier-

culture vivrière. En effet, ces auteurs rapportent qu'au bout de 4 ans, les teneurs en matière organique et azote ont diminué dans les cocoteraies portant les associations de cultures alors qu'elles sont restées similaires aux teneurs enregistrées en situation initiale dans les cocoteraies conduites en pure et à sols nus dans la couche de surface (0-25 cm).

Cependant, Djegui (1992) parvient à un résultat contraire en comparant les états des sols sous des palmeraies de 20 ans d'âge conduit au jeune âge soit en association avec des légumineuses de couverture (*Pueraria javanica* et *Centrosema pubescens*) (PSC) soit sans culture associée dans les interlignes d'arbres, donc avec sol nu (PSN). L'étude rapporte des teneurs plus faibles en argile, en C et N dans la couche (0-15 cm), pour les parcelles PSN que PSC. L'existence d'une "érosion sélective" des éléments fins sous les palmeraies dont les interlignes ont été gardées nues au cours des premières années est évoquée.

Le Tableau 5 récapitule les résultats de recherche obtenus par les études ci-dessus présentées. Dans l'ensemble, il ressort que sur des sols riches (MO initial > à 3%) comme dans les cas des études de Erhabor et Filson (1999) et Ollivier et al. (1994), que l'introduction de cultures intercalaires entraîne une réduction des teneurs en matière organique des sols tandis que sur les sols pauvres comme dans les cas de Djegui (1992), c'est la tendance contraire. Le travail de Erhabor et Filson (1999) comparant les systèmes de jeunes palmiers avec maïs, soja ou macabo indique que les parcelles à association comportant le maïs montrent les teneurs en matière organique les plus basses. Ce résultat est étonnant si l'on considère que les rapports C/N plus élevés des pailles du maïs devraient permettre un stockage plus important de carbone et donc de matière organique que les fanes de soja et les résidus de macabo. Il est possible que le compartiment de matière organique particulaire (non pris en compte dans l'analyse) soit plus important dans le cas des associations avec maïs.

Tableau 5: Synthèse de la littérature sur l'effet de l'introduction de cultures annuelles sur les caractéristiques des sols dans les plantations de palmier (ou autres espèces proches) en région tropicale

Système	Age de la plantation	Région	Résultat	Auteur
Palmier associé respectivement au maïs, soja, macabo	3 ans	Nigéria	Baisse significative des taux de matières organiques, d'azote et des bases échangeables dans la couche (0-30 cm)	Erhabor et Filson (1999)
Cocotier associé à une rotation igname, taro, patate douce	4 ans	Vanuatu	Baisse des taux de matières organiques, d'azote et des bases échangeables dans la couche (0-25 cm)	Ollivier et al. (1994)
Palmier associé à légumineuses de couverture (<i>Pueraria, Centrosema</i>)	20 ans	Bénin	Augmentation des teneurs en matière organique et azote dans la couche (0-15 cm)	Djegui (1992)

1.7. Cadre de l'étude, problématique et stratégie de recherche

1.7.1. Cadre de l'étude

L'étude est conduite dans la zone sud du Bénin (6°25' et 7°30' N sur 2° et 2°30' E), la plus propice à la culture du palmier à huile. Le plateau d'Allada situé dans le département de l'Atlantique (au sud-centre du Bénin) est retenu comme cadre physique de cette étude compte tenu 1) de l'importance de la production de palmier : le département de l'Atlantique est classé au deuxième rang en termes de production du palmier à huile au Bénin, derrière la région de l'Ouémé-Plateau (Adjadi, 2008); et 2) de son homogénéité en termes de caractéristiques édaphiques et climatiques (Azontondé et al., 2010): nous verrons en effet ci-dessous en présentant la démarche d'étude que ce critère d'homogénéité est un atout pour la mise à jour des effets de différences de gestion technique sur les performances agroécologiques.

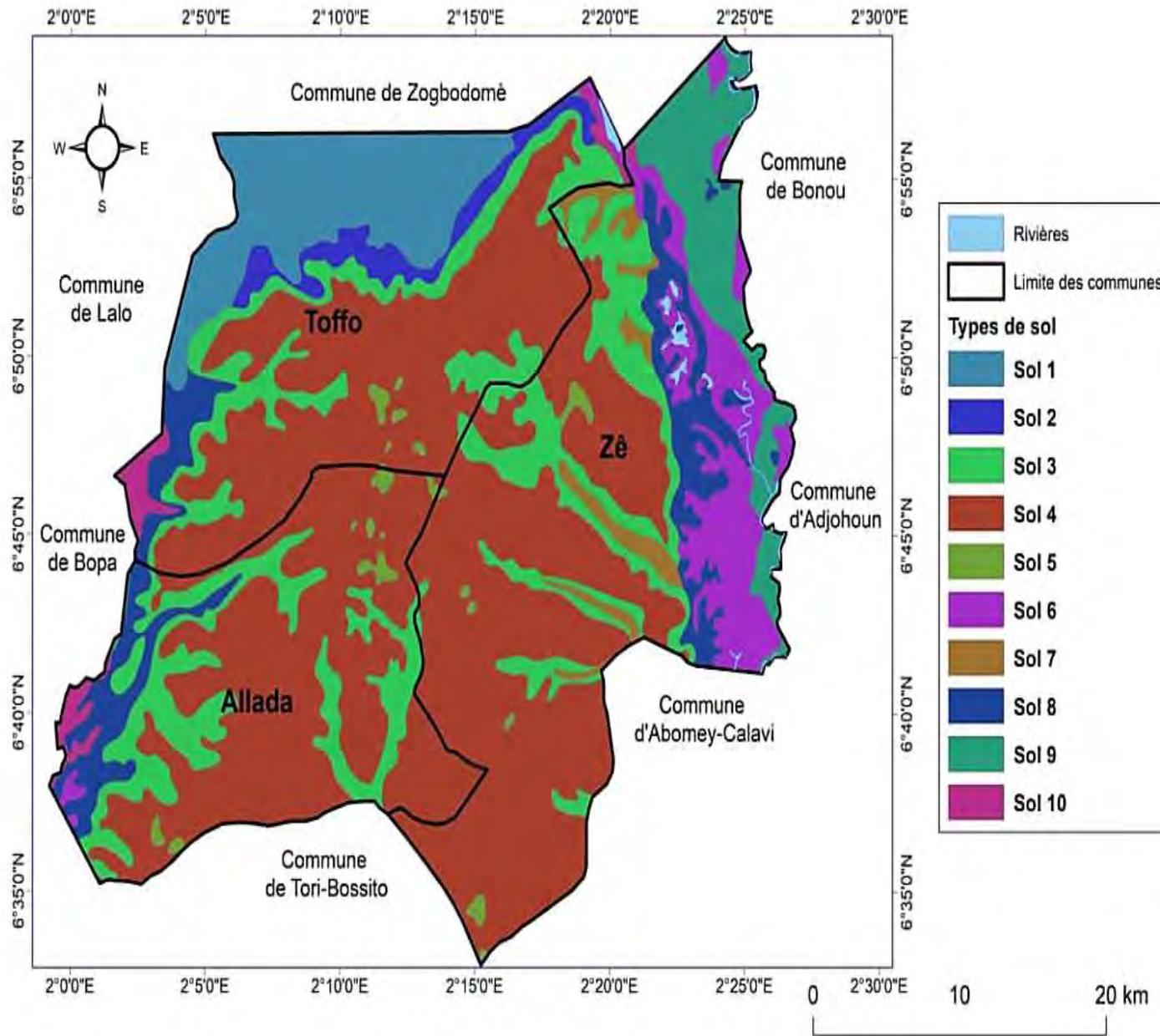
En termes de découpage administratif, le plateau d'Allada couvre principalement les territoires des communes d'Allada; Tori; Zè; Kpomassè et des parties plus ou moins grandes des communes de Toffo et d'Abomey-Calavi. Toutes ces communes sont situées dans le département de l'Atlantique. Le recensement général de la population et de l'habitat (RPGH4/INSAE, 2013) classe par ordre d'importance numérique, le nombre de ménages possédant une plantation de palmiers à huile sur toute l'étendue du pays. Ce recensement donne par ordre pour les communes du plateau d'Allada, les valeurs du nombre de ménages possédant une plantation de palmier à huile (Annexe 1). La faible importance des communes de Kpomassè et Tori en termes de production de palmiers à huile par rapport aux autres communes motive

son exclusion du cadre physique de cette étude. L'évaluation des terres réalisées selon les différentes zones agroécologiques du Bénin donne les caractéristiques pédoclimatiques de chaque zone agro-écologique ainsi que les communes qu'elles prennent en compte (Azontondé et al., 2010).

La commune d'Abomey-Calavi est répartie sur deux zones agro écologiques : la zone des « terres de barre » et la zone des « pêcheries ». De plus, du fait de sa proximité avec la capitale économique, Cotonou, avec laquelle elle forme une grande conurbation, la commune d'Abomey-Calavi présente un très fort taux d'urbanisation en comparaison aux autres communes (RPGH4/INSAE, 2013). La commune de Toffo est également répartie sur deux zones agroécologiques : la zone de « terres de barre » et la zone des « dépressions ». Cependant, son importance en termes de production de palmier à huile sur l'ensemble des communes du département justifie son maintien dans le cadre de cette recherche. En définitive, et comme délimité par (Tossou et al., 2009), les communes d'Allada, de Zè et de Toffo sont retenues comme communes délimitant le cadre physique de cette étude (Figure 12). En termes de conditions édaphiques, le plateau d'Allada appartient à la zone agroécologique des « terres de barre ». Il est couvert en grande partie par les sols ferrallitiques faiblement desaturés appauvris sur sédiments meubles du Continental Terminal communément appelés « terres de barre » (Azontondé et al., 2010) (Figure 12a et b). Ces sols conviennent bien aux cultures annuelles (maïs, tomate, piment, pastèque, etc.), à l'ananas, aux palmiers à huile et aux agrumes (Tossou et al., 2009). La couche arable de ce sol est appauvrie en matière organique présentant une couleur rouge vive de faible teneur en argile. La forte perméabilité, la porosité et la texture de surface limono-sableuse (seulement 9 à 13% d'argile) leur confèrent une fertilité physique bonne à moyenne. Cependant, ce sont des sols à basse fertilité du point de vue de leurs caractéristiques chimiques (Azontondé et al., 2010).

Le climat de la région est de type soudano-guinéen avec un régime pluviométrique bimodal. Deux saisons des pluies et deux saisons sèches sont rencontrées. La première (grande) saison des pluies s'étend de mars à juillet et présente un pic de pluie à la mi-juin. Le mois d'Août correspond à la petite saison sèche. La seconde (petite) saison des pluies, s'étend de septembre à novembre et culmine en début octobre. La température moyenne journalière varie entre 25°C et 29°C. La pluviométrie moyenne interannuelle sur la région d'étude est de 1100 mm entre 1951 et 2010 (Allé, 2014). La Figure 13 présente le diagramme ombrothermique de la région sur les 30 dernières années.

a)



Sol 1: Vertisols topomorphes non grumosoliques hydromorphes sur argile sédimentaire ; **Sol 2:** Sols ferrugineux tropicaux hydromorphes sur matériau colluvial sableux et sablo-argileux ; **Sol 3:** Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris modaux sur grès et matériau colluvial ; **Sol 4:** Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris modaux sur sédiment meuble argilo-sableux du continental terminal ; **Sol 5:** Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris hydromorphes sur sédiment argileux du continental terminal ; **Sol 6:** Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à gley de profondeur sur matériau alluvial argileux ; **Sol 7:** Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à gley de profondeur sur matériau alluvio-colluvial ; **Sol 8:** Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à pseudo-gley à taches et concrétions sur sable et sable sur argile ; **Sol 9:** Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à pseudo-gley à taches et concrétions sur matériau alluvial sablo-limoneux à limono-argileux ; **Sol 10:** Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à pseudo-gley à taches et concrétions sur matériau alluvial argileux et sédiment argileux du paléocène.

Source : Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey, Volkoff (1976).

b)

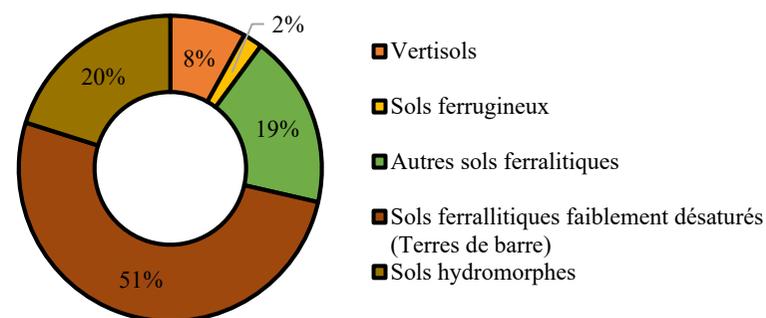


Figure 13: Carte pédologique de la zone d'étude ; a) les différents types de sols ; b) leurs proportions.

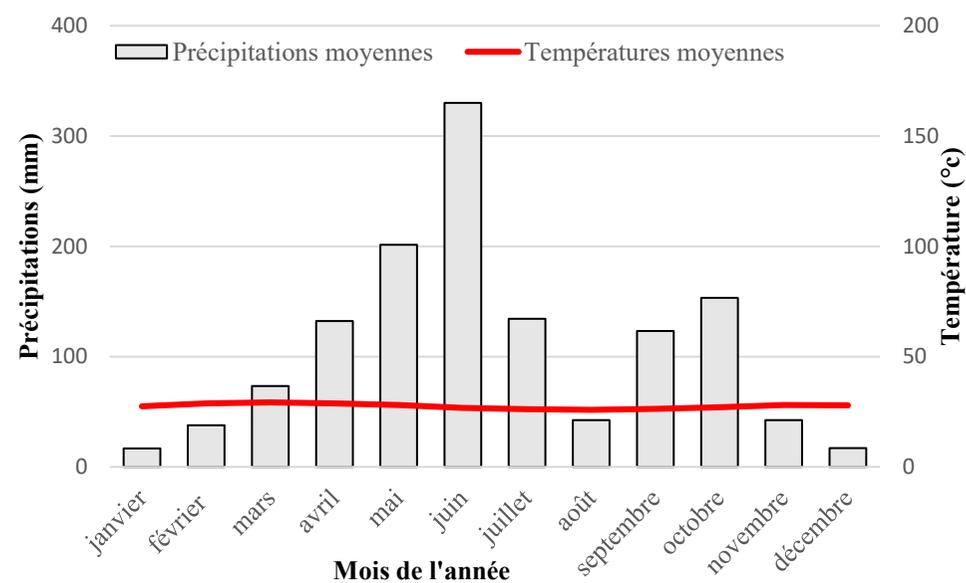


Figure 14: Diagramme ombrothermique du sud du Bénin : moyennes mensuelles sur 30 ans (1988-2018).
Source : données météo-Bénin.

1.7.2. Stratégie de recherche

Cette étude se propose d'analyser les effets des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile sur les performances de production des deux espèces associées et sur la fertilité des sols. Les connaissances disponibles ont montré que si le système agroforestier à base de palmier à huile est potentiellement intéressant en terme d'intensification des services écologiques et de production végétale, ses performances réelles ne peuvent être évaluées sans tenir compte à la fois des effets des techniques culturales des agriculteurs et des caractéristiques du milieu naturel (climat, sols) en interaction. Une évaluation des performances de ces systèmes sur une seule parcelle reviendrait à considérer qu'il n'existe qu'une seule façon de cultiver dans la région ou que les différences de gestion technique existant entre agriculteurs ont des effets négligeables sur les performances. Si l'on veut évaluer les systèmes existants, il faut donc sortir de la station pour travailler dans les situations réelles de parcelles d'agriculteurs. Le besoin d'études sur les facteurs limitant le rendement des palmeraies des petits exploitants est important puisque les références proviennent pour la plupart d'études effectuées en plantations industrielles et en stations de recherche comme le souligne Woittiez et al. (2017) dans sa revue bibliographique sur les facteurs limitant les rendements des palmiers à huile.

Dans une perspective de conseil, il ne suffit pas d'analyser au niveau de la parcelle, les dysfonctionnements et leurs relations avec les performances. Il est tout aussi important de pouvoir cerner la logique socioéconomique des choix techniques faits par les agriculteurs, car, toute proposition qui ne tiendrait pas compte de cette logique risque d'être vouée à l'échec auprès de ces derniers.

Les connaissances sur les stocks de nutriments absorbés par le palmier (minéralomasses) sont également nécessaires dans une perspective de conseil, dans la mesure où elles permettent de calculer des bilans de nutriments dans le sol et des efficacités des éléments apportés pour la production ainsi que leurs relations avec les systèmes de culture. Ces connaissances sont utiles pour adapter les recommandations d'engrais à conseiller aux agriculteurs dans chaque type de système. Les équations allométriques développées dans cette thèse pour prédire la biomasse foliaire du jeune palmier constituent un point de départ pour les estimations de minéralomasses.

1.7.3.1. Le concept de système de culture au cœur de notre démarche

Le système de culture est défini comme « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière homogène. Chaque système de culture se définit par : (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces

différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1990).

Par analogie, le terme « systèmes agroforestiers à base de palmier » équivaut au système de culture des palmeraies conduites en association avec des cultures vivrières. Il est caractérisé par i) la nature des cultures associées et de leur ordre de successions dans la palmeraie, ii) l'itinéraire technique appliqué au peuplement palmier et iii) l'itinéraire technique appliqué au peuplement associé. En utilisant ce concept de « système de culture » dans notre thèse, on affirme que les techniques appliquées font « système ». Cela veut dire qu'elles sont très fortement liées les unes aux autres, au point qu'on ne peut évaluer l'une sans tenir compte de l'interaction des autres. Cela veut aussi dire qu'un même objectif de production peut être atteint de différentes manières. De même, si on change d'objectif (ou de contraintes matérielles), il faudra changer plusieurs techniques (Meynard et Girardin, 1991).

De même, par analogie à la définition de « performance agroenvironnementale » donnée par Zahm (2011). Le terme « performance des systèmes agroforestiers à base de palmier » désigne les résultats obtenus par l'agriculteur quant à l'impact agronomique favorable ou défavorable de ses pratiques agricoles sur les états du milieu et les peuplements associés. Ces résultats étant mesurés par différents indicateurs.

1.7.3.2. La démarche de diagnostic agronomique régional (DAR) pour mettre en lumière les effets des différences de gestion technique des agriculteurs sur les performances

Notre travail s'appuie sur une démarche de diagnostic agronomique régional (Doré et al. 1997, 2008). Ce cadre méthodologique a été mobilisé dans plusieurs conditions y compris en agroforesterie tropicale à base de cocotier au Vanuatu (Lamanda, 2005), de cacaoyer au Cameroun (Jagoret, 2011), et de palmeraies adultes villageoises camerounaises (Rafflegeau et al., 2010). L'objectif du diagnostic agronomique régional (DAR) est d'identifier les techniques et les facteurs qui ont été à l'origine des différences de performances de production entre les parcelles d'une même région. Les outils du DAR sont d'une part, un réseau de parcelles d'agriculteurs couvrant la diversité des situations de production retrouvées dans la région d'étude, d'autre part une batterie d'indicateurs bien choisis pour caractériser les différents compartiments et les relations entre eux afin d'établir un schéma d'élaboration du rendement des cultures en fonction de la gestion technique et des états du milieu.

1.8. Objectifs, hypothèses de recherche, démarche et activités associées

1.8.1. Objectifs, hypothèses de recherche

L'objectif général de la thèse est d'évaluer les performances des systèmes agroforestiers et leur variabilité en fonction de la gestion technique pendant la phase immature de l'arbre. Nous avons abordé la question à travers quatre sous objectifs et des hypothèses associées à chacun.

OS1: caractériser la diversité des palmeraies en phase immature dans la zone d'étude ;

H1: la gestion technique des palmeraies immatures se distingue à la fois par la succession de culture annuelle et par la fertilisation minérale apportée aux cultures associées pendant cette période ;

OS2: identifier les facteurs socio-économiques influençant le choix des systèmes agroforestiers à base de palmier à huile dans la zone d'étude;

H2: les choix des systèmes agroforestiers varient suivant des facteurs socioéconomiques propres à l'exploitation agricole dans la zone d'étude ;

OS3: analyser les performances agronomiques des arbres et des cultures associées dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile dans la zone d'étude ;

H3: les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile adoptés par les agriculteurs de la zone d'étude induisent des effets significatifs sur les cultures associées et le sol. Parmi ces effets :

H3a: les rendements des cultures vivrières diminuent significativement sous l'influence croissante de l'arbre ;

H3b: la fertilité physico-chimique des sols diminue significativement sous l'influence croissante de l'arbre ;

H3c: l'association de cultures vivrières impacte négativement la nutrition et la croissance du peuplement palmier.

1.8.2. Démarche globale et activités associées

Les premières explorations dans le milieu ont permis de confirmer que 1) le palmier à huile est, dans ce système d'association, le peuplement le plus important pour les agriculteurs ; 2) l'association de culture au palmier est continue sur toute la durée de la phase immature.

Aussi, contrairement à d'autres types de systèmes agroforestiers où la structure du peuplement peut varier dans le temps en fonction des objectifs et stratégies de l'agriculteur (Torquebiau, 1992 ; Lamanda, 2005 et Jagoret, 2010), dans le cas des systèmes à palmier, l'agriculteur n'intervient pas sur la structure des peuplements après leur mise en place et leur entrée en production. Quelques replantations de pieds morts ou détruits par les nuisibles peuvent survenir, la structure de base reste cependant inchangée. Les activités inhérentes à la caractérisation des

systèmes de culture et à l'identification des déterminants socioéconomiques de leur choix ont été réalisées de façon concomitante et sont regroupées dans le **Chapitre 2**.

La durée de la période immature du palmier (trois ans) limite pour une thèse les possibilités de suivi des parcelles au cours du temps. Nous avons réalisé des enquêtes sur l'ensemble de la période immature de palmeraies d' 1, de 2 et de 3 ans afin de reconstituer l'enchaînement des pratiques et comprendre leur cohérence. Au total, 160 exploitations possédant des palmeraies immatures ont été questionnées dans le cadre des enquêtes individuelles. Les déterminants socioéconomiques de choix de chaque système ont été ensuite identifiés en faisant l'hypothèse que les choix de gestions techniques des jeunes palmeraies sont influencés par des caractéristiques socioéconomiques propres à l'exploitation agricole. Les informations recueillies sur les caractéristiques des exploitations lors des enquêtes individuelles et les enquêtes en focus groups de 8 à 12 chefs d'exploitations ont été utilisés à cette fin. Seuls les agriculteurs possédant les palmeraies de 3 ans d'âge dont les types de systèmes agroforestiers utilisées dans leur palmeraie sont clairement identifiés ont été pris en compte pour l'identification des déterminants socioéconomiques de choix des systèmes.

Une fois les systèmes de culture identifiés et caractérisés à l'issue de la première démarche, l'évaluation du fonctionnement biophysique proprement dit peut commencer. A cette étape, l'objectif est de caractériser les interactions entre peuplements pour le partage des ressources du sol (eau et nutriments) dans ces systèmes ainsi que les états et performances des peuplements (**Chapitre 3 et 4**).

Le cadre méthodologique utilisé est celui d'un diagnostic agronomique. Les outils du diagnostic agronomique sont d'une part, un réseau de parcelles d'agriculteurs couvrant la diversité des situations retrouvées dans la région d'étude, d'autre part des indicateurs spécifiques permettant l'évaluation des performances des peuplements associées en fonction de la gestion technique et des états du milieu. La mise en place du réseau de parcelle (15 palmeraies) a impliqué de visiter un nombre significatif de parcelles d'agriculteurs afin de sélectionner celles répondant aux critères (en termes de précédent de culture et de succession de culture annuelle) définis préalablement. Les palmeraies du réseau ont ainsi été choisies à deux ans d'âge et suivi jusqu'à 3 ans correspondant à la fin de la phase immature de l'arbre. La fin de la phase immature de l'arbre permet de mettre en évidence aux maxima les effets cumulatifs des pratiques des agriculteurs durant les trois ans sur les états du palmier et du milieu.

Le partage des ressources du sol (eau et nutriments) entre peuplements et leur effet sur les états des cultures vivrières associées ont été appréhendés grâce à la mise en place d'un dispositif à distance croissante à l'arbre qui consiste à délimiter entre deux palmiers, trois zones d'influence de l'arbre. Ce dispositif a permis de caractériser l'état hydrique et minéral à deux distances des palmiers et de les mettre en relation avec les états du peuplement des cultures annuelles : leur biomasse et leur production. L'état hydrique du sol a été caractérisé par des mesures hebdomadaires de l'humidité du sol (**Chapitre 3**) et l'état minéral par analyse des propriétés chimiques des sols (**Chapitre 4**).

Le peuplement palmier est encore improductif à trois ans. Le diagnostic s'est alors appuyé uniquement sur les indicateurs d'état du palmier les plus corrélés au rendement. Une revue de littérature sur différents aspects de la biologie, de la physiologie et de l'agronomie du palmier ont permis d'identifier les indicateurs d'état nutritionnel et végétatif les plus pertinents à prendre en compte. Cette démarche nous a conduit à utiliser un diagnostic foliaire classique pour caractériser l'état nutritionnel du palmier. L'état du peuplement des palmiers immatures associées aux cultures annuelles ont alors été caractérisé par les teneurs foliaires en nutriments (N, P, K, Mg et Ca) et par des mesures de croissances et de vigueur (nombre de feuille verte, longueur de feuille 17 et indice de vigueur) et comparé entre les différents types de systèmes agroforestiers temporaires à palmiers à huile identifiées (**Chapitre 4**).

Toutes les collectes de données sur le réseau ont été réalisées dans des stations d'observation (deux stations de 20 palmiers chacuns, Annexe 2) délimitées à l'intérieur de chaque parcelle du réseau. Ces stations d'observation sont des espaces homogènes en termes d'espèces cultivées et de conditions techniques à l'intérieur de la parcelle et ont été délimités après une succession d'observations directes et de questions à l'agriculteur.

Pour envisager l'étude des relations sols-plantes sur la base des efficacités et bilans d'éléments nutritifs que ne permet pas le diagnostic foliaire, des équations allométriques d'estimation de la biomasse aérienne des feuilles de palmiers immatures ont été mises au point dans cette thèse (**Chapitre 5**). L'abattage de 15 palmiers possédant 258 feuilles au total a permis l'établissement de modèles allométriques foliaires. Les activités développées pour chaque objectif spécifique sont récapitulées dans le Tableau 6. On les retrouve bien détaillées dans les différents articles qui font l'objet des chapitres 2 à 5.

Tableau 6 : Activités développées dans cette thèse en fonction des objectifs spécifiques

Objectifs spécifiques	Activités
Caractériser les principaux systèmes agro forestiers à base de palmier à huile dans la région	Enquêtes individuelles auprès de 160 agriculteurs sur les âges et l'histoire des parcelles ;
	Enquête sur l'enchaînement des pratiques au cours de la phase immature ;
Identifier les facteurs socio-économiques influençant le choix des systèmes agro forestiers à base de palmier à huile dans la région	13 Enquêtes en focus groups et discussions ouvertes pour la détermination de la cohérence et de la logique des pratiques ;
	Mise en relation entre les caractéristiques des exploitations possédant des plantations de 3 ans d'âge et le choix d'un système ;
Analyser les performances agronomiques des cultures vivrières associées aux jeunes palmiers	Construction d'un réseau de 15 parcelles représentant la diversité de systèmes identifiés dans la zone d'étude ;
	Mise en place d'un dispositif à distance de l'arbre et quantification des rendements et biomasse des cultures annuelles ;
	Prélèvement de 60 échantillons de sol à distance de l'arbre ;
	Analyse physique et chimique au laboratoire des sols ;
	Mesure de l'humidité du sol à distance de l'arbre sur 9 mois ;
	Délimitation des stations d'observation (sous parcelles à l'intérieur des plantations) ;
	Prélèvement des folioles pour le diagnostic foliaire du palmier ;
Mesures de paramètres végétatifs du palmier ;	
Etablir des relations allométriques entre les variables foliaires non destructives et facilement accessibles et la biomasse totale de feuilles de palmier immature	Abattage de 15 palmiers de 2 à 3 ans d'âge ;
	Dissection des palmiers abattus et mesures des variables foliaires sur 258 feuilles;
	Traitements statistiques des données pour l'établissement de relations allométriques entre les variables foliaires mesurées et la biomasse de la feuille.

Avant –propos

Le deuxième chapitre de cette thèse est consacré à la caractérisation des systèmes de culture et à l'identification des principaux facteurs socioéconomiques influençant le choix de ces systèmes (Hypothèses H1 et H2). Une enquête a été effectuée auprès de 160 agriculteurs possédant au total 190 palmeraies de 1an, 2 ans et 3 ans d'âge et a permis de reconstituer l'enchaînement des pratiques suivant les âges des palmeraies. Les types de systèmes utilisés par les 54 agriculteurs possédant uniquement une palmeraie en fin de phase immature (3 ans d'âge) ont ensuite été identifiés et mis en relation avec les caractéristiques sociodémographiques des exploitations familiales qui les développent. Les résultats de cette étude ont été publiés et ce chapitre reprend cette publication dans son intégralité. Les systèmes de culture identifiés dans cette étude sont celles prises en compte dans la suite de la thèse pour l'évaluation de leur fonctionnement biophysique (chapitre 3 et 4).

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin



Koussihouèdé H, Clermont-Dauphin C, Aholoukpè H, Barthès B., Chapuis-Lardy L., Jassogne L., Amadji G. 2020. Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin. *Agroforestry Systems* 94:41-56; DOI 10.1007/s10457-019-00360-0.

2.1. Introduction

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is a perennial plant grown in the humid tropical regions of the world. Plantations are mainly dedicated to the production of palm oil which is the vegetable oil with the highest global production and consumption (*Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement* 2016). In Benin, oil palm plays an important economic and societal role, meeting about 50% of the national demand for vegetable oil (Fournier et al. 2000). Apart from oil extraction from the fruits, other plant components feed a parallel rural economy (Mensah 1999), for example, palm kernel oil is used in traditional medicines, the fronds are used in the manufacture of household utensils and the fermented sap is consumed as palm wine or distilled to produce a local spirit. Oil palm is mostly grown on small plantations of less than 5 ha belonging to smallholders (Aholoukpè et al. 2013). This is the result of the distribution of selected plant material in rural areas in the 1990s under a government scheme to support the production of oil after the decline of industrial plantations (Adje and Adjadi 2001). Oil palm plantations on family farms are mostly grown in association with other crops until the trees mature, corresponding to the first 3 years of the plantation (Adje and Adjadi 2001; Nchanji et al. 2016). However, little is known about the practices used in young oil palm plantations and the socio-economic factors that influence the selection of these practices. Several studies have shown that smallholders' practices are not always selected uniquely for maximizing the main crop yields but farmers usually seek for better performance of both productions, i.e. the main plant and the other crops they grow with (Bentley et al. 2004). Socio-economic factors may also play a significant role in the adoption of particular practices. Meijer et al. (2015) considered that socio-economic factors could be divided into two classes: extrinsic and intrinsic. Extrinsic factors include the socio-economic characteristics of the farm, the external environment and practice being considered. Kamau et al. (2014) reported the key role of the land tenure in Kenya on the choice of practices for soil conservation. Tiltonell et al. (2005) reported that few resources were allocated by Kenyan farmers to the fields far from the farm, due to the risks of theft. Bannister and Nair (2003) showed that the characteristics of both the head of the household (age, level of education, origin) and the fields (soil fertility, distance to the farm, slope) strongly influenced the choice of agroforestry systems in Haiti. Intrinsic factors include farmers' attitudes and perceptions towards the practice being considered. However, although a few studies from sub-Saharan Africa have explored the effect of both such factors on farmers' practices (Douthwaite et al. 2002; Mekoya et al. 2008; Sileshi et al. 2008), none of these

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

considered oil palm agroforestry in Benin. Douthwaite et al. (2002) reported results of innovative technologies for regenerating soil fertility in Benin and Nigeria using *Leuceana leucocephala* in alley cropping and *Mucuna pruriens* as a cover crop. For the first experiment, they reported that farmers did not feel that restoring the soil fertility was a priority. In the second, *Mucuna* was adopted by farmers, not for regenerating soil fertility but for its ability to eliminate the weed *Imperata cylindrica*, which was seen as a greater threat than declining soil fertility. To account for the diversity of factors that may affect the selection of farming practices, Giller et al. (2011) proposed mixed methods combining both qualitative data on farmer's perceptions and econometrics based on the use of statistical models that had been shown to be useful in previous studies of the factors determining the adoption of practices. We aimed (1) to identify the range of practices used by farmers in their young oil palm plantations in southern Benin, (2) to analyze the socio-economic conditions for adoption of these practices. We tested the hypothesis that the selection of practices is influenced by farmer-specific socio-economic factors. These factors may be both intrinsic and extrinsic in the sense of Meijer et al. (2015).

2.2. Materials and Methods

2.2.1. Study area

The study area covered the rural districts of Allada, Zè and Toffo, on the Allada Plateau (1°9'N and 2°15'E) in the Atlantique department, southern Benin. This area is the second largest oil palm producing region in the country with 5513 family farms with oil palm plantations in 2013 (INSAE 2013). There is only fragmentary information on the average yield of oil palm bunches from smallholdings in this region. However, the selected variety *tenera* (*dura* x *pisifera*) can yield up to 12 tons per hectare in southern Benin, giving 3.5 to 4 tons of oil per hectare (Aholoukpè 2013).

The region has a sub-humid Guinean climate with two rainy seasons (April-July and September-November) and two dry seasons (December-March and July -August). Average rainfall is 1200 mm yr⁻¹. Annual air temperature varies from 25 to 29°C (Assogbadjo et al., 2011).

Oil palm is cultivated on slightly desaturated ferrallitic soils which are dominant in this region (Akpo 2013). These soils, commonly known as "*terre de barre*", are formed on sandy-clayey

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

sediments from the continental terminal. The topsoil is sandy and the clay content gradually increases to 50% at 60 cm deep. These soils are well drained and permeable (Azontonde 1991). The topsoil (0 to 20 cm) is moderately fertile with 39 g kg⁻¹ total carbon, 670 mg kg⁻¹ nitrogen, 7.3 mg kg⁻¹ phosphorus, 100% base saturation and 5.30 cmol kg⁻¹ CEC (Igue et al. 2013).

2.2.2. Survey

Firstly, national database (INSAE 2013) was examined to select the representative number of farms to be surveyed in each district. General information about the practices in immature palm plantations and their socio-economic basis were obtained in June 2016 using a focus group of 8 to 12 farmers with young oil palm plantations in each municipality. This information was then used to plan further surveys.

2.2.2.1. Characterization of the young oil palm agroforestry systems

A guide was developed for semi-structured interviews conducted with 54 farmers with young oil palm plantations. The numbers of farmers interviewed in each district is an indication of the importance of young oil palm in this area: 30 farmers were interviewed in Allada, 14 in Zè and 10 in Toffo. The interviews were focused on the practices used in the oil palm plantations during the three years of the immature period, the socio-economic characteristics of the farmers and the economic indicators of the agroforestry system. The immature period comprises six growing seasons. The practices during this period were classified on the basis of the successions of the associated crop in the six growing seasons.

Pearson's chi-squared test at 5% significance was used to detect relationships between variables such as the type of associated crop succession, land use prior to the plantation of the oil palms, fertilizer applications for the young plantations and the position of the plantation. The 'catdes' function in the FactoMineR package (Lê et al. 2008) in R (R core team 2017) was used for this analysis.

2.2.2.2. Farmers' perceptions and socio-economic performance of the agroforestry systems

The information was collected using directed interviews with three focus groups of 8 to 12 farmers using similar practices during the immature phase of their oil palm plantations.

Farmers' motivations and ranking: The motivations for selecting the intercrops grown during the oil palm immature phase were identified in the preliminary discussions and classified in

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

four groups. Participants in the focus groups were asked to rank each motivation and indices were calculated using the following equation:

$$I = \sum_{i=1}^j (N_j * n_i) / n_j$$

Where N is the total number of farmers having assigned the rank j to a given motivation and n is the total number of motivations mentioned. Indices were expressed within a scale of [0–100]. The higher the index, the higher the priority given to a motivation when selecting practices.

Economic indicators of the main associated crops: The indicators included total production costs, gross income, net income and return on costs and were calculated for one crop cycle in one hectare. The total production costs excluded fixed costs and the time spent by family members and included the costs of seeds, fertilizers, pesticides and hired labor. The gross income was the total value of the produce from farming the plantation calculated as the product of yield and unit price. Net income was calculated as the difference between the gross income and the production costs. The return on costs was calculated as the ratio of net income to production costs. Figures are reported in US Dollars (USD). Considering the rate exchange history in 2017 for USD to the local currency XOF, a mean value of 575 XOF for 1 USD was used for calculation.

2.2.2.3. Relationship between socio-economic characteristics of the farms and selection of practices

To determine the relationship between the socio-economic characteristics of the farms and the practices used in young oil-palm plantations, we selected the socio-economic parameters that we considered as the most relevant for the study, based on a review of agroforestry adoption determinants (Pattanayak et al. 2003) (Table 7) as the independent variables.

The typical oil palm agroforestry practices for the 54 farms were used as the dependent variables. We used a conditional inference classification tree to identify the main factors influencing the selection of particular practices. Binary recursive partitioning, a non-parametric statistical method, separated increasingly homogeneous subgroups (nodes) using independent variable splitting criteria with conditional distributions (Breiman et al. 1984; Izenman 2008). The partykit library (Hothorn et al. 2006; Hothorn and Zeileis 2015) was used with R (R core team 2017).

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

Tableau 7: Socio-economic variables selected for the oil palm agroforestry systems in southern Benin (adapted from Pattanayak et al., 2003)

Category	Variable	Units or grade	Rationale
Personal	Age	Years	Older farmers with more farm experience may select lower risk, more traditional systems.
	Family size	Number	A farmer with more mouths to feed may have a preference for staple crops.
Physical	Farm size	Hectares	A farmer with more land may prefer a cropping system with cash crops.
Resources	Fraction of non-agricultural income	1=High (3/4 of total income from non-agricultural sources); 2=Medium (1/2 of total income); 3=Low (1/4 of total income);	An alternative source of income could influence the selection of a cropping system.
	Access to labor	1= High (100% of labor force requirement); 2=Medium (50% of labor force requirement); 3=Low (no more than 10% labor force requirement).	The access to labor is the farmers' capacity to hire external labor. High access could increase the likelihood of selecting a labor intensive cropping system.
Risk and uncertainty	Farming experience	Years	Experience improves farmers' know-how, leading them to prefer cropping systems that they have mastered.
	Extension services	0= No 1= Yes	Extension agents could guide the selection of associated crops in the oil palm plantations.
	Affiliation to a farmers associations	0= No 1= Yes	Sharing of experience between farmers on practices, on value chains, on agronomic performance and the benefits for the oil palm grown in association with a particular crops, can influence their selection.

2.3. Results

2.3.1. The oil palm agroforestry systems on the Allada plateau

Land use prior to planting the oil palms plantations was continuous staple food crops (36%), 1-year fallows (41%), 2-year fallows (22%) or naturally occurring oil palm trees (2%) (Data not shown). Oil palms were planted at the onset of the first rainy season in 2014. The planting material was purchased from nurseries accredited by the *Centre de Recherches Agricoles sur les Plantes Pérennes* (CRA-PP). This was exclusively the selected oil palm variety *Tenera*, also called « *yovo dé* » in the region. Seedlings were planted in staggered rows with 9 – 8 m between plants with a density of plantation between 140 - 160 plants ha⁻¹.

Over the first 3 years of the plantation, a succession of associated crops was cultivated between the trees. The most common associated crops were maize (*Zea mays*), pineapple (*Ananas comosus*), cassava (*Manihot exculentus*), cowpea (*Vigna unguiculata*) and tomato (*Solanum lycopersicum*): 83% crop sequences included maize, 25% included pineapple, 23% included cassava, 28% included cowpea and 29% included tomato. Cowpea (*Vigna unguiculata*) was usually grown as relay cropping with first maize season. Less common crops such as peppers (*Capsicum annuum*), watermelon (*Citrullus lanatus*), papaya (*Carica papaya*), and banana (*Musa spp.*) were grown in only 10% of the plantations. Short cycle crops (maize, tomato and groundnut) may be grown up to 6 times over the first 3 years of the oil palm plantations (Figure 14). Long-cycle cassava and pineapple crops were rarely grown twice over the 3-year period.

Four main oil palm agroforestry systems were distinguished for the 54 farms (Figure 14) which were identified by the main associated crop, although each system had other associated crops in the successions. These were (1) the maize system (20% of the cases) with maize grown at least five times sometimes with cowpea as relay cropping or with groundnut in rotation; (2) the pineapple system (21% of the cases) sometimes alternating with maize; (3) the cassava system (36%); and (4) the tomato system (5%) (Figure 15). There was no significant relationship between these systems and the land use history of the field before the oil palm was planted ($P=0.356$, $df = 6$). Table 8 summarizes the common practices for the young oil palm trees and the most commonly associated crops. These agroforestry systems not only varied significantly in terms of the associated crops, but also in terms of fertilizer applications for the oil palms and the retention of crop residues and tillage for the associated crop (Table 8). For example, the cassava systems received lower fertilizer applications than the tomato systems as only the oil palms were fertilized in the cassava system; the soil was only lightly tilled for cassava while

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

the soil was tilled more deeply for tomatoes; and crop residues were returned to the soil for cassava fields while tomatoes received low levels of organic inputs. The national CRA-PP service gives recommendations (Table 8) for oil palm: an application of 72 kg ha⁻¹ of urea and 72 kg ha⁻¹ of KCl on a circle 1 m from the tree collar for a 2 years old plantation (Aholoukpè et al. 2013). However, farmers typically apply two thirds of this in year 2 on a circle corresponding to the crown. In general, the higher the fertilizer application to the associated crops, the lower the fertilizer application to the oil palms ($P < 0.001$; $df = 9$). The four agroforestry systems were also unevenly distributed: cassava systems were mostly found in the Toffo district, pineapple systems in Zè district, and tomato systems in Allada district. Maize systems were found throughout ($p < 0.001$, $df = 3$, Figure 14).

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

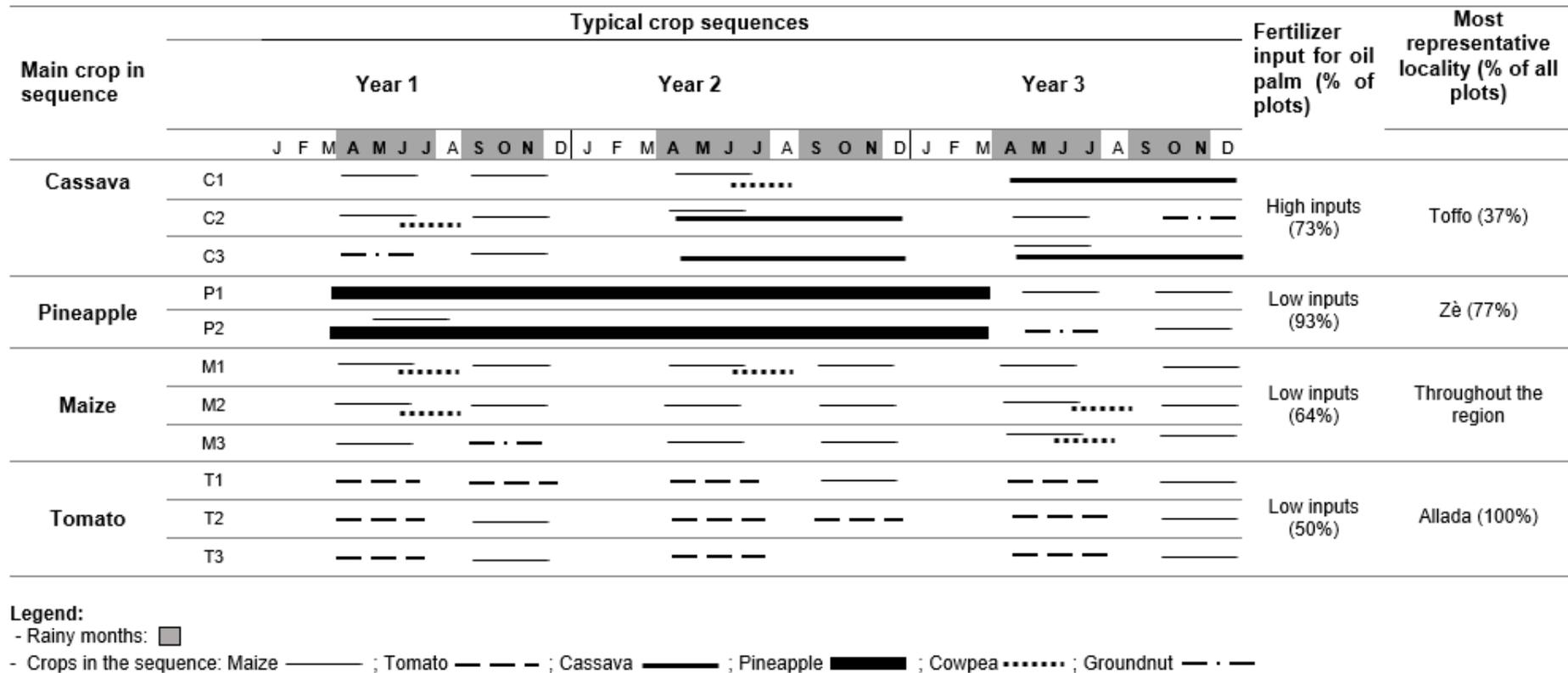


Figure 15: Typical oil palm agroforestry systems on the Allada Plateau, southern Benin

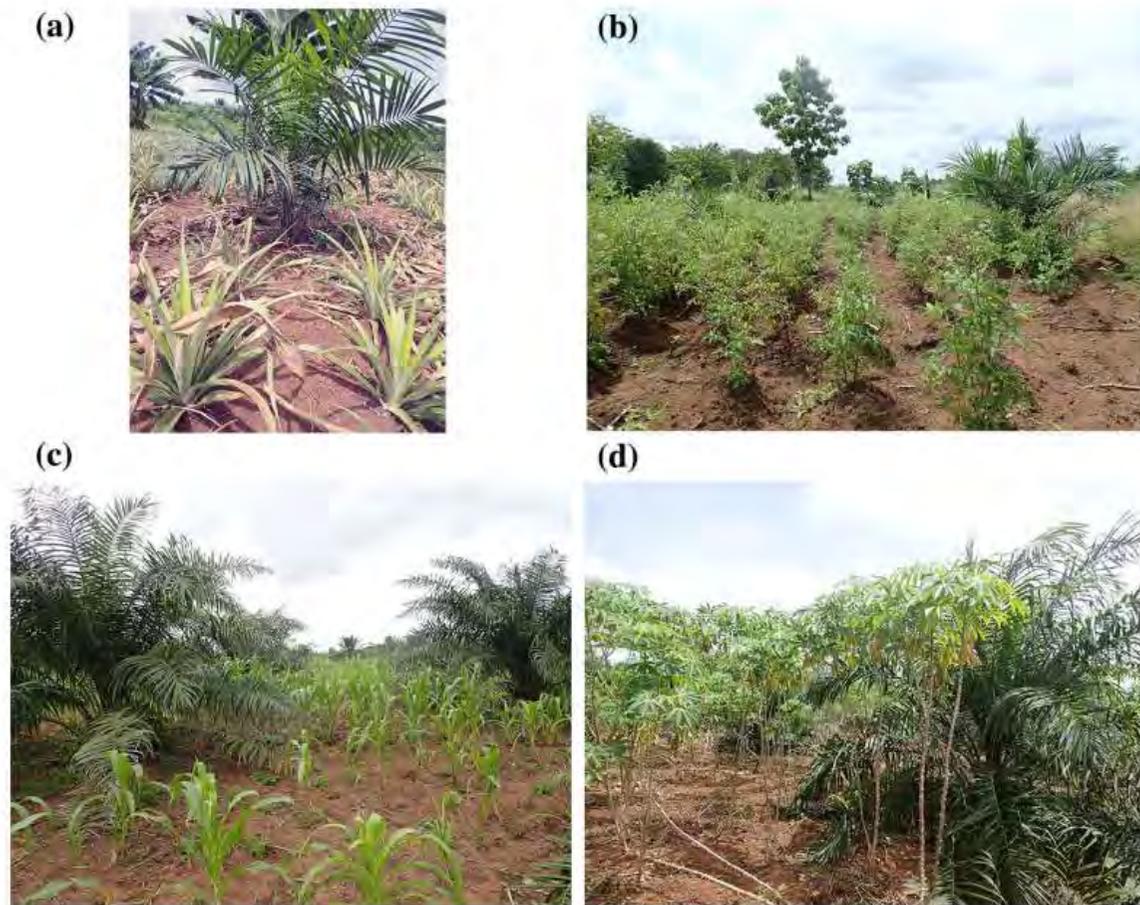


Figure 16: Main oil palm agroforestry systems developed by smallholders in the Allada region (Southern Benin). 3a (top-left), Oil palm tree with Pineapple; 3b (top-right), with Tomato; 3c (bottom-left), with Maize; 3d (bottom-right), with Cassava. The annual crops are maintained no longer than the immature period of the trees. *Crédit photos: H. Koussihouèdè*

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

Tableau 8: Common practices for immature oil palm and the main associated crops

Practice	Oil palm	Maize*	Cowpea*	Tomato*	Cassava**	Pineapple**
Clearing			Hand clearing (February-March)			
Tillage	None	None	None	Deep hoeing (15-cm deep)	Light hoeing (5-cm deep)	Deep hoeing (15-cm deep) ⁽¹⁾
Nursery	Carry out by a CRAPP approved nurseryman, duration 3 months on average	None	None	- 3-4 weeks - Standard varieties - Manual watering	None	None
Sowing / planting / transplantation	Seedlings transplanted into holes of about 60 cm ³	- Direct sowing - 2-3 seeds per hole, seed collected from previous harvests - 90-day maturing varieties	- Direct sowing; often as catch crop after maize - 2-3 seeds per hole, seed from previous harvests - 90-day maturing varieties	Seedlings transplanted into fields (May - June)	- Cuttings ; - 10,000 to 15,000 plants.ha ⁻¹	- Transplanting suckers - Varieties : Smooth Cayenne or Sugar Loaf
Weeding			Manual, depends on the height of the weeds			
Flower induction treatment	None	None	None	None	None	Calcium carbide solution on the plant central apex at 12 MAP*
Fertilizer application	<i>CRA-PP recommendations per tree.</i> Year 0: 350g of urea + 200g of KCl; Year 1: 400g of urea + 200g of KCl; Year 2: 500g of urea + 500g of KCl; Year 3:	Mineral only (no manure). On average 50 to 100 kg ha ⁻¹ urea, once at 30 DAS ⁽²⁾ ;	No fertilizer application	Mineral only (No manure). On average 100 to 150 kg.ha ⁻¹ urea and NPK (14-23-14), at 15-21 DAT ⁽²⁾ and 45 DAT respectively;	No fertilizer application ;	Mineral only (No manure). ; 150 to 200 kg.ha ⁻¹ Urea and NPK (14-23-14) and / or 100kg K ₂ SO ₄ ; 3 to 4 inputs on average before harvest (every two months from the 3rd MAP

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

	500g of urea + 500g of KCl. <i>Farmers common practice</i> <i>/ plant: 1/1 urea and KCl mixture, dose depending on the age; frequency depending on the associated crop</i>					
Castration	Ablation of male inflorescences at years 3 after planting. Castration improves first harvests.	None	None	None	None	None
Harvesting and residue management	No harvest, so no residues from the tree during the immature phase (the 1 st 3 years).	Manual harvest at 90 DAS (high season) or 75 DAS (short season); Stalks left on field	Pods harvesting at 90 DAS; Tops left on field.	Manual harvest at fruit maturity starting 3 MAP and spread over 1 month (5 harvests on average), tomato tops left on field.	Manual lifting at 9 MAP on average; Stems (cuttings) collected, Leaves left on field.	Manual harvest of fruits 14 to 18 MAP; Sucker production: plants trimming after harvest to accelerate the multiplication of the suckers (8-12 suckers / plants on average).

* short cycle crop; ** long cycle crop;

⁽¹⁾ Using a *nichor*, a tillage tool heavier than the hoe, used for working the soil deeply before planting pineapples;

⁽²⁾ DAS = Days After Sowing; DAT = Days After Transplantation; MAP = Months After Transplantation.

2.3.2. Farmers' perceptions and motivations for choosing a particular agroforestry system

The motivations given by the farmers were classified as one of four main objectives (Figure 16).

Financial risk reduction – exploiting the interrows in the oil palm plantation to generate revenue without significant financial risk. Cassava, pineapple and tomato all scored highly (indices 75-80) while maize had a low score (index 41). Cassava, tomatoes and pineapples are cash crops, unlike maize which is grown for consumption in the family. For example, one farmer mentioned: *“with cassava, I have no problem: I do not pay as much for labor as I would do for tomatoes and I do not spend money on buying or applying fertilizers”*. Another said: *“if the cassava harvest can allow me to recover at least the money to pay for the maintenance of the oil palms, that is enough”*. Farmers perceived both cassava and pineapple as crops able to withstand droughts. *“Whether it rains properly this year or not, I know these crops will survive,”* said a farmer during the focus group discussions, others agreed.

Increasing returns on costs. Spending money to earn more money was a main motivation for farmers who chose tomato and pineapple systems (index 90 for both systems). While they were aware of the pest, disease and drought risks of growing tomatoes, farmers who chose tomatoes were very keen on the profitability of the tomato crop. The return on costs is fast because the tomato growing cycle is only 120 days. For example, a farmer said *“for me, producing tomatoes is like a bet, I take the risk but this risk is worth it because when there is a shortage in the market, I really earn a lot of money quickly”*. Another said *“With pineapples, I'm sure to earn a lot of money because it's a product that I'm sure to sell, and even if the market price falls, I can count on selling the suckers”*. Other farmers confirmed these statements. The length of the pineapple cycle was seen as a way of benefiting from both rainy seasons in the year without incurring costs in the second rainy season. For example, a farmer said *“Pineapples will bring me enough money without me having to spend more for another crop in the second season”*.

Household food security. Intercropping with maize had highest index (index 79, Figure 16) for those whose priority was household food security as maize is a food security crop which the family eats at home instead of selling. A farmer who chose maize said *“Instead of wasting my land by leaving the space between the oil palms empty, I grow maize so that at least I have food at home.”* The choice of a maize system was driven by the aim of ensuring the availability of a staple food in the household. Only the surplus production was sold. Maize systems also included cowpea which is also grown for consumption in the family. As a staple crop, maize was

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

considered as a low-risk crop. For example, a farmer growing maize in his oil palm plantations said "even if I could not sell all the maize I grew, at least I could keep it and eat it myself, that would not be possible with tomato which rots quickly".

Providing favorable conditions for young oil palms. Farmers were aware of the interactions between young oil palm stands and the associated crops. Some farmers said that their choice of the associated crop was to ensure good growth conditions for the oil palms. Pineapple (index 75) and maize (index 80) were considered as the most appropriate for providing favorable conditions for the immature trees (Figure 16). The maize improved the soil fertility in the oil palm stands especially when the stalks and cowpea tops and roots were left on field after harvest. Cassava was not viewed favorably (index 20) as it was recognized in the region as having a negative effect on oil palm growth in the first year after planting. The farmers generally agreed with one who said: "when you grow cassava in a very young plantation, in the first year, you can see that the oil palms are stunted, they do not grow well and the start of production is delayed." For this reason, cassava rarely came at the start of crop sequences in the oil palm plantations. Unlike cassava, pineapple often came early in the crop sequences (Figure 14). The high level of fertilizer applied on pineapple throughout its 24 month cycle was seen by farmers as an efficient way of meeting nutrient requirements of immature oil palms, and they didn't apply fertilizer for maize when it was grown after pineapple.

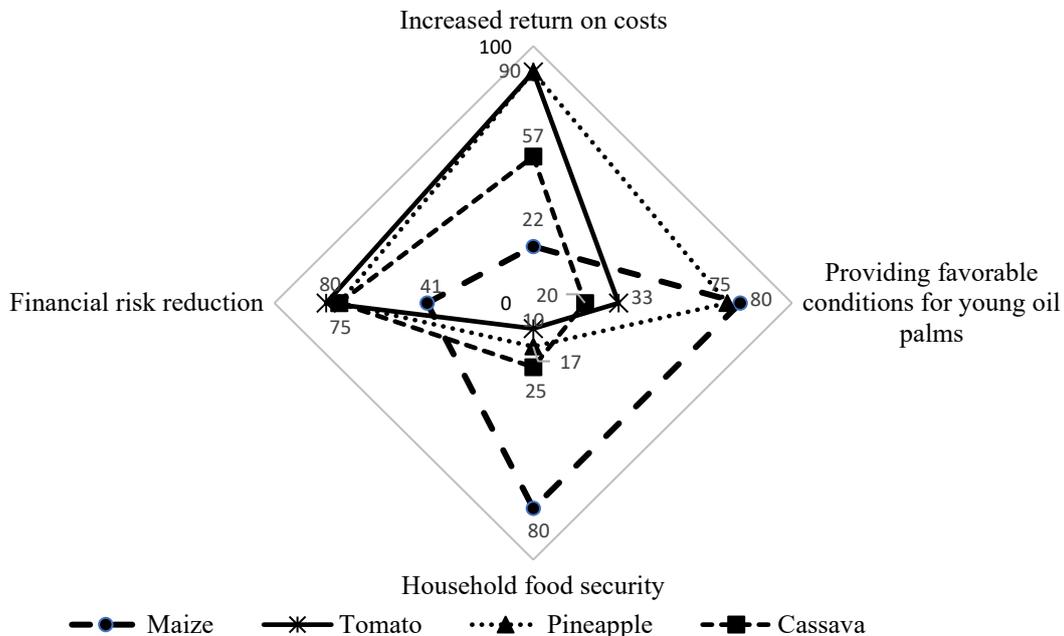


Figure 17: Farmers' prioritization of the main motivations for choosing a given oil palm agroforestry system

2.3.3. Economics of the main associated crops in the agroforestry systems

The main associated crops were maize, tomato, pineapple and cassava in that order and economics of these was studied for one crop cycle. The surveys showed that agricultural produce were usually purchased in the field by buyers even before the harvest. Buyers also organized the transport of the produce to markets for resale. The women who use cassava to make *gari*, a type of semolina, bought the tubers directly from the farmers. Table 9 compares the economics of the four main associated crops over one growing cycle. The production costs included the cost of inputs and external labor. The highest production costs were for pineapple (2590 USD ha⁻¹) and tomato (1038 USD ha⁻¹). The production costs of cassava were four times lower than those of pineapple and the production costs of maize were eight times lower. The cost of planting materials (seeds, cuttings, or suckers) were lowest for cassava (26 USD ha⁻¹) and maize (57 USD ha⁻¹) and highest for pineapple (686 USD). Labor was the largest cost item and was particularly high for pineapple (1904 USD ha⁻¹) and tomato (748 USD ha⁻¹). However, these crops provide the highest farm income and returns on costs (76.1% for tomato and 53.4% for pineapple). The return on costs of the tomato is 2.5 times higher than that of maize and almost twice that of cassava (Table 9). However, the profitability of tomato was offset by the high risks associated with weather and pests during the growing season, as well as the short shelf life and volatile prices (Table 9). Tomato prices are subject to seasonal variations depending on availability, unlike pineapple and maize. Mature cassava can be kept in the field longer than pineapples. Maize was a crop with less market risk but with a low return on costs (30%). Dry maize can be stored in granary, which is not the case for tomatoes and pineapples. The rate of maize consumption in the family was 75% indicating that it was essentially a crop grown for food security.

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

Tableau 9: Economics of the associated crops oil palm plantations in southern Benin over one crop growing cycle

Items	Main intercrops			
	Maize	Tomato	Cassava	Pineapple
PRODUCTION COSTS (USD* ha⁻¹)				
INPUTS COSTS				
Planting materials (seeds, cuttings, suckers)	5	44	26	391
Fertilizers	52	104	NA*	260
Pesticides	NA**	142	NA	NA
Hormone for pineapple flower induction	NA	NA	NA	35
<i>Sub-total</i>	<i>57</i>	<i>290</i>	<i>26</i>	<i>686</i>
LABOR FORCE COSTS				
Land clearing	52	52	52	52
Tillage	NA	87	153	469
Nursery	NA	49	NA	NA
Sowing/planting	13	43	70	909
Weeding	130	196	188	470
Flower induction	NA	NA	NA	66
Pesticides	NA	129	NA	NA
Fertilizer	43	104	NA	390
Harvesting	7	87	87	NA
<i>Sub-total</i>	<i>246</i>	<i>748</i>	<i>584</i>	<i>1904</i>
<i>Total (Inputs + Labor)</i>	<i>303</i>	<i>1038</i>	<i>610</i>	<i>2590</i>
PRODUCTION AND CONSUMPTION IN THE FAMILY				
Mean yield (kg.ha ⁻¹)	1 000	15 000	25 000	20 000
Rate of consumption in the household (%)	75	>1	>1	>1
RECEIPTS (USD ha⁻¹)				
Earnings from selling produce	435	4348	1043	2609
Earnings from selling pineapple suckers	NA	NA	NA	3130
Gross income	435	4348	1043	5565
PROFIT				
Net income (XOF ha ⁻¹)	132	3310	443	2975
Return on costs (%)	30.3	76.1	41.5	53.4
MARKET CONDITIONS				
Storage duration of the produce (days)	180	7	7 (360 for gari)	10
Price stability	High	Low	Low	High

* We have considered 1 US \$ = 575 XOF; **NA=Not Applicable

2.3.4. Relationship between socio-economic characteristics and the selection of the associated crop

Table 10 showed main characteristics of the households surveyed. The mean age of the farmers was 43 with 2 to 40 years' experience (mean 12 years). The households had 9 family members on average, with a range from 1 to 20. Farms were 8 ha on average with a range from 2 to 20 ha. Most of the farmers (33 out of 54) did not belong to a farmers' association. Only 7 out of 54 farmers (i.e. 13%) had had contacts with agricultural extension services. Only 17 farmers were able to hire labor easily, 16 had restricted access to hired labor and the remaining 21 farmers had difficulty getting hired labor.

The conditional inference tree model indicated that access to hired labor, affiliation to a farmers' association and family size were the main factors influencing the choice of a given associated crop (Figure 17). Farmers with access to hired labor (33 of 54 farmers) and belonging to a farmers' association (13 of these 33) usually chose pineapple systems. Farmers with access to hired labor (33 of 54 farmers) and not belonging to a farmers' association (20 of these 33) preferred cassava systems. Farmers with limited accessibility to external labor (21 of 54 farmers) never selected pineapple or tomato systems, preferring maize systems. When the number of household members was more than 6 (7 out of these 21), there was some preference for cassava as well. Other factors such as age, experience, farm size, and contact with agricultural extension services had no significant effect on the selection of systems (not shown).

Tableau 10 : Household characteristics of farms surveyed

Variables	Mean	SD	Min	Max
Age	43	10	20	70
Family size	9	7.7	1	20
Farm size	8.1	6.0	2	21
Fraction of non-agricultural income	High=3; Medium=22; Low=29			
Access to labor	High=17; Medium=16; Low=21			
Farming experience	12	8.3	2	40
Extension services	Yes =7; No=46			
Affiliation to farmers association	Yes =18; No=35			

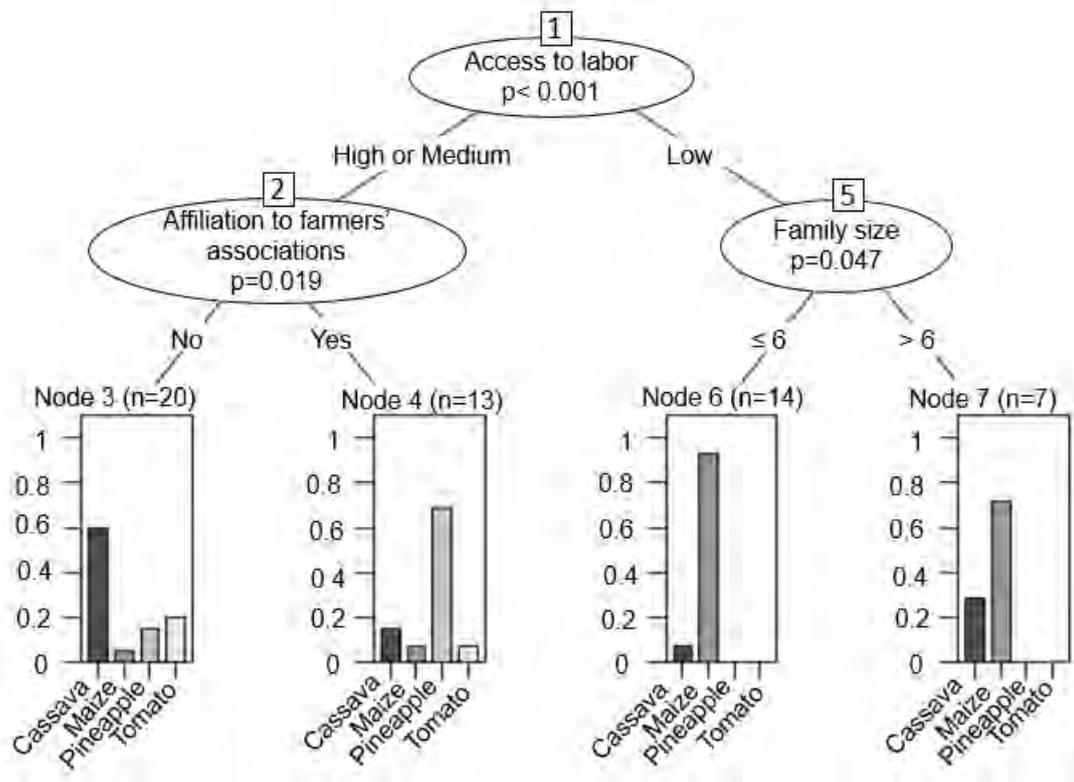


Figure 18: Conditional inference tree discriminating the main factors influencing the choice of oil palm agroforestry systems (n=54 farmers)

2.4. Discussion

2.4.1. Diversity of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau

Although the Allada plateau is generally considered to be relatively uniform in terms of soil and climate (Alle 2014), a number of different oil palm agroforestry systems were identified. These systems were classified according to the crop most commonly associated with the immature oil palms: the maize, the pineapple, the cassava and the tomato systems. In the oil palm agroforestry systems found in Cameroon (Nchanji et al., 2016), plantain (*Musa paradisiaca*) was not a common food crop associated with oil palm and was therefore not selected as a typical system in our study. Each of the identified systems was characterized by a specific technical management, since the choice of crop affected practices such as the level of mineral fertilization, soil tillage, and restitution of crop residues which may, in turn, affect the growth of the young oil palms.

The fertilizer application plan recommended by CRA-PP field advisors for young oil palm trees was not fully applied in most cases. These recommendations are based on pure oil palm stands,

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

in optimal biophysical conditions and do not allow for differences in expected and attainable production between farms or difference in access to resources. The actual level of fertilizer applications for the oil palms was significantly lower in the plantations where the associated crop required high levels of fertilizer applications. Moreover, the plant density of the associated crop was lower than for monocropping as no plants were grown within 1 m of an oil palm except in pineapple systems. These results suggested that the farmers were well enough aware of possible interactions between the diverse components species of the agroforestry system to take them into account in their technical management. This was different to nchanji 's findings from the study conducted on oil palm agroforestry systems in Cameroon, where these interactions seem not to be taken into consideration when intercropping annual food crops with oil palm.

2.4.2. A variety of choices with different performances

The oil palm plantation pattern left spaces of about 9 m x 8 m allowing farmers to take advantage of this free space for cultivating other crops. The farmers surveyed claimed that (i) the oil palm had no significant effect on the performance of the associated crop, and (ii) growing the associated crops created value from the land as well as providing weed control for the oil palm plantation. Nchanji et al., (2016) confirm these when they found out that about € 99 was saved annually with the intercropping in oil palm smallholdings in the south of Cameroon. The economics of the agroforestry systems depended strongly on the associated crop species. The return on costs was particularly high for tomato showing that this crop can generate high returns quickly. However, it does require considerable expenditure over a short period. Furthermore, the pest, disease and weather risks associated with tomato production reduce the benefits compared to pineapple. The return on costs of pineapple was also high and the long growing cycle spread the costs over time. The return on costs of cassava was lower than that of tomato and pineapple but has the advantage of requiring only a small expenditure. Cassava minimized the financial risks. In this region of the Allada plateau, financial returns and potential benefits were the primary motivation for choosing which fruit species to grow, including pineapple (Tossou et al. 2009) . In India the perception of economic profitability by farmers strongly determined the selection of pineapple as an associated crop in rubber plantations (Rajasekharan and Veeraputhran 2002).

The return on costs of maize and cassava were the lowest but maize had the highest ratio of consumption by the family. This confirmed that farmers perceive maize as a key component of

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

non-monetary systems mainly oriented towards food supply for the family with only the surplus production sold to earn income. Yabi and Moustafa (2013) reported similar results for maize monocrops in Northern Benin. In general, the economic evaluation was in line with farmers' perceptions. The farmers not only had an accurate perception their socio-economics but also of agronomics. For example, the resistance of pineapple to drought evoked by some farmers is the result of the pineapple's crassulacean acid metabolism (Borland et al. 2014).

2.4.3. Varying farmers' perceptions and farm characteristics lead to alternative cropping systems

Access to labor, membership of farmers associations and household size were the most significant extrinsic determinants of associated crop selection in the study area. Access to labor was the most important factor determining the selection of pineapple or tomato. Significant financial resources are required to recruit and pay temporary agricultural workers as their availability is restricted, especially at peak season due to a higher demand. Moreover accommodation for the workers must be supplied by the farmer. For example, in Allada district where tomato production predominated, farmers hired workers from other regions, and housed them at the homestead for about six months while paying them. Not all farmers could afford to do this. The labor costs represented 73.5% of total costs for pineapple and 72% for tomato. This temporary or specialized labor may be difficult to find when it is most needed. The high rate of school attendance in this region has led to a decrease in the use of family labor (INSAE 2013) so only the wealthier farmers can grow pineapple or tomato systems even though they are very profitable. This is characteristic of cash crops in general. A study in Kenya also found a strong relationship between farmers' financial resources and the production of cash crops, such as tea, tobacco, sugar cane and tomato (Tittonell et al. 2010).

Joining an association of farmers with a large and specialized experience on a given production system allows members to capture the learnings, exchange information, and enhance the marketing chain. Association membership may also facilitate access to inputs like fertilizers that can be purchased at a wholesale rate and then retailed to farmers according to their expressed needs. Food security was the main motivation associated with the selection of maize. The production costs of maize were eight times lower than for pineapple. Farmers who selected maize consumed most of the maize produced. The size of the household was an important factor in the choice between maize and cassava systems to ensure a reliable supply of staple food in the household. This factor merits more as in studies on the adoption of practices the household

Chapitre 2: Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin

size usually expresses the availability of family labor as a factor determining the choice of crops (Adesina and Chianu 2002; Bullock et al. 2014).

The farmers thought that growing cassava as an associated crop was harmful for the young oil palms and this was confirmed in Cameroun where there are similar practices (Rafflegeau et al. 2010). Nevertheless, cassava was often grown with oil palm in the study region presumably due to its low production costs and its low financial risk. Although farmers with limited access to hired labor were most likely to select maize, for lower risk and better food security, larger households also grew cassava to diversify the staple crop.

This agrees with a study of the adoption of agroforestry in western Kenya where wealthier farmers were more likely to choose a risky practice than poorer farmers who are more interested in improving food security (Jerneck and Olsson 2014). Risk and uncertainty affected decisions in more than 70% of studies of the adoption of agroforestry practices (Pattanayak et al. 2003).

Three out of four of the systems we identified were spatially clustered. Tomato was found mostly in Allada, pineapple in Zè and cassava in Toffo. This does not mean that these crops could not be done elsewhere, but only that farmers feel more comfortable with crops production that are mainly cultivated in their village. The discussions with the farmers showed that their social networks interfering in the choice between tomato or pineapple as the main cash crop included not only the surrounding farmers, but also those who were directly or indirectly involved, for example, hired or specialized labor, purchasing cooperatives, advisers, wholesalers and retailers who are all involved in the production and sale of the produce. For example, the Ze` village is known as one of the main local market place for pineapple fruits. Thus, pineapple growers in the other regions of the Allada plateau prefer to hire for tillage or weeding workers from Ze` who are recognized well-experienced in these tasks. A farmer who lives near tomato growers can learn about tomato growing more easily than a farmer who does not. In addition, he may benefit from the existence of well-organized suppliers and customers and, in turn, contribute to the economic performance of all the other stakeholders. The development of either tomato or pineapple systems sounds as a collective action, involving several farmers in the same region and several stakeholders in the production chain. Changing to a different system or transplanting a system to another area would probably also rely on the decisions of several stakeholders as reported in the review of Clermont-Dauphin et al. (2014).

2.5. Partial conclusion

Our objective was to test the hypothesis that the decision of annual crop succession to carry out within young oil palm plantations was consistent with farmer's objectives, their own perception of the agrosystem and their socio-economic characteristics. We decided to use focus groups as this encouraged discussion, providing better collection of qualitative information, rather than a formal survey that would have been more relevant for the collection of quantitative data. We showed that the farmers' practices were diverse, not only in the selection of the associated crop succession, but also the fertilizer application regime. Observed choices in technical management also revealed farmer knowledge on how the diverse components species of the agroforestry system may interact. Each of the four typical systems that we identified had specific socio-economic benefits and drawbacks. The tomato system and the pineapple system were particularly associated with farmers having the highest financial resources for hiring labor while the cassava system was associated with farmers wishing to avoid expenditure and risk. The maize system was associated with farmers unable to hire external labor. Our estimates of the economic performance of the oil-palm agroforestry systems were in line with the farmers motivations. The financial resources for hiring labor, household size, and inclusion in social networks were important factors in the selection of agroforestry systems with immature oil palms in southern Benin. These findings should help scientists to draw up specifications for new practices as well as help policy makers identify appropriate incentives to promote them. Further studies in southern Benin will have to consider whether the performance of the mature oil palms is affected by the various practices in the immature plantations.

Avant - propos

Le chapitre précédent a permis d'identifier les principaux systèmes de culture et les principaux déterminants socioéconomiques de choix de chaque système. L'évaluation du fonctionnement biophysique des systèmes identifiés peut commencer. Ce troisième chapitre de la thèse est consacré à l'évaluation des impacts des systèmes agroforestiers à base de palmier identifiés sur les performances agronomiques des cultures vivrières associées et leur relation avec l'utilisation des ressources abiotiques du milieu (Hypothèses H3a et b). Un réseau de parcelles paysannes a été mis en place pour la collecte des données utilisées pour mettre en évidence les états des peuplements de cultures vivrières associées aux palmiers qui découlent des interactions entre les cultures associées. Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article de recherche non encore publié.

Chapitre 3 : Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile



3.1. Introduction

L'association de cultures vivrières annuelles aux plantations de palmier à huile (*Elaeis guineensis*, jacq), pendant leurs phases immatures est une pratique agroforestière usuelle dans les agricultures familiales rurales du sud du Bénin (Aholoukpè et al., 2013). La phase immature du palmier correspond aux trois premières années de plantation où le palmier est encore improductif. Les jeunes palmiers sont implantés à une densité de 143 plants.ha⁻¹ suivant un arrangement spatial uniforme. Les cultures annuelles sont plantées dans l'espace intercalaire libre de la plantation et remplissent pour l'agriculteur des fonctions économique, écologique et/ou sociale variées (Koussihouédé et al., 2020a, chapitre 2). Bien que plusieurs auteurs aient rapporté une diversité marquée de cultures associées dans ces systèmes (Aholoukpè et al., 2013 ; Koussihouédé et al., 2020a chapitre 2), les connaissances sur les interactions palmier-culture sur la production des cultures associées dans ces systèmes restent fragmentaires. Une révision de la littérature montre que la plupart des références disponibles sur l'analyse des performances des cultures associées à des arbres en Afrique de l'ouest ont porté sur les systèmes de type parc où des arbres natifs sont présents à faible densité et suivant un arrangement aléatoire dans les champs (Bayala et al., 2015; Kessler, 1992; Sanou et al., 2012). Il n'est pas assuré que ces connaissances soient extrapolables au cas des systèmes où les arbres sont plantés selon un arrangement homogène avec une densité plus forte.

Parmi les connaissances produites sur les systèmes agroforestiers de type parc en Afrique de l'ouest, certaines concernent le partage de l'eau entre l'arbre et la culture annuelle. Les arbres adultes présentent en général un enracinement important en profondeur, laissant à la culture annuelle associée l'exploitation de l'eau et des nutriments dans les horizons superficiels (Roupsard et al., 1999). Certains auteurs ont montré que les racines profondes des arbres peuvent même jouer un rôle d'ascenseur pour faire remonter l'eau profonde vers les horizons superficiels de sols en période sèche (Sun et al., 2014). Ce processus peut résulter en une performance supérieure ou équivalente des cultures associées en présence de l'arbre comparé à la situation sans arbre (Hawkins et al., 2009; Kizito et al., 2012; Louppe et al., 1996). Des cas de relations de compétition pour l'eau ont également été rapportés dans les systèmes agro forestiers. Par exemple, sur la base d'un essai additif sur un système de culture en couloir à base de *Senna spectabilis* au Kenya, McIntyre et al. (1997) démontrent l'existence d'une relation de compétition entre des espèces (Senna, niébé, maïs) qui tous privilégient les couches superficielles pour l'acquisition de l'eau du sol.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

Le partage de l'eau du sol entre l'arbre et les espèces annuelles associées a rarement été examiné dans le cas des systèmes agroforestiers à palmier. Les études sur la caractérisation morphogénétique des racines du palmier (Erhabor et al., 2002 ; Nodichao et al., 2008) indiquent qu'à la fin de la période immature de l'arbre (3 ans), la plupart des racines se trouvent principalement dans les 40 premiers cm de profondeur du sol. On peut donc craindre que la culture annuelle couvre les mêmes horizons de sols que l'arbre et que la faible séparation spatiale des racines de chaque espèce entraîne une compétition pour l'eau entre les deux espèces et une baisse de performance des cultures annuelles associées aux jeunes palmiers à huile.

L'objectif de la présente étude est i) de caractériser le partage des ressources abiotiques (lumière et eau du sol) entre les deux cultures associés dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile au sud du Bénin et ii) d'en évaluer les impacts sur les rendements et les quantités de biomasse des cultures associées.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Région d'étude

La région d'étude regroupe les communes de Toffo, Allada et Zè situées sur le plateau d'Allada (1°59'N et 2°15'E, 90 m d'altitude) au Sud du Bénin. Le plateau d'Allada est la deuxième plus grande région productrice de palmiers à huile du pays (RPGH4/INSAE, 2013). La production végétale y est principalement pluviale. Un climat de type guinéen avec deux saisons des pluies (mars-juillet et septembre-novembre) et deux saisons sèches (Décembre-Mars et Août) prévaut dans la région. La pluviométrie moyenne est de 1200 mm.an⁻¹ (Assogbadjo et al., 2011). La quantité de pluie est d'environ 70% de la pluviométrie totale annuelle en grande saison et de 28% en petite saison. La température annuelle moyenne varie de 25° à 29°C et l'humidité relative de l'air de 65 à 97% tout au long de l'année (Assogbadjo et al., 2011). Les sols sont ferrallitiques faiblement désaturés communément appelés « terres de barre », (*rhodic ferralsol*) formés sur les sédiments du continental terminal sont dominant dans cette région. Ces sols sont d'un niveau de fertilité physique bonne due à leur forte perméabilité et porosité (5 à 8 cm.h⁻¹ de conductivité hydraulique dans les premières couches de sol) et à leur texture de surface limono-sableuse comportant 9 à 13% d'argile (Azontondé, 2000; Azontondé et al., 2010). En outre, ces sols ont une réserve utile comprise entre 40 et 50 mm à 30 cm de profondeur et entre 60 et 70 mm à 60 cm de profondeur (Azontondé, 1991). Ce sont par contre des sols à fertilité chimique basse avec une capacité d'échange cationique de 5,8 cmol.100⁻¹g (Azontondé et al.,

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

2010), malgré un taux moyen de matière organique de 1,4%, ce qui approche le maximum de 2% pour cette texture sablo-limoneuse (Dabin, 1956; Feller, 1995).

3.2.2. Dispositifs expérimentaux et collectes de données

3.2.2.1. Dispositifs

Une précédente étude a permis d'identifier quatre principaux types de systèmes à base de palmier caractérisés principalement par le type de culture associée et la gestion de la fertilisation des cultures associées (Koussihouédé et al., 2020a, chapitre 2). Ce sont : les systèmes palmier-manioc, palmier-ananas, palmier-tomate et palmier-maïs. Chaque type de système est dominant dans une commune de la région. Ainsi, les systèmes palmier - manioc, palmier - ananas et palmier - tomate sont dominants respectivement dans les communes de Toffo, de Zè et d'Allada (Koussihouédé et al., 2020a, chapitre 2). Le système palmier-maïs est par contre retrouvé partout dans la région (Koussihouédé et al., 2020a, chapitre 2). Un dispositif en réseau de 15 palmeraies paysannes a été constitué pour représenter la diversité des systèmes de culture identifiés dans la région et servir pour la collecte de données sur leur fonctionnement agroécologique (Figure 18). Le Tableau 11 présente les caractéristiques techniques des palmeraies considérées pour l'étude. Les palmeraies ont été sélectionnées à deux ans d'âge. Les collectes de données ont été réalisées au cours de la troisième année des palmeraies (Tableau 11). Chaque système y est représenté par quatre palmeraies à l'exception du système maïs dont une palmeraie a été écartée en raison d'un changement de pratique par l'agriculteur. Comme l'ananas installé dès la première année de plantation du palmier est déjà récolté à deux ans d'âge des palmiers (Koussihouédé et al., 2020a, chapitre 2), les parcelles du système ananas portaient du maïs au moment de l'étude.

Des placettes de suivi de la culture annuelle et de l'eau du sol ont été placées à trois distances de quatre arbres sélectionnées sur chaque parcelle. Les palmiers choisis sont homogènes en termes d'encombrement ($\text{encombrement} = \pi (D/2)^2$; avec D le diamètre moyen de la couronne) (Tableau 11). Les placettes ou zones sont délimitées de part et d'autre des palmiers sur les diagonales de l'axe est-ouest. Ces trois zones sont les suivantes (Figure 19) :

- Z0 : zone correspondant à l'aire du cercle de 1m de rayon sous la couronne du palmier (culture en permanence à l'ombre quelle que soit l'orientation).
- Z1: zone située à une distance de 1m - 2,75 m du palmier, hors couronne sur les 2/3 de leur surface (culture au soleil le matin et à l'ombre dans l'après-midi respectivement suivant l'orientation) ;

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

– Z2: zone située à une distance de 2,75 m - 4,5 m du palmier (culture en permanence au soleil quelle que soit l'orientation).

Au total, on a quatre placettes Z0 et huit placettes Z1 et Z2 par parcelle.

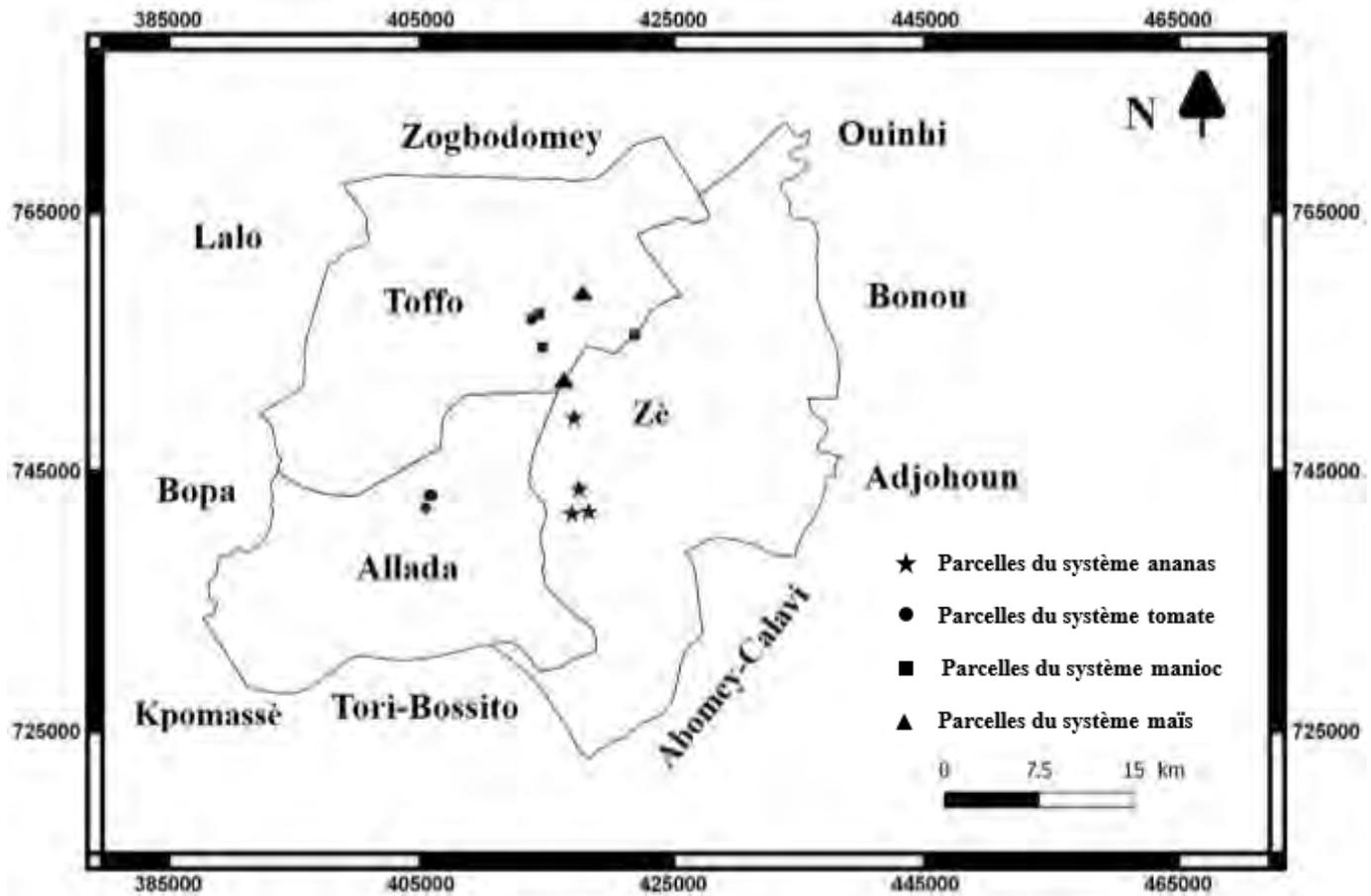


Figure 19 : Carte du plateau d'Allada montrant les sites d'étude.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

Tableau 11 : Caractéristiques des parcelles d'étude.

Type de système	Nombre de parcelles dans chaque système	Successions de culture sur les trois ans ^{a, b}	Quantité de fertilisant appliqué au palmier sur les deux premières années (kg ha ⁻¹ année ⁻¹)	Encombrement moyen ^b des palmiers choisis (m ²) (moyenne ± erreur type)	Nombre total de palmiers suivi dans chaque système
Manioc (M)	4	[ma / ma] [ma / M][.../ M]	An1: N=33; K=36 An2: N=33; K=36	15,92 ± 0,80	15
		[ma / ma] [ma / M] [.../ M]	An1: N=33; K=36 An2: N=33; K=36		
		[n / ma] [n / M] [.../ M]	An1: N=33; K=36 An2: N=33; K=36		
		[n / ma] [n / M] [.../ M]	-		
Maïs (ma)	3	[ma + n / ma] [ma / ma + n] [ma /ma]	An1: N=33; K=36	14,08±1,48	12
		[ma / ma] [ma / ma] [ma /ma]	An1: N=33; K=36 An2: N=33; K=36		
		[ma / ma] [ma / ma] [ma /ma]	An1: N=33; K=36 An2: N=33; K=36		
Ananas (A)	3	[A] [...] [ma / ma]	-	14,18±0,49	12
		[ma + A] [...] [ma]	-		
		[A] [...] [ma]	-		
Tomate (T)	3	[T / T] [T / T] [T]	An2: N=33; K=36:	17,92±2,26	12
		[T / T] [T / ma] [T]	An2: N=33; K=36		
		[ma / ma] [T/ T] [T]	An2: N=33; K=36		

^a n= niébé; [] succession annuelle c'est-à-dire occupation du sol au cours des deux saisons de culture qui composent une année; [...] continuation de la culture précédente; / saison; + culture en relais; ^b les cycles de culture concernés par les mesures des rendements et de quantités de biomasse sont en gras; ^c Encombrement = $\pi (D/2)^2$; avec D le diamètre moyen de la couronne.

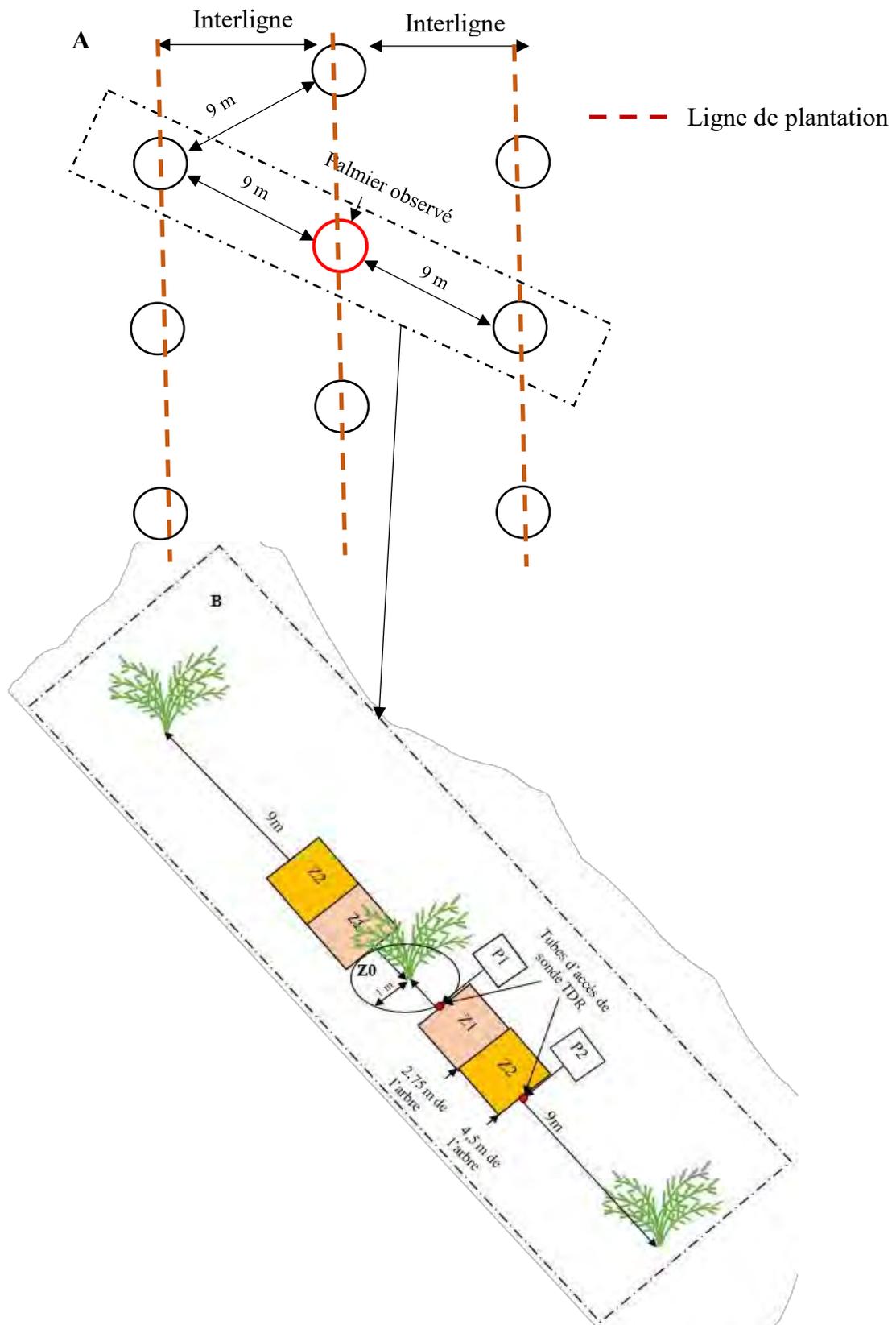


Figure 20 : Schéma du dispositif d'étude ; A : palmeraie vue d'en haut; B : dispositif d'étude vu de près.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

3.2.2.2. Collectes de données

3.2.2.2.1. Humidité du sol

L'humidité volumique du sol a été mesurée à l'aide d'une sonde TDR (TRIME HD2, Imko GmbH, Ettlingen, Allemagne) uniquement dans les systèmes maïs et manioc (Tableau 11). Deux tubes d'accès (longueur 1m, diamètre 5 cm) ont été installés autour d'un palmier dans chaque palmeraie suivant deux positions : 1 m du palmier (P1) et à 4,5 m, soit la mi-distance sur la diagonale (9 m) entre deux palmiers (P2) (Figure 19). Les humidités du sol en positions P1 et P2 sont considérées comme représentatives de l'état hydrique du sol des zones Z1 et Z2 respectivement. Les tubes n'ont pas été installés pour la zone Z0. Les mesures d'humidité du sol ont été effectuées en moyenne tous les sept jours pendant neuf mois incluant la grande saison sèche (novembre 2017- février 2018) et la grande saison pluvieuse (mars-juillet 2018). Les mesures ont été faites tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 80 cm. Les données de pluviométrie et de température journalières de la commune de Toffo sur la campagne de collecte des données ont été obtenues auprès de l'agence nationale de météorologie (météo-Bénin).

Les mesures de densité apparente (d_a) et des humidités caractéristiques des sols : humidités à la capacité au champ ($H_{pF2,5}$) et au point de flétrissement ($H_{pF4,2}$) ont été mesurées sur des échantillons de sol collectés sur les horizons d'un profil pédologique de 100 cm installé sur chaque parcelle à l'exception d'une parcelle palmier-maïs (ma_3) voisine d'une autre parcelle du même système (ma_2 situé à moins de 10 m de ma_3). Les prélèvements de sol pour le calcul des densités apparentes ont été réalisés avec des cylindres de densité. Une chambre à pression (marmite de Richard) a été utilisée pour la détermination des humidités caractéristiques. Ces données ont permis de calculer les réserves utiles des sols (RU) suivant la formule :

$$RU \text{ (en mm)} = d_a \text{ (g.cm}^3\text{)} \times Z \text{ (dm)} \times (H_{pF2,5} - H_{pF4,2}) \text{ (en \%)}$$

Où d_a = densité apparente du sol ; Z = profondeur du sol ; $H_{pF2,5}$ et $H_{pF4,2}$ = humidités caractéristiques des sols.

3.2.2.2.2. Rendements et biomasses aériennes des cultures associées

Les cultures associées ont été mises en place dans les palmeraies par les agriculteurs. Les mesures de rendement et de quantité de biomasse des cultures (exprimées en kg.ha^{-1}) ont été faites dans les placettes sur un cycle de culture à l'exception de deux parcelles du système manioc où deux cycles de culture ont pu être observés (Tableau 11). Les rendements pour les racines de manioc et les fruits de tomate sont exprimés en matière fraîche. Les rendements en

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

grains et en pailles de maïs ont été déterminés après séchage à l'étuve d'échantillons d'épis et de pailles à 65°C jusqu'à poids constant. Les rendements en grains de maïs ont été estimés suivant l'équation 1 (eq1) développée par (Saïdou, 1992). Les quantités de biomasse aérienne sèche du maïs, de la tomate et du manioc ont été estimées suivant l'équation 2 (eq2). La biomasse aérienne des cultures associées est constituée des tiges et feuilles des cultures restant sur la parcelle après la récolte.

$$Rg = \frac{10.000 \times NP \times P \times MS \times n}{A} \quad (\text{eq1})$$

Avec Rg = Rendement en grains du maïs (kg.ha⁻¹ de matière sèche) ; NP = nombre de plant sur la placette ; P = Poids total des épis récoltés sur chaque placette et pesés au champ (kg) ; MS = Taux de matière sèche des épis de maïs ; A = Aire des placettes (m²) ; n = Rapport poids grains secs de l'échantillon après égrenage sur poids total échantillon épis secs calculé sur la base de nos propres données.

$$Rb = \frac{10.000 \times NP \times Pb \times MS}{A} \quad (\text{eq2})$$

Avec Rb = rendement de biomasse aérienne (kg.ha⁻¹ de matière sèche) ; NP = nombre de plant sur la placette ; Pb = Poids total de la biomasse de chaque placette pesée au champ (kg) ; MS = Taux de matière sèche de la biomasse ; A = Aire des placettes (m²).

3.2.3. Traitement statistique des données

3.2.3.1. Analyse des données d'humidité du sol

Les données de suivi hebdomadaire de l'humidité du sol ont été modélisées par l'usage des modèles linéaires à effet mixte dans la bibliothèque **nlme** (Pinheiro et al., 2017) du logiciel R 3.5.1 (R Core Team, 2018). La procédure de modélisation a consisté à tester successivement l'effet du facteur aléatoire « parcelle » et l'effet du facteur « temps » en utilisant respectivement le modèle de moyenne inconditionnelle et le modèle de croissance inconditionnelle. La contribution de leurs effets respectifs à la variabilité totale a été appréciée par le calcul du coefficient de corrélation intraclasse (ICC) dont la formule s'écrit :

$$ICC\% = \frac{\sigma^2 \text{facteur aléatoire}}{\sigma^2 \text{facteur aléatoire} + \sigma^2 \text{erreur}} * 100$$

Où $\sigma^2 \text{facteur aléatoire}$ est la variance du facteur aléatoire et $\sigma^2 \text{erreur}$ la variance de l'erreur résiduelle.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

La recherche de l'effet du facteur d'intérêt (position des tubes d'accès de sonde TDR) a conduit à sélectionner les meilleures structures de matrices de variances-covariances pour les résidus après un test du ratio de vraisemblance ainsi que la meilleure structure de la matrice des effets aléatoires. Les modèles qui ajustent le mieux les données ont été sélectionnés sur la base du critère d'information d'Akaike (AIC). A l'issue de ce processus, une analyse de la variance effectuée sur les résultats du meilleur modèle retenu a permis de conclure sur la significativité du facteur « position » et du facteur « temps ». Les courbes de tendance évolutive ont été réalisées afin de décrire les spécificités de chaque traitement. La fonction « emmeans » du package du même nom (Lenth, 2018) a été exécutée pour l'extraction des moyennes ajustées et des erreurs types.

3.2.3.2. Analyse des données de rendements et de biomasse des cultures

Des modèles linéaires à effets mixtes ont été utilisés pour analyser :

- (i) les effets des systèmes de culture à maïs et ananas sur les rendements et les biomasses aériennes du maïs. Dans cette analyse, le facteur « système » est considéré comme facteur fixe et le facteur « parcelle » comme facteur aléatoire. L'équation du modèle utilisée dans ce cas s'écrit :

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 (\text{Système de culture}) + (\text{Parcelle})_i + \epsilon_{ij}$$

Où Y est la variable réponse, les indices i et j indiquent que chaque observation j est imbriquée dans la parcelle i; β_0 est l'ordonnée à l'origine, β_1 est le coefficient estimé et ϵ_{ij} l'erreur résiduelle.

- (ii) Les effets de la zone et de l'orientation des placettes sur les rendements et les biomasses aériennes des cultures associées au sein de chaque système ont été pris en compte dans une première étape de l'analyse. Cependant, l'effet de l'orientation ne s'est pas révélé significatif dans la plupart des cas. De même, l'effet du cycle de culture ne s'est pas révélé significatif sur les parcelles indiquées dans le système manioc. Au final, seul le facteur « zone » a été retenu comme facteur fixe dans l'analyse et présenté dans les résultats. Le facteur « parcelle » y est considéré comme facteur aléatoire. L'équation du modèle utilisé dans ce cas s'écrit :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 (\text{Zone}) + (\text{Parcelle})_i + \epsilon_i$$

où Y est la variable réponse; β_0 est l'ordonnée à l'origine ; β_1 et β_2 sont les coefficients estimés et ϵ représente l'erreur résiduelle.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

Ces analyses ont été effectuées en utilisant le package **lme4** (Bates et al., 2015) du logiciel R 3.5.1 (R Core Team, 2018). Le coefficient de corrélation intraclasse (ICC) en pourcentage a été utilisé pour déterminer l'importance de la variabilité entre les parcelles portant le même système. Les modèles qui ajustent le mieux les données ont été sélectionnés sur la base du critère d'information d'Akaike (AIC). Une analyse de la variance effectuée sur les résultats du modèle retenu a permis de conclure sur la significativité des facteurs fixes. La fonction « emmeans » du package du même nom (Lenth, 2018) utilisant la méthode de Tukey a été exécutée pour l'extraction des moyennes ajustées, des erreurs types et des comparaisons multiples des niveaux des facteurs fixes ($P < 0,05$).

3.3. Résultats

3.3.1. Caractéristiques climatiques de la période d'étude

La figure 20 montre le diagramme ombrothermique de la période allant de septembre 2017 à septembre 2018. Il en ressort une amplitude thermique assez faible de $1,7^{\circ}\text{C}$ et une pluviométrie moyenne mensuelle variant de 0 mm (en janvier) à 120 mm d'eau (en août). La période de suivi (indiquée sur la Figure 20) comprend une période de sécheresse qui va de décembre 2017 à janvier 2018 avec une pluviométrie moyenne de 12 mm d'eau et une phase humide qui va de février à juillet avec une pluviométrie moyenne mensuelle peu variable de 75 mm d'eau /mois.

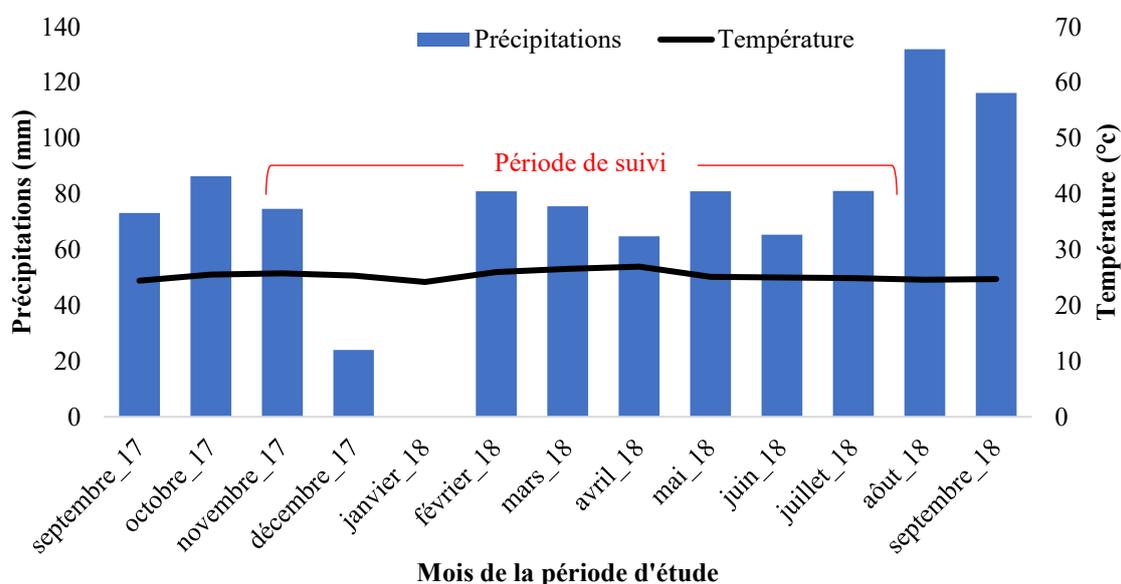


Figure 21 : Diagramme ombrothermique du sud du Bénin sur la période septembre 2017- septembre 2017-2018.

Les histogrammes en rouge correspondent aux mois de la période de collecte des données d'humidité du sol.

Source : données météo-Bénin.

3.3.2. Réserves utiles des sols des parcelles

La Figure 21 présente les réserves utiles suivant les horizons des sols des parcelles. Ces valeurs varient entre 10 et 20 mm d'eau en surface (< 40 cm) et entre 60 et 90 mm d'eau en profondeur (>40 cm). Sur une profondeur totale de 100 cm, la valeur moyenne de RU est de 128,65 mm d'eau avec un écart-type de 22,6 mm.

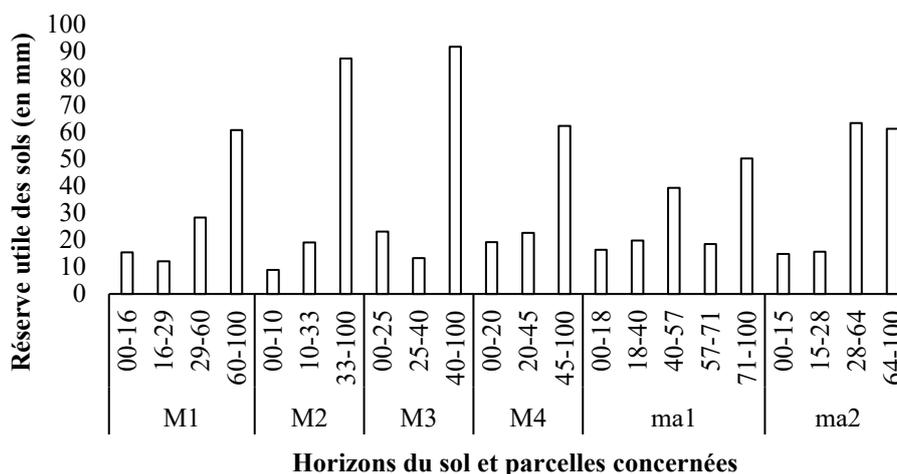


Figure 22: Réserve utile des sols des parcelles d'étude suivant les horizons du sol. M1, M2 (...) sont les parcelles décrites dans le Tableau 11.

3.3.3. Humidité du sol et performances des cultures en fonction de la distance au palmier

Les résultats des calculs de l'ICC sont présentées en annexe (Annexes 3 et 4). Il en ressort globalement que la variabilité inter-parcellaire est faible ($1\% < ICC < 40\%$). Cela indique que les caractéristiques des sites expérimentaux retenus pour chaque système de culture sont assez homogènes. De même, la variabilité liée au facteur temps est faible ($ICC \leq 10\%$) indiquant que le temps n'influence que faiblement la variabilité de l'humidité du sol dans les systèmes étudiés. Dans le cas du maïs comme pour le manioc, le modèle de croissance conditionnelle à une structure de matrice de variances-covariances des résidus de type autorégressif de moyenne mobile de premier ordre. Ce modèle homogène et de structure de matrice de variances de type « non structuré » ajuste le mieux les données d'humidité observée quelle que soit la profondeur considérée pour l'analyse (Annexe 3).

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

3.3.4. Humidité du sol en fonction de la distance au palmier dans les systèmes maïs et manioc

Les profils d'humidité du sol à un mètre du pied du palmier (P1) et à 4,5 m au plus loin du palmier (P2) sur une profondeur de 80 cm de sol dans le cas du système maïs sont présentés par la Figure 22 a et b. On note :

- des différences d'humidité du sol entre zones d'observation (proche ou loin du palmier). Ces différences diminuent avec la profondeur. Elles sont quasiment nulles à partir de 50 cm de profondeur. L'analyse de la variance (Tableau 12) effectuée sur les résultats du modèle retenu montre que le facteur d'intérêt « position des tubes d'accès » ainsi que le facteur temps ont eu un effet significatif sur l'humidité du sol de la couche 0-40 cm du sol ($P=0,0034$ et $P<0,0001$ respectivement) (Figure 24). *A contrario*, il n'existe pas d'effet significatif ni du temps, ni des positions, ni de leur interaction sur les humidités des sols de la couche profonde 40-80 cm dans le cas du maïs ($P=0,61$; $P=0,84$; $P=0,55$ respectivement) ;
- à partir de 50 cm de profondeur, l'humidité du sol augmente avec la profondeur ;
- des différences significatives d'humidité du sol entre saison sèche et saison pluvieuse, sans changement dans la forme des courbes entre ces deux périodes.

Ces observations se distinguent des systèmes avec manioc (Figures 23 a et b), où l'on note :

- une humidité du sol non seulement plus faible proche du palmier (Zone 1) que dans la Zone 2, mais aussi plus stable le long du profil du sol. Seule la position des tubes a montré un effet significatif sur l'humidité du sol ($P=0,03$) de la couche 0-40 cm du sol. Le facteur « temps » et l'interaction entre ces facteurs n'ont pas eu un effet significatif sur l'humidité du sol ($P=0,84$; $P=0,23$ respectivement) (Figure 25). Le décrochage des courbes observé pour le système maïs à partir de 50 cm de profondeur, n'est pas observé ici ;
- des écarts d'humidité entre zone 1 et zone 2 qui augmentent avec la profondeur. Il existe un effet significatif de chaque facteur respectif (temps et position) et de leur interaction sur les humidités des sols de la couche profonde 40-80 cm dans le cas du manioc ($P=0,0011$; $P<0,0001$; $P=0,0018$ respectivement).

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

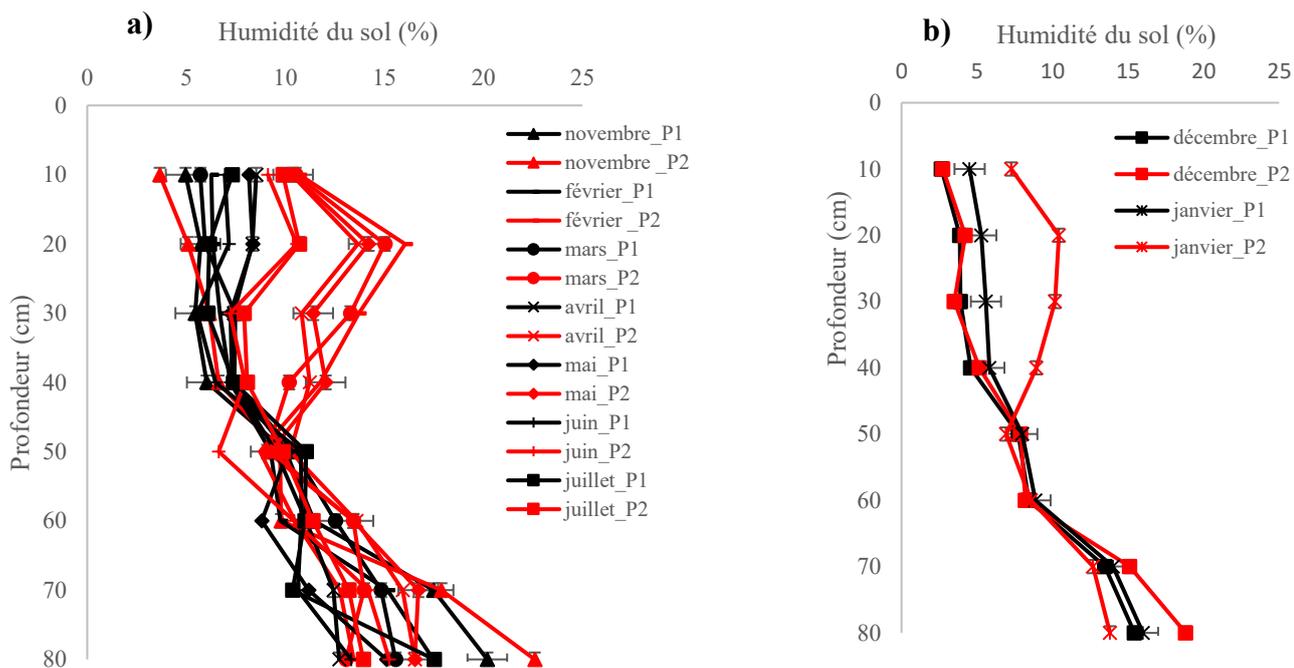


Figure 23: Profil hydrique du sol dans le système maïs. a) pendant la période humide ; b) pendant la période sèche ; P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2. (n=3 à 5).

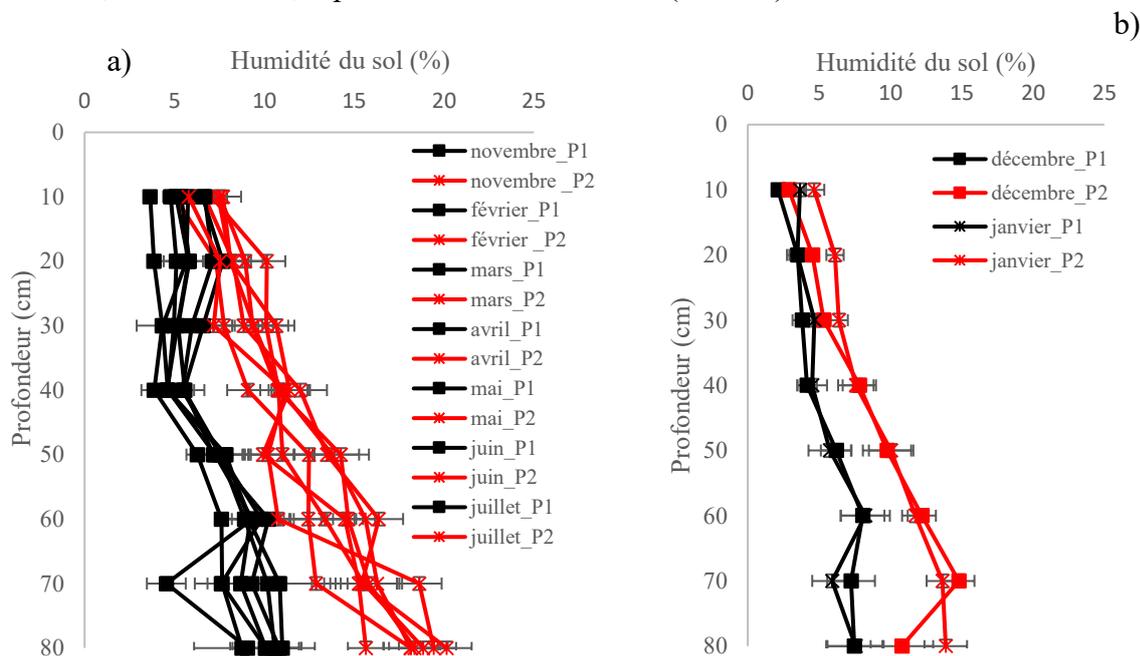


Figure 24: Profil hydrique du sol dans le système manioc. a) pendant la période humide ; b) pendant la période sèche ; P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2. (n=3 à 5).

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

Tableau 12 : Résultats de l'analyse de la variance sur le modèle retenu sur l'humidité des sols aux profondeurs 0-40 cm et 40-80 cm. (n=1584 pour le maïs et 2112 pour le manioc)

	Maïs					Manioc				
	0-40 cm		40-80 cm			0-40 cm		40-80 cm		
	dendl	F	P (sign.)	F	P (sign.)	dendl	F	P (sign.)	F	P (sign.)
Date	786	8,63	0,0034 (**)	0,25	0,61 (ns)	1049	0,029	0,86 (ns)	10,66	0,0011 (**)
Position	786	59,1 2	0,0001 (***)	0,03	0,84 (ns)	1049	4,61	0,03 (*)	514,34	0,0001 (***)
Date*Position	786	3,99	0,046 (*)	0,34	0,55 (ns)	1049	1,4	0,23 (ns)	9,8	0,0018 (**)

dendl= degré de liberté du dénominateur, le degré de liberté du numérateur est égal à 1 dans tous les cas ; F= valeur de la statistique de Fischer ; P. = valeur de la probabilité ; sign.=niveau de significativité : ***= Différence très hautement significative (p<0,1%); **= Différence hautement significative (p<1%) ; *= Différence significative p<5 ; ns=Différence non significative (p>5%)

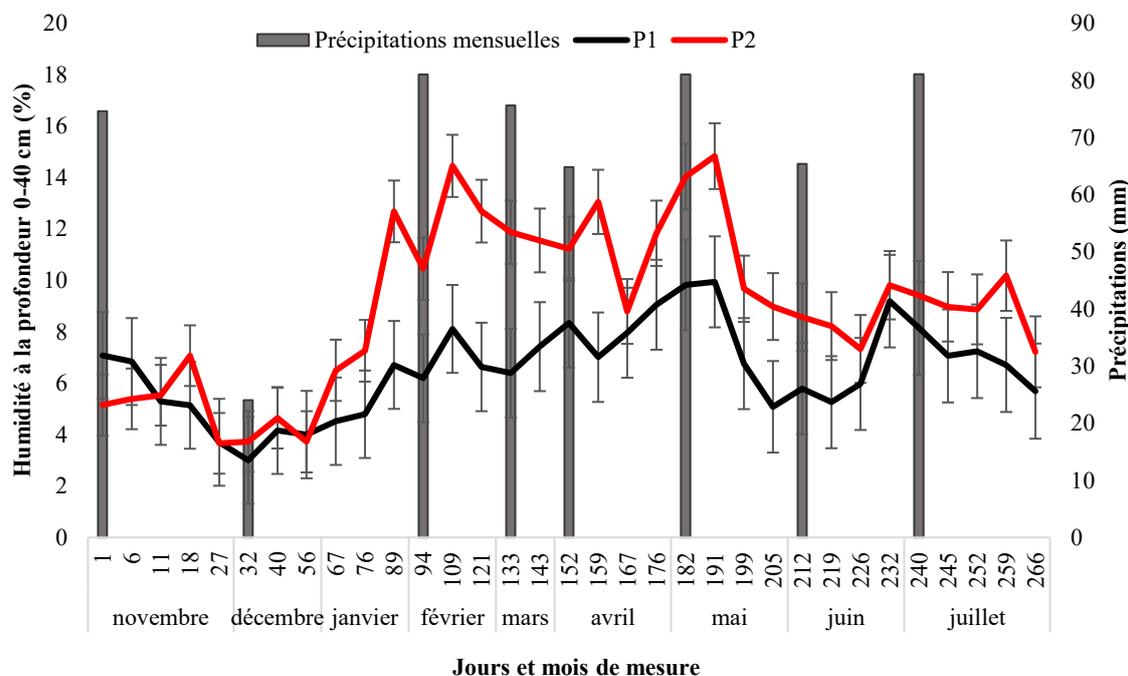


Figure 25 : Evolution de l'humidité du sol sur la profondeur 0-40 cm en fonction de la distance à l'arbre dans le système maïs. P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2.

Les histogrammes combinés représentent les précipitations mensuelles.

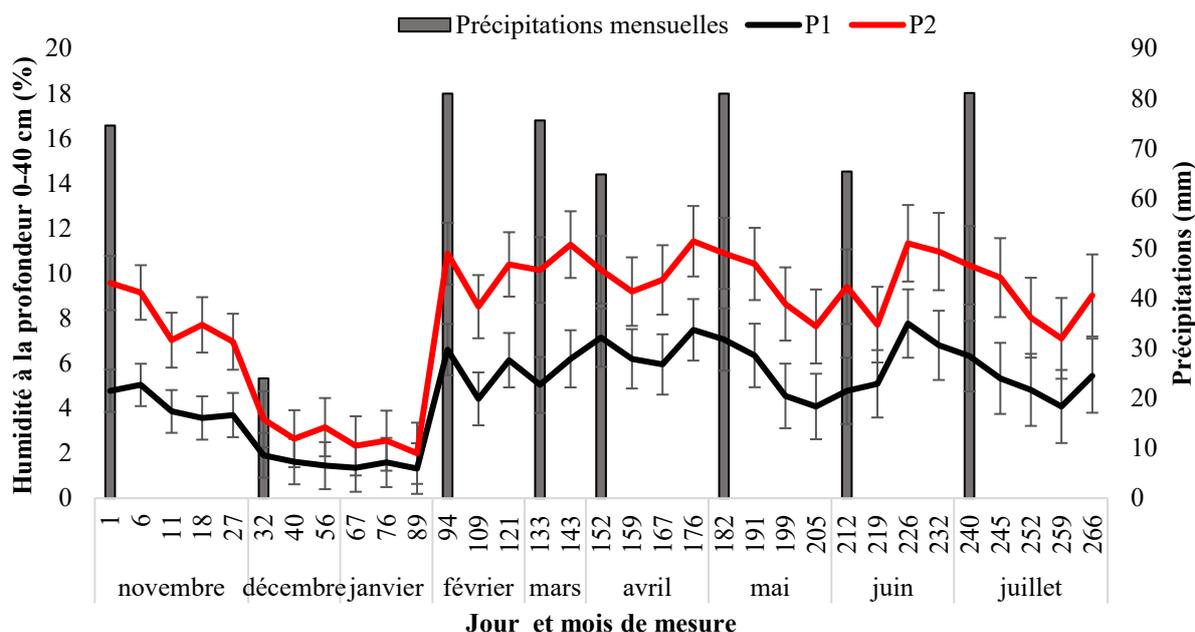


Figure 26 : Evolution de l'humidité du sol sur la profondeur 0-40 cm en fonction de la distance à l'arbre dans le système manioc. P1= tube installé à 1m de l'arbre, représentatif de la zone Z1 ; P2= tube à 4,5 m de l'arbre, représentatif de la zone Z2.

Les histogrammes combinés représentent les précipitations mensuelles.

3.3.5. Rendements et biomasses des cultures associées en fonction de la distance à l'arbre

3.3.5.1. Performances du maïs suivant la distance à l'arbre dans les systèmes à maïs et à ananas

Les rendements du maïs ne diffèrent pas significativement suivant le précédent considéré ($P=0,15$). De même, les quantités de biomasses du maïs ne diffèrent pas significativement entre les systèmes ($P= 0,08$). Les rendements en grains et les biomasses du maïs au pied du palmier (zone1) et à 4,5 m du palmier (zone 2) sont présentés dans la Figure 26. Les deux figures de gauche indiquent le cas du maïs dans le cadre d'une succession de la même culture (système maïs) et celles de droite, le cas du maïs dans le cadre d'une succession avec une longue période d'ananas fortement fertilisé (système ananas). On note que :

- quel que soit le système, le rendement en grain et la biomasse de maïs augmentent quand on s'éloigne de l'arbre. Le gain de rendement entre la zone Z2 et Z0 est de $1072 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ correspondant à 87% de Z0 dans le cas du système maïs (Figure 26). Le gain de rendement entre la zone Z2 et Z0 est de $1269 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ soit 98% dans le cas du système à ananas. La biomasse suit la même tendance que le rendement dans les deux systèmes. Cependant, s'il existe une différence significative (Figure 27) entre les rendements des

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

zones Z1 et Z2 dans les deux systèmes (+418 et +423 kg.ha⁻¹ respectivement pour maïs et ananas ce qui correspond à +34% pour Z2), il n'existe pas de différence significative (Figure 27) entre les biomasses de ces deux zones et dans les deux systèmes. Le gain de biomasse entre la zone Z2 et Z0 est de 42,2 kg.ha⁻¹ soit 79% de Z0 dans le cas du système maïs (Figure 27). Le gain de biomasse entre la zone Z1 et Z0 est de 100% dans le cas du système à ananas.

- l'effet dépressif de l'arbre est plus important dans le système ananas que dans le système maïs.

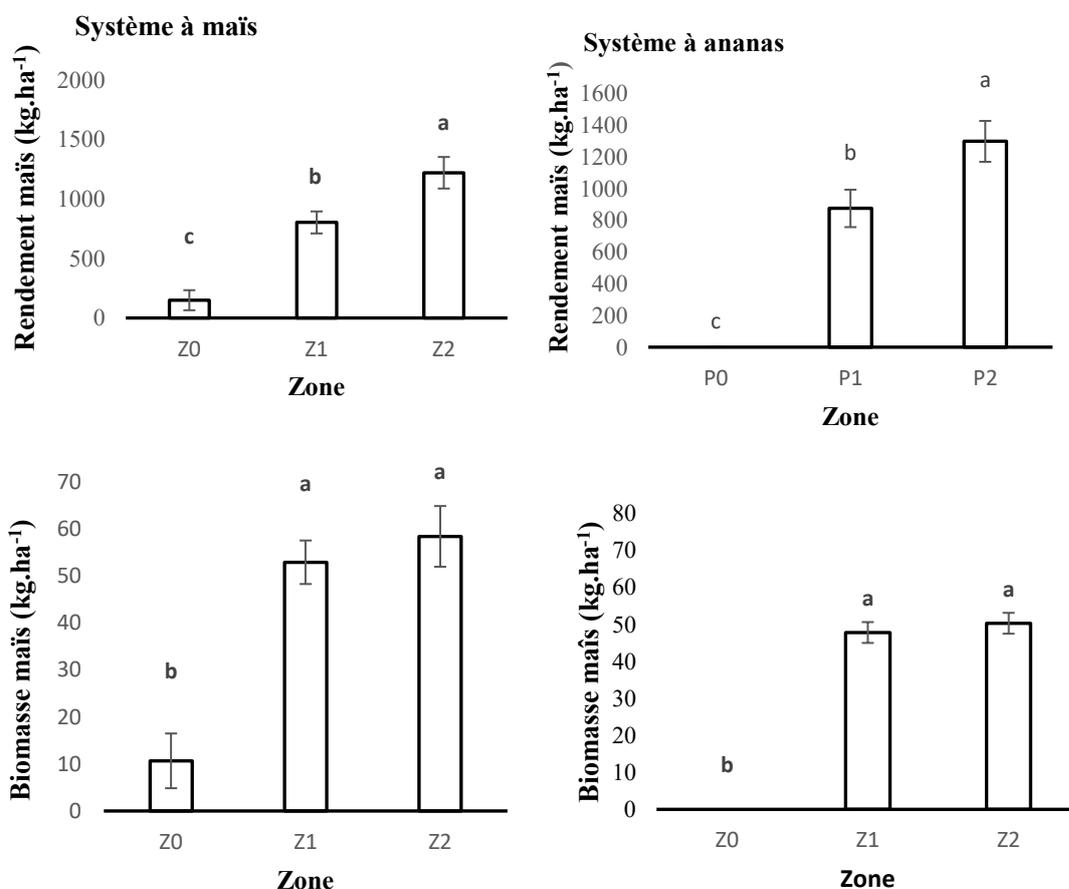


Figure 27: Rendements en grains et quantité de biomasse aérienne du maïs suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans les systèmes maïs et ananas (nombre de répétition par parcelle égal à 4 pour Z0 et 8 pour Z1 et Z2).

Les moyennes suivies des mêmes lettres alphabétiques ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%. Les barres représentent des erreurs standards.

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

3.3.5.2. Performances du manioc suivant la distance à l'arbre

Les rendements et biomasse du manioc sont les plus faibles dans la zone Z0 au plus près des palmiers (1275 kg.ha⁻¹ et 24,5 kg.ha⁻¹ respectivement) et il n'existe pas de différence significative entre les rendements et les quantités de biomasses à la limite de la couronne (Z1) et la zone (Z2) (Figure 27). Le gain de rendement entre la zone Z1 et Z0 est de 11741 kg.ha⁻¹ soit +90 %. Le gain de biomasse entre la zone Z1 et Z0 est de 100,7 kg.ha⁻¹ soit +89%.

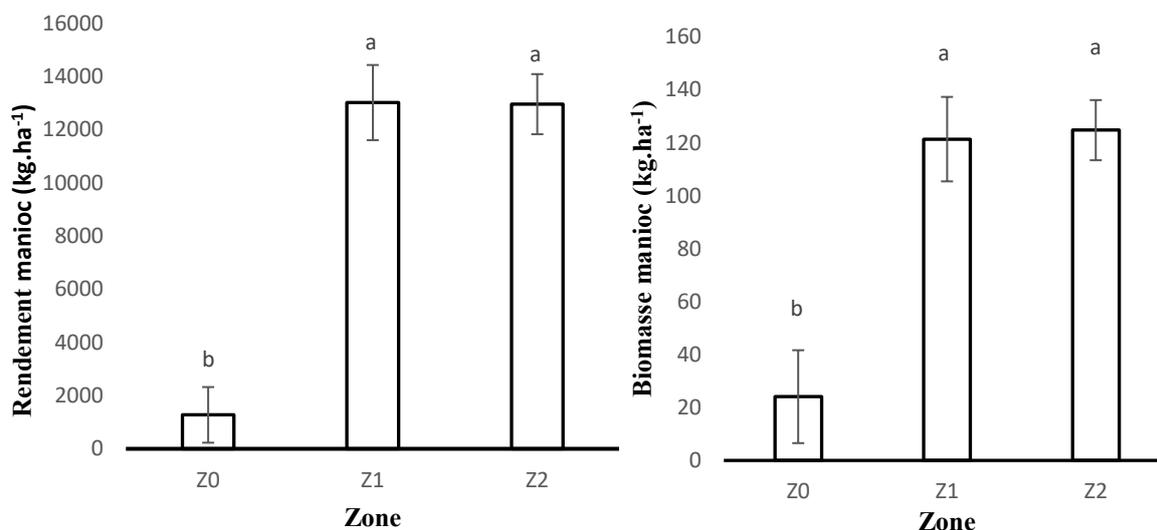


Figure 28 : Rendements et quantités de biomasse du manioc suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans le système manioc (nombre de répétition par parcelle égal à 4 pour Z0 et 8 pour Z1 et Z2).

Les moyennes suivies des mêmes lettres alphabétiques ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%. Les barres représentent des erreurs standards.

3.3.5.3. Performances de la tomate suivant la distance à l'arbre

Les rendements et les biomasses aériennes de la tomate dans chaque zone considérée sont présentés par la Figure 28. Les rendements et biomasse de tomate sont les plus faibles dans la zone Z0 au plus près des palmiers (0 kg.ha⁻¹ et 0 kg.ha⁻¹ respectivement). On note que le rendement et la biomasse de la tomate augmentent quand on s'éloigne de l'arbre. Le gain de rendement entre la zone Z2 et Z0 est de 3848 kg.ha⁻¹ correspondant à +80% de Z0. La biomasse suit une tendance similaire. Le gain de biomasse entre la zone Z2 et Z0 est de 109,27 kg.ha⁻¹ correspondant à 100%. Il n'existe pas de différence significative entre les rendements et les quantités de biomasses respectives des zones Z1 et Z2 (Annexe 4).

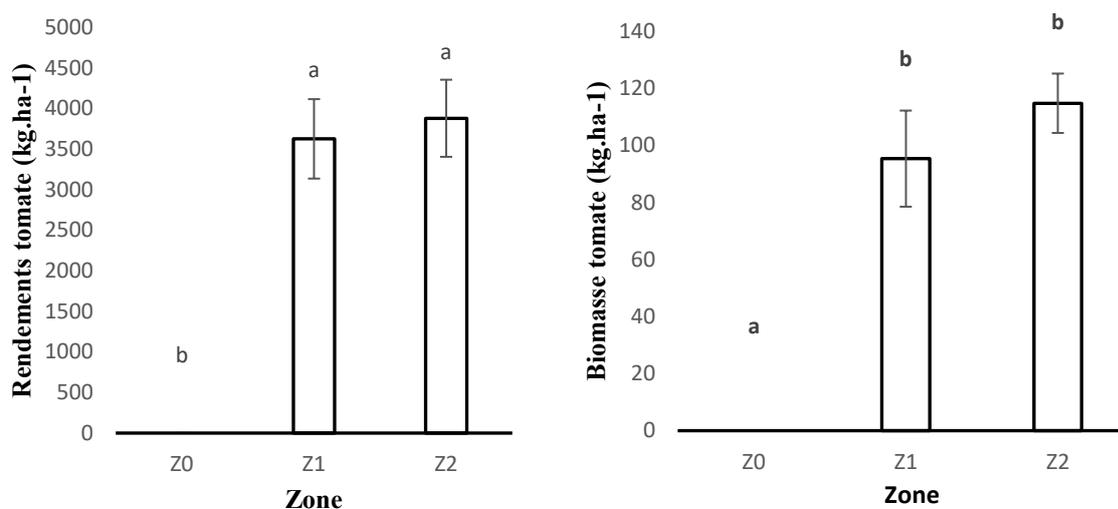


Figure 29 : Rendements et quantités de biomasse du maïs suivant les zones Z0 sous couronne de l'arbre, Z1 à 1 m de l'arbre et Z2 à 4,5 m de l'arbre dans le système tomate (nombre de répétition par parcelle égal à 4 pour Z0 et 8 pour Z1 et Z2).

Les moyennes suivies des mêmes lettres alphabétiques ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%. Les barres représentent des erreurs standards.

3.4. Discussion

3.4.1. Performances du maïs dans les systèmes maïs et ananas

Les rendements et les biomasses du maïs ne diffèrent pas suivant que le maïs se situe après des cultures d'ananas ayant reçu plus d'engrais (système ananas) ou suivant que le maïs se situe après des cultures de maïs non fertilisés (système maïs). Ce résultat peut être attribué à une bonne utilisation par l'ananas des engrais azoté et potassique apportés, tel que l'arrière-effet espéré sur le maïs non fertilisé subséquent soit moindre. Cette interprétation a été validée par les résultats d'analyse de sols et des bilans minéraux simulés à partir des exportations annuelles de l'arbre et de la culture (Koussihouédé et al., 2020b, chapitre 4). Ce résultat est contraire aux connaissances rapportées dans le cas des rotations coton- maïs où le maïs bénéficie des arrières effets de la forte fertilisation minérale apportée au coton (Sissoko et al., 2015 ; Schwartz, 2000).

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

3.4.2. Compétition pour la lumière et performances des cultures associées sous la couronne de l'arbre

Dans le système maïs, le rendement de la culture sous la couronne de l'arbre (Z0) descend à 149 kg.ha⁻¹ soit -87% du rendement obtenu en Z2 (à 4,5 m de l'arbre). Un résultat similaire est obtenu dans les placettes Z0 des systèmes manioc (-90% par rapport à Z2) et tomate (-80% par rapport à Z2). Ce rendement est plus faible que ceux en Z1 et Z2 dans tous les systèmes. Dans le système maïs, le rendement obtenu en Z0 représente -80% du rendement moyen de 1008 kg.ha⁻¹ de maïs obtenu dans la région sans apport de fertilisants d'après Saïdou et al. (2003). Dans le cas du système manioc, le rendement du manioc sous la couronne de l'arbre (Z0) se réduit à 1275 kg.ha⁻¹ ce qui représente -90% du rendement paysan de 10000 (±6) kg.ha⁻¹ rapporté par PDRT (2004). Dans le système tomate, le rendement dans cette zone (Z0) descend jusqu'à -98% du rendement paysan de 10.000 kg.ha⁻¹ minimum obtenu au sud-Bénin (Houndehin et Agnoun, 2014). Nos résultats montrent que sous la couronne du palmier, les rendements sont toujours bas. Ce résultat est probablement expliqué par le faible accès de la culture à la lumière causée par la présence de l'arbre. Cet « effet d'ombrage » du jeune palmier sur la culture associée a déjà été rapporté par Salako et al. (1995) qui montre que seulement 29% du rayonnement solaire est reçu dans les zones sous la couronne des palmiers.

3.4.3. Humidité du sol et performances du maïs et du manioc en fonction de la distance à l'arbre

Les valeurs de réserves utiles du sol trouvées sont peu variables entre parcelles puis que les parcelles étudiées sont situées sur le même type de sol. La structure de matrice de variances-covariances des résidus de type autorégressif de moyenne mobile de premier ordre le modèle de croissance conditionnelle trouvée pour le modèle de croissance conditionnelle ajustant le mieux les données d'humidité du sol dans les deux cas étudiés se justifie puisque l'humidité du sol du fait des précipitations à la date n s'additionne à l'humidité du sol à la date n-1.

3.4.2.1. Cas du système maïs

Dans ce système, l'humidité du sol augmente quand on s'éloigne de l'arbre. Durant la majeure partie du cycle, on passe d'une humidité de 8% (soit 60% de la réserve utile du sol sur les 40 premiers cm), quand on est proche de l'arbre, à une humidité de 12% (soit 90% de la RU sur les 40 premiers cm), quand on est à mi-distance entre deux arbres. Le rendement du maïs est de 804 kg.ha⁻¹ quand on est proche de l'arbre (Z1) ce qui représente -20% du rendement moyen de 1008 kg.ha⁻¹ rapporté par Saïdou et al. (2003). Cependant, le rendement de maïs est de 1222

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

kg.ha⁻¹ (soit +21% de ce rendement paysan) quand on est à la mi-distance entre deux arbres (Z2). Nos résultats suggèrent que la compétition pour l'eau est à l'origine de la baisse de rendement entre la zone proche de l'arbre (Z1) et la zone loin de l'arbre (Z2). Cette compétition pour l'eau serait particulièrement liée à l'absence de séparation racinaire entre les deux espèces sur les premiers cm de sols. Cette interprétation est cohérente avec les profils hydriques qui montrent que la baisse d'humidité du sol quand on est proche de l'arbre (Z1) est particulièrement importante dans les premiers horizons de sol (0-40 cm). Elle est cohérente aussi avec les résultats d'Erhabor et al. (2002), Nodichao (2008) sur les caractéristiques du système racinaire du jeune palmier et ceux de Kanz et al. (2008) sur le maïs.

3.4.2.2. Cas du système manioc

Dans ce système aussi, l'humidité du sol est nettement plus élevée quand on s'éloigne de l'arbre, mais moins que dans le cas du système maïs. Pendant la majeure partie du cycle, on passe d'une humidité de 7% (soit 53% de la réserve utile sur les 40 premiers cm), quand on est proche de l'arbre, à une humidité de 11 % (soit 83% de la réserve utile du sol sur les 40 premiers cm), quand on est à mi-distance entre deux arbres. De plus, on observe une faible variation d'humidité du sol en fonction de la profondeur dans la placette proche de l'arbre (Z1). Les rendements du manioc sont similaires dans les deux zones (Z1 et Z2) et proches du rendement de manioc en culture pure dans la région : 13000 kg en Z2 versus 10000 (±6) kg.ha⁻¹ en milieu paysan (PDRT, 2004). Ces résultats suggèrent que le manioc ne souffre pas de compétition pour l'eau exercée par l'arbre. La forte consommation d'eau en profondeur, sur la placette proche de l'arbre suggère que les racines de l'arbre auraient été « forcées » à descendre. C'est le phénomène de plasticité racinaire déjà rapporté par Nodichao (2008) et Nodichao et al. (2011) pour le palmier. Ce mécanisme pourrait avoir été déclenché par la compétition hydrique exercée par le manioc au niveau des horizons superficiels de sols. Une autre cause pourrait avoir été un effet allélopathique du système racinaire du manioc sur les racines de l'arbre. Cette deuxième hypothèse est cohérente avec les références de Cheng et al. (2013); Huang et al. (2010); Rizvi et al. (1999); Zhiwei et Lizhen (2013) sur les effets allélopathiques du manioc sur d'autres espèces.

3.4.2.3. Cas du système tomate

Comme dans les autres systèmes, le rendement de la tomate est nettement plus élevé quand on s'éloigne de l'arbre. Il n'y a pas de différences significatives entre les rendements en Z1 (à 1 m de l'arbre) et en Z2 (à 4,5 m de l'arbre). Le rendement maximum de tomate en Z2 de l'ordre de

Chapitre 3: Disponibilité de l'eau et performances productives des cultures annuelles dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile

4000 kg.ha⁻¹, reste inférieur au 10000 kg.ha⁻¹ minimum obtenu au sud-Bénin (Houndehin et Agnoun, 2014). Des mesures hydriques n'ont pas été réalisées dans ce système. Nos résultats suggèrent que la compétition de l'arbre pour l'eau et/ou les nutriments ont pu contribuer à affecter le rendement de la tomate dans ces zones.

3.5. Conclusion partielle

Nos résultats montrent que sous la couronne du palmier, les rendements sont toujours bas probablement à cause du faible accès de la culture à la lumière. A partir de 1 m de distance à l'arbre, les cultures associées ne sont plus sous la couronne de l'arbre. Cependant dans le cas du maïs, le rendement tout comme la disponibilité de l'eau est encore affecté par la proximité de l'arbre, suggérant la présence d'une compétition pour l'eau exercée par l'arbre sur la culture de maïs. Dans le cas du système Palmier-manioc par contre, la compétition pour l'eau si elle existe serait à l'avantage du manioc et n'aurait pas affecté le rendement du manioc.

Nos résultats suggèrent l'interprétation que l'association avec le manioc a entraîné une modification des systèmes racinaires et/ou des profils de prélèvement d'eau de l'arbre. Dans un contexte de changement climatique, ce mécanisme pourrait être à l'origine d'une plus grande stabilité de l'alimentation hydrique ou une plus grande résilience du jeune arbre dans le système manioc. Des études complémentaires sur les états hydriques des palmiers permettront d'affiner l'analyse du fonctionnement hydrique de ces systèmes agroforestiers à base de jeunes palmiers.

Avant - propos

Dans le chapitre précédent, il a été question d'évaluer des impacts des systèmes agroforestiers à base de palmier identifiés sur les performances agronomiques des cultures vivrières associées et leur relation avec l'utilisation des ressources abiotiques du milieu. Ce quatrième chapitre de la thèse est consacré à l'évaluation des impacts des systèmes agroforestiers à base de palmier identifiés sur les performances nutritionnelles et végétatifs du peuplement palmier (Hypothèses H3c). Les données ont été collectées sur le même réseau de parcelles paysannes mis en place pour la collecte des données d'états des peuplements de cultures vivrières associées. Les résultats de cette étude ont été publiés et ce chapitre reprend cette publication dans son intégralité.

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin



Koussihouèdé H., Aholoukpé H., Adjibodou J., Hinkati H., Dubos, B., Barthès B., Chapuis-Lardy L., Amadji G., Clermont-Dauphin C. 2020. Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin. *Experimental Agriculture*, 1–16. DOI: 10.1017/s0014479720000

4.1. Introduction

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is a perennial plant grown in the humid intertropical regions of the world, particularly in Southeast Asia, South America and Africa. It has the highest yield of all oleaginous crops (Suresh *et al.*, 2016). Data from the USDA (2018) show that global oil palm production was about 73 MT in 2018. Malaysia, Indonesia and Thailand are the main producing countries and supply around 88% of global production. In Africa, Nigeria and Ghana are the largest producers of oil palm. Benin is a comparatively small producer with a production of 56 KT in 2013. However, oil palm plays an important economic and social role, especially in rural areas in Benin. As in other West African countries such as Cameroon, Ivory Coast and Ghana, red crude palm oil is extracted in the Beninese farms and processed for sale. This contributes significantly to smallholders' income (Rafflegeau, 2008). Apart from the extraction of palm oil from fruits, the other parts of the plant are used in various ways to support a parallel rural economy (Fournier *et al.*, 2002).

Oil palms are cultivated in a range of farming systems from family farms of a few hectares to agro-industrial businesses with several thousands of hectares of plantations worldwide. While most of the world's palm oil is produced by these agro-industrial businesses, production by smallholders is significant. Rival and Levang (2014) reported that smallholders own about 40% of the area of oil palm plantations in the top oil palm producing countries. In Benin, the oil palm sector is dominated by smallholder plantations in the south of the country, the most suitable area for oil palm cultivation (Fournier *et al.*, 2002).

The life cycle of oil palm has two successive phases: an immature phase and a productive phase. The immature phase generally lasts three years, but could be prolonged by several months when the growth conditions during the immature period are limiting (Caliman *et al.*, 2002). At the end of this phase, the palms are composed of a short trunk (stipe) about 80 cm diameter surmounted by a crown of leaves. The trunk starts to elongate when it reaches its maximum diameter, attaining its maximum height at around ten years (Jacquemard and Baudouin, 1987).

In Benin, oil palm is often grown in intercropping systems that range from simple association with annual crop successions over the palm immature period to complex systems involving permanent intercropping with various woody and annual species in a spontaneous arrangement resembling natural ecosystems (Yemadjè *et al.*, 2014). This study focuses on the simple and temporary intercropping systems which are commonly found in the southern part of Benin. The

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

farming practices adopted by Beninese farmers on their intercropped palm plantations are diverse, with different crop successions and fertilization regimes. These practices rarely correspond to those recommended by extension services (Aholoukpé et al., 2013). Caliman *et al.* (2002) and Rafflegeau *et al.* (2010) pointed out that N and K deficiencies in immature palms may cause significant yield declines during the first years of the production phase. Caliman *et al.* (2002) showed that the growth status of oil palms during the immature phase is a good indicator of fruit yield during the cropping phase. Sparnaaij (1959) demonstrated that the number of leaves determines the number of fruit bunches as each leaf carries an inflorescence in its axil.

However, there is little information on the effects of the diverse farmers' technical managements on the soil fertility and growth of oil palms at the end of the immature phase in South Benin. Such question should be approached under real conditions in the farmers' fields as for instance in Woittiez *et al.* (2018). In fact, smallholders' systems are diverse, and multiple limiting factors may operate simultaneously. Therefore, working at a research station may introduce bias, limiting the generalization of the results to the farmers' fields.

Following Rafflegeau *et al.* (2010), a synchronic approach could be used in order to make an agronomic diagnosis and evaluate how young palm performances were impacted by the diversity of intercropping systems developed by the farmers within a region. Such diagnosis would rely on: 1) the identification and grouping of farmers' fields, to reflect the diverse technical, management and pedoclimatic factors, and 2) the measurement of a set of indicators of the agrosystem functioning. Indicators such as the mineral concentrations of a selected oil palm leaf, such as leaf 17, could be used to identify nutritional stress and assess its relationship with both the associated crop succession (Rafflegeau et al., 2010), and the fertilization practices (Caliman *et al.*, 2002; Woittiez *et al.*, 2018). Moreover, morphometric parameters of the palms such as the number of leaves, girth circumference and length of leaf 17 (L17) can be used to characterize the growth of immature oil palms and to assess the relationship between oil palm growth and farming practices (Caliman et al., 2002). A vigor index calculated from easily accessible morphometric parameters was used by *de Berchoux and Lecoustre* (1986) and Caliman *et al.* (2002). This vigor index was found to be strongly correlated with the total dry biomass of immature oil palms in several experiments conducted in Congo, Côte d'Ivoire and Benin (*de Berchoux and Lecoustre*, 1986). Other indices, such as dry matter production rate per unit area and leaf area, could also be used. However, they are less readily accessible, and

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

therefore less suited to studies carried out on large field networks than the indicators mentioned above (Corley and Tinker, 2016, p 93).

The objective of this study was to evaluate the most common oil palm-based intercropping systems used in the Allada plateau in southern Benin, in terms of nutritional status and growth of the palms at the end of their immature phase. We tested three hypotheses: 1) the nutritional status and growth of palms vary according to the intercropping system that is practiced during the immature phase of the palms, 2) the nutrient concentrations in the leaves of immature palms depend on soil nutrient availability, and 3) the palm root uptake is uniformly distributed across the upper soil layers, up to halfway between two palms.

4.2. Materials and Methods

4.2.1. Study area

The study area encompasses the administrative districts of Allada, Zè and Toffo on the Allada plateau (01°09'N, 02°15'E, 90 m of altitude) in the Atlantique department, southern Benin. As the same pedoclimatic conditions prevail within the the Allada plateau (Azontondé, 1991; Azontondé *et al.*, 2009), it is well suited for developing an approach of on-farm agronomic diagnosis of the effects of various farmers' practices on the crop performance. This area is the second largest oil palm producing region in the country. The region has a climate with two rainy seasons (April-July and September-November) and two dry seasons (December-March and July-August). The average rainfall is 1200 mm year⁻¹. The average temperature varies from 25 to 29°C and the relative humidity from 65 to 97% through the year. The dominant soils are weakly desaturated ferrallitic soils called *Terres de barre*, classified as *Rhodic Ferralsols*. The soil is formed on the sandy-clay sediments of the Continental Terminal.

4.2.2. Characteristics of the immature oil palm intercropping systems in the Allada plateau

The intercropping systems have been presented extensively by Koussihouèdé *et al* (2019). All farming operations are manual. The palm plantations are generally established following continuous staple food crops or a one-year fallow. Farmers do not till the land before planting the palms. The palms are planted in 0.6 m x 0.6 m x 0.6 m holes in staggered rows at a density of 143 to 150 ha⁻¹. The leaves are not pruned during the immature phase of the palms. No organic manure is applied. The harvest residues of the associated crops may be left on the soil. For a two-year-old plantation of oil palm, with no intercrop species, the *Centre de Recherches*

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

Agricoles sur les Plantes Pérennes (CRA-PP) recommends a yearly application of 72 kg ha⁻¹ of urea and 72 kg ha⁻¹ of KCl (33 kg N ha⁻¹ and 36 kg K ha⁻¹) on a ring 1 m from the palm (Aholoukpé et al., 2013). Considering the average palm density of 143 ha⁻¹, this corresponds to 0.5 kg urea and 0.5 kg KCl for each palm, each year. However, few farmers apply fertilizer to their oil palms each year as recommended. Moreover, they rarely apply more than two thirds of the recommended dose for one year. In general, the higher the fertilizer application for the associated crops, the lower the fertilizer application for the palms.

Four different types of oil palm intercropping systems were identified, depending on the associated crop successions (Koussihouèdé et al., 2019):

Oil palms associated with a succession of annual crops with cassava. The crop succession over the immaturity period of the palms was as follows: a) maize/maize/maize/cassava sequence or b) cowpea/maize/cowpea/cassava sequence. Maize and cowpea typically had three-month cycles. The soil was not tilled before maize or cowpea sowing, which was done in rows throughout the plot, including under the palm crowns. Urea was applied once to the maize, at a rate of 46 kg N ha⁻¹, while no fertilizers were applied to cowpea, and no pesticides were used for these crops. Corncobs were harvested with their husks and the stover was left on the plot after harvest, as well as cowpea residues, which decomposed quickly. Cassava had a 12-month cycle and was planted once or twice in the triennial succession. The field was lightly hoed before cassava plantation, which was done at a density of 15,000 plants ha⁻¹. The cassava plants extended under the oil palm crown at the end of immature period of the palms. No mineral fertilizer or pesticides were used for cassava. The chemical fertilizer specifically dedicated to the oil palms was applied in only two of the first three years and supplied about 50 kg N ha⁻¹ and 60 kg K ha⁻¹ in total over the three-year immature period. The cassava leaves were left on the soil after harvest and decomposed quickly. Cassava was mainly intended for sale in raw or processed forms such as semolina (*gari*). The oil palm/cassava system allows farmers to earn income before palm maturity, as other intercropping systems, but with little financial risk. This type of intercropping system was found mainly in the Toffo district.

Oil palm associated with a succession of annual crops dominated by pineapple. The crop succession over the three-year immature period of the palms was as follows: a) pineapple/maize/maize sequence or b) pineapple/peanut/maize sequence. With a 24-month cycle, pineapple is often planted in the first year. Maize or peanut was grown after the pineapples were harvested. The soil was hoed manually before the pineapples were planted.

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

The pineapple suckers were planted very close to the palms, from about 20 cm, at a density of about 45,000 plants ha⁻¹. Pineapple received a higher level of mineral fertilization than most of the intercropping systems found in the region: about 480 kg N ha⁻¹ and 93 kg K ha⁻¹ applied as urea and 14-23-14 NPK fertilizer in three or four applications over the crop cycle. However, the chemical fertilizer specifically dedicated to the oil palms in this system was generally applied once over the immature period and supply about 25 kg N ha⁻¹ and 30 kg K ha⁻¹ in total over the three-year immature period. Both fruit and suckers were harvested and sold. Crop residues were removed from the plot because they do not decompose readily. After pineapple harvest, the field was not tilled and no fertilizers were applied during maize and peanut cultivation. Corncobs were harvested with their husks and the stover was left on the plot after harvest, as were also peanut residues. Pineapple is the main cash crop in the region and provides farmers with a high return on investment. This type of association was found mainly in the Zè district.

Oil palm associated with a succession of annual crops dominated by maize. In this system, the crop succession over the three-year immature period of the palms was as follows: a) maize monocropping or b) maize with cowpea or peanut. Maize typically had a three-month cycle and was cropped up to six times throughout the three-year immature period. Cowpeas or peanuts were grown between two maize crops. The soil was not tilled before sowing maize, cowpea and peanut. The maize was sown in rows throughout the plot, including under the palm crowns, at a density of 50,000 plants ha⁻¹. It was weeded twice over the three-month crop cycle. 46 kg N ha⁻¹ applied as urea is applied once to the maize. The chemical fertilizer specifically dedicated to the oil palms in this system was applied in only two applications supplying 50 kg N ha⁻¹ and 60 kg K ha⁻¹ in total over the three-year immature period. The corncobs were harvested with their husks and the stover was left on the plot after harvest. During cowpea and peanut cultivation, the field was not tilled and no fertilizers were applied. The cowpea and the peanut residues were also left on the plot after their harvest. The maize system was found all over the region studied.

Oil palm associated with a succession of annual crops dominated by tomato. In this system, the crop succession over the three-year period of immature palms was a) tomato monocropping and b) tomato/tomato/tomato/maize/tomato/maize cropping sequence. Tomatoes were intercropped up to four times throughout the palm immature period. One or two maize cycles were integrated into the tomato-based system. The soil was plowed into ridges before transplanting the tomato seedlings from a nursery. Tomatoes were planted over the whole plot,

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

including under the palm crowns, at a density of 50,000 plants ha⁻¹. The tomatoes received 159 kg N ha⁻¹ and 34 kg K ha⁻¹ applied as urea and 14-23-14 NPK fertilizer in two applications. The oil palms received chemical fertilizers in only one of the first three years, at the amounts of 25 kg N ha⁻¹ and 30 kg K ha⁻¹ in total over the three-year immature period. Only the tomato fruits were harvested. The tomato residues were left on the plot. The soil was not tilled before the maize was sowed. 46 kg N ha⁻¹ of urea was applied once to the maize. The corncobs were harvested with their husks and the stover was left on the plot after harvesting. This system was mostly found in the Allada district.

4.2.3. Experimental layout

Four immature oil palm fields were selected to represent each of the four types of temporary agroforestry systems described above. This means that a total of sixteen fields were selected for this study. However, one of the maize system fields was discarded due to a sudden change in practices by the farmer, leaving fifteen fields constituting the experimental layout. Two plots of 20 palms (4 rows of 5 palms) were considered in each field for measurements and sampling (Annexe 2). Therefore, data were collected from 30 plots nested in 15 fields (Figure 18, chapter 3). All these oil palm fields had been established in 2014, and all measurements were made at the end of the three-year immature phase. As presented in Table 13, the four fields representing each type of agroforestry system were selected based on similarities in fertilizer management practices and cropping history. The data on the technical management of the fields were collected through farmers' surveys. Therefore, some uncertainties may surround the doses declared by the farmers. This research could not benefit from a comparable data set taken from a "Zero associated crops" reference plot, since this system did not exist in the farmers' fields.

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

Tableau 13: Technical management of the oil palm fields over the three-year immature period

Dominant intercrop in the succession	Number of plantations	Associated crop succession ^a	Fertilizer applied to the oil palms per year (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)			
			Year1	Year2	Year3	
Cassava (C)	4	[M / M] [M / C]	N	33	33	33
		[...]	K	36	36	36
		[M / M] [M / C]	N	33	33	33
		[...]	K	36	36	36
		[Co / M] [Co / C]	N	33	33	33
		[...]	K	36	36	36
Maize (M)	3	[M + Co / M] [M / M + Co] [M]	N	33	0	33
		[...]	K	36	0	36
		[M / M] [M / M]	N	33	33	33
		[...]	K	36	36	36
		[M / M] [M / M]	N	33	33	33
		[...]	K	36	36	36
Pineapple (P)	4	[P] [...] [M / M]	N	0	0	33
		[...]	K	0	0	36
		[M + P] [...] [M]	N	0	0	33
		[...]	K	0	0	36
		[P] [...] [M]	N	0	0	33
		[...]	K	0	0	36
Tomato (T)	4	[T / T] [T / T] [T]	N	0	33	33
		[...]	K	0	36	36
		[T / T] [T / M] [T]	N	0	0	33
		[...]	K	0	0	36
		[T / T] [T / T] [T]	N	0	33	0
		[...]	K	0	36	0
		[M / M] [T / T]	N	0	33	0
		[...]	K	0	36	0

^a Co= cowpea; [] annual succession; [...] continuation of the crop from the previous year; / double cropping; + relay cropping;

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

4.2.4. Sampling, morphometric measurements and analysis

4.2.4.1. Leaf 17 N, P, K, Mg, Ca concentrations

Leaves were sampled during the dry season in December 2017. Six palms were chosen from each of the plots. For each palm, leaf 17 was identified and leaflet samples were collected and grouped by plot. The leaflet samples were prepared following standardized procedures for oil palm leaf analysis (Ochs and Olivin, 1975). Following Ochs and Olivin (1975) and Caliman et al. (2002), leaf 17 was preferred to leaf 9 because it was available at the date of sampling. Moreover, data could easily be compared with standard values provided in the literature for leaf 17.

The samples were analyzed to determine the N, P, K, Mg, and Ca concentrations as a percentage of dry matter. The N content was determined by digestion with sulfuric acid and then distillation using the Kjeldahl method. The P content was determined by extraction with ammonium molybdate and colorimetry. The cation contents (K, Mg, and Ca) were determined by combustion, extraction with ammonium acetate and spectrophotometry. The leaves were analyzed by the Soil, Water, and Environmental Science Laboratory of the *Institut National de Recherches Agricoles du Benin* (LSSEE/INRAB). The optimum N, P, K, Mg and Ca concentration ranges for oil palms under six years old (Von Uexkull and Fairhurst, 1991) were used to interpret the results. In addition, the leaf P concentrations were compared to the critical P threshold calculated using the equation (Ollagnier and Ochs, 1981):

$$P = 0.0487 N + 0.039 \text{ (eq1)}$$

Where P and N are the concentrations in % of dry matter.

4.2.4.2. Growth indicators

The morphometric parameters were measured between November and December 2017 for the oil palms sampled for the leaf analyses. The total length of leaf 17 (L17), the number of green leaves (NGL) and the vigor index (VI) were used as growth indicators for the oil palms. The vigor index was calculated using the formula established by the *Institut National pour l'Étude Agronomique du Congo Belge* (INEAC, Yangambi) (de Berchoux and Lecoustre, 1986; Caliman et al., 2002):

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

$$VI = \frac{C^2}{4\pi} \sqrt{\frac{D^2}{4} + H^2}$$

Where C is the trunk's girth circumference (cm) which was measured at the base of the trunk under the oldest fronds' base, D is the average of two perpendicular diameters of the horizontal projection of the crown, measured at the end of the longest leaves (cm) and H is the height of the end of the highest leaf above the ground (cm). Soil sampling and analysis

Soil samples were collected using an auger in August 2017. Four soil composite samples, divided into two composite samples per plots were collected from each of the 15 fields, one month before applying fertilizer to the oil palms: two samples were taken 1 m from the trunk (usually under the crown) from the 0-10 cm and 10-30 cm soil layers, and two others at 4.5 m from the trunk (half the average distance between two oil palms) from the same depths. The soil samples were dried in the shade at room temperature and then ground and sieved to 2 mm. The samples were analyzed for pH in water (pH H₂O), total nitrogen (N), organic carbon (C), available phosphorus (P_{av}), exchangeable potassium (K_{exch}), exchangeable calcium (Ca_{exch}) and exchangeable magnesium (Mg_{exch}). The pH in water was determined with a soil:water ratio of 1:2.5. The C and N contents were determined by dry combustion using a CHN elemental analyzer (Flash EA1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy). The available P was extracted using the Olsen method and assayed by a continuous flow analyzer (AA3 AutoAnalyzer, SEAL Analytical Limited). The exchangeable bases were extracted with a neutral solution of ammonium acetate and assayed by atomic absorption spectrometry (AA220 FS, Varian, Australia). The soil samples were analyzed by the Laboratory of Analytical Resources of the Institut de la Recherche et du Développement (LAMA / IRD), Dakar (Senegal).

4.2.4.3. The soil N and K budgets related to the crop successions during the immature period of the oil palms

As N and K are by far the two major nutrients taken up by oil palms (Ng, 1977), we focused on N and K to calculate a simplified budget over the three-year immature phase of the palm. This was done by comparing N and K entering the soil through the fertilizers applied on each crop succession, with N and K exported with harvested products. The objective was to estimate the potential competition for the soils indigenous nutrient supply between the crop successions and the palms. A positive budget would indicate that the potential for competition was low, whereas a negative budget would indicate the possibility of competition. Inputs were exclusively represented by the total fertilizer applied to the annual crops over the three years.

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

Potential N inputs through symbiotic fixation in systems where legumes were grown were not taken into account. Outputs were only represented by the products exported from the plot. Crop residues returning to soil were not considered as output. For instance, for maize, only the maize grains were considered as exported as most of the stover remained on the ground and was rapidly mineralized. For pineapple and cassava, all the aboveground biomass was exported, because they did not decompose readily. For tomatoes, only the fruits were exported. The losses of nutrients through leaching or runoff were ignored. The pineapple yield was estimated from Chogou *et al.* (2017) and the maize, cassava and tomato yields were measured and averaged across the oil palm fields. The N and K uptakes by the maize were estimated from Bąk *et al.* (2016). The N and K concentration in the dry matter and uptake by the pineapple fruit and residues were estimated from Pegoraro *et al.* (2014). N and K uptakes by cassava were estimated from Howeler *et al.* (2013). N and K uptakes by tomatoes were estimated from Beaudet and Tremblay, (2006). The total N and K fertilizer left for the palms following the crop succession budget, were calculated for each intercropping system as the sum of the nutrients applied as fertilizer under the palms and the nutrients potentially left by the associated crops. When the nutrient budget of the associated crop succession was less than or equal to zero, the total nutrients left for the palm were taken to be the fertilizer applied directly to the palm. These budgets calculations were based on the simplistic assumption that the associated crops have priority for the use of the fertilizer applied specifically to them and the palms have priority for the fertilizer applied specifically to them, that is, under the palm crown.

4.2.5. Statistical analysis

A linear mixed effect model was used to analyze the fixed effects of the “cropping system” (characterized by two closely linked factors, the type of crop succession and the whole fertilizer regime of the intercropped species) and the random effects of “sites” on the nutritional and growth status of immature palms. The R software package *lmerTest* (Kuznetsova *et al.* 2017) was used to test the model. The equation of the model was:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 (\text{Cropping system}) + (\text{Site}_i) + \varepsilon_{ij}$$

where the subscripts *i* and *j* on the *Y* indicate that each observation *j* is nested within cluster (Site) *i*; β_0 is the overall intercept and ε_{ij} the residual error.

The covariance matrix structure was "unstructured" as we have used the default parameters of the package. The interclass correlation coefficient (ICC) was used to determine the between-sites variability: it was calculated as the ratio of between-sites variance to total variance, then

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

multiplied by 100 to be expressed in percentage. Using the mixed model established in the package *lmerTest*, adjusted means were computed with the "emmeans" function of the *emmeans* R package based on default parameters (Lenth, 2018). When the fixed effect was significant (p -value < 0.05), the *multcompView* R package with default parameters was used for computing the multiple comparisons of the levels of the fixed factor with the Tukey HSD method (Graves *et al.* 2015). The R *factoextra* package (Kassambara and Mundt, 2017) was used for principal component analysis (PCA) to visualize the grouping of the points (plots) within the same cropping system in order to explore the relationships between the leaf 17 N, P, K, Mg and Ca concentrations and the various cropping systems. Eigenvalues of the covariance matrix, which describe the proportion of total variance attributable to their respective principal components were used for retaining PCs. The data was normally distributed hence Pearson's correlation coefficients (r) were calculated between the N, P, K, Mg, and Ca concentrations of leaf 17 and the properties of the soils to analyze the links between the variables. Correlations were considered significant when the p -value was less than 0.05.

4.3. Results

4.3.1. The chemical properties of soils in the intercropping systems

The chemical properties in the 0-10 cm soil layer were significantly different between the systems (Table 14): pH H₂O was significantly higher in the cassava system than in the pineapple system, and intermediate in the maize and tomato systems. K_{exch} was 3 times higher in the maize system (0.28 cmol kg⁻¹) than in the cassava system (0.08 cmol kg⁻¹, p -value < 0.05), with intermediate values for the pineapple and tomato systems. C, N and Ca_{exch} , were 30 to 40% higher for the tomato than for the cassava system, and Mg_{exch} 90% was higher with intermediate values for the maize and pineapple systems. P_{av} was not significantly different between systems as the concentration was very variable for some systems (maize in particular). The C, N, P_{av} , K_{exch} , Mg_{exch} and Ca_{exch} , concentrations in the 0-10 cm soil layer were generally not significantly dependent on the distance from the trunk (Figure 29). The only significant differences between positions were for P_{av} which was lower near the palm for the tomato system and K_{exch} which was lower near the palm for the cassava system (p -value < 0.05). The same effects were observed for the 10-30 cm soil layer (data not shown).

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

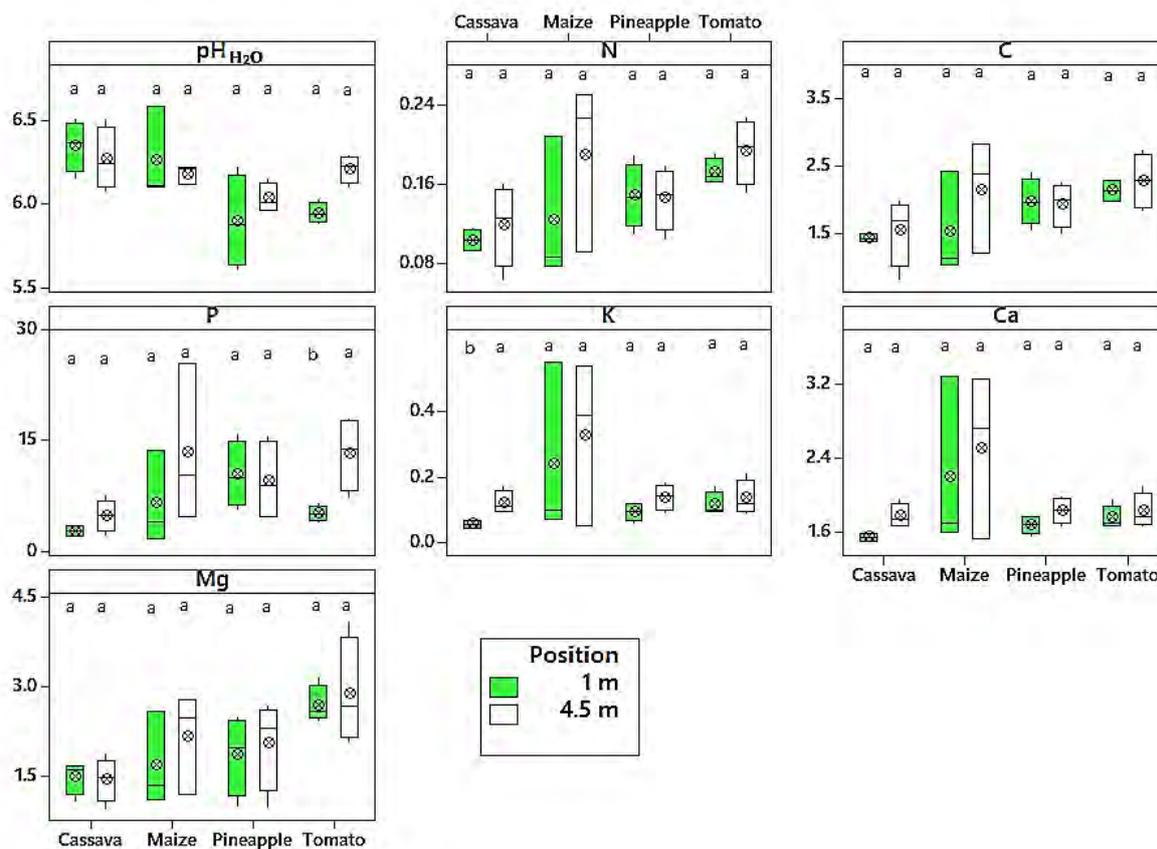


Figure 30 : Box plot of the soil chemical properties in the 0-10 cm soil layer at 1 m and 4.5 m from the palm stipe.

Markers in the boxes represented means. Values with different letters are significantly different between positions ($n = 30$, p -value < 0.05).

4.3.2. Palm leaf nutrient concentrations

The results of the linear mixed effect model analysis showed that the intercropping system had a significant effect (p -value < 0.001) on K, Ca and Mg concentrations of palm leaf 17 but not on N and P concentrations (Table 14). The ICC values were 7.2% for N, 18.4% for P, 17.1% for K, 5.8% for Mg and 3.1% for Ca, indicating that between-sites variability was highest for P and K. The average K concentration in palm leaves in the maize system was twice that in the pineapple system, with intermediate values for the other systems (Table 14). The average Mg concentrations in palm leaves in the pineapple or cassava were 50% higher than that for the maize system. The tomato system was intermediary. The average Ca concentration for the maize system was 50% higher than that for the tomato system, with intermediate values in the other systems. Figure 30 shows the N, P, K, Ca and Mg concentrations for each system and the optimum concentration ranges (Von Uexküll and Fairhurst, 1991). The average N and P concentrations were within the optimum ranges for all systems and the P concentrations were

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

higher than the critical P thresholds of 0.17% for the cassava and tomato systems and 0.16% for maize and pineapple (Eq 1). The Mg concentrations were within, or just above, the optimum range and the Ca concentrations were above the optimum range. K nutrient concentrations were the only ones to be well below the optimum ranges (Figure 30).

The first two axes of the PCA built using the nutrient concentrations in leaf 17 explained 62% of the total variance (Figure 31a and b). Axis 1 explained 39% of the variance with Mg in opposition to Ca and K. Axis 2 explained 23% of the variance with P strongly correlated with N. The PCA score plot (Figure 31b) showed that K concentrations of leaf 17 were lowest for tomato and pineapple systems and highest for cassava and maize systems. The correlation of each initial variable with the PCA axis is presented in Annexe 5. There were two outliers on axis 2: one with a very high P concentration for the cassava system and the other with very low N and P for the maize system. A PCA without these outliers allowed to increase the total variance explained by the first two axes (69% for axes 1 and 2, 42.7% for axis 1 and 26% for axis 2) but had a similar grouping on axis 1 and similar correlations between variables (not shown).

Tableau 14 : Nutrient concentrations of oil palm leaf 17 and soil properties at 0-10 cm depth and 1 m from the trunk, depending on the intercropping system (mean \pm standard errors).

System	Cassava	Maize	Pineapple	Tomato		
Leaf 17	N (%)	2.86 \pm 0.08 a	2.69 \pm 0.09 a	2.62 \pm 0.08 a	2.82 \pm 0.08 a	
	P (%)	0.22 \pm 0.05 a	0.18 \pm 0.06 a	0.29 \pm 0.05 a	0.19 \pm 0.05 a	
	K (%)	0.65 \pm 0.06 ab	0.87 \pm 0.07 a	0.41 \pm 0.06 b	0.59 \pm 0.06 ab	
	Mg (%)	0.46 \pm 0.03 a	0.30 \pm 0.03 b	0.49 \pm 0.03 a	0.39 \pm 0.03 ab	
	Ca (%)	1.09 \pm 0.06 ab	1.17 \pm 0.07 a	0.86 \pm 0.06 bc	0.77 \pm 0.06 c	<i>p-value</i>
	Soil	pH H ₂ O	6.3 \pm 0.1 a	6.2 \pm 0.2 ab	5.9 \pm 0.2 b	6.0 \pm 0.1 ab
N (g kg ⁻¹)		1.1 \pm 0.03 b	1.5 \pm 0.08 ab	1.4 \pm 0.03 ab	1.8 \pm 0.03 a	0.023 (*)
C (g kg ⁻¹)		14.8 \pm 0.34 b	18.2 \pm 0.8 ab	19.4 \pm 0.31 ab	22.0 \pm 0.3 a	0.029 (*)
P _{av} (mg kg ⁻¹)		3.70 \pm 1.8 a	9.93 \pm 8.7 a	9.87 \pm 4.7 a	9.13 \pm 5.5 a	ns
K _{exch} (cmol kg ⁻¹)		0.08 \pm 0.04 b	0.28 \pm 0.23 a	0.11 \pm 0.04 ab	0.12 \pm 0.04 ab	0.016 (*)
Mg _{exch} (cmol kg ⁻¹)		1.46 \pm 0.3 b	1.91 \pm 0.7 ab	1.95 \pm 0.6 ab	2.78 \pm 0.6 a	0.002 (***)
Ca _{exch} (cmol kg ⁻¹)		1.64 \pm 0.05 b	2.34 \pm 0.34 a	1.74 \pm 0.05 b	1.77 \pm 0.05 ab	0.016 (*)

Asterisks indicate significance levels at p -value < 0.05 (*), p -value < 0.01 (**), p -value < 0.001 (***), non-significant (ns). ICC = interclass correlation coefficient. Means within a line followed by different letters are significantly different (p -value < 0.05).

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

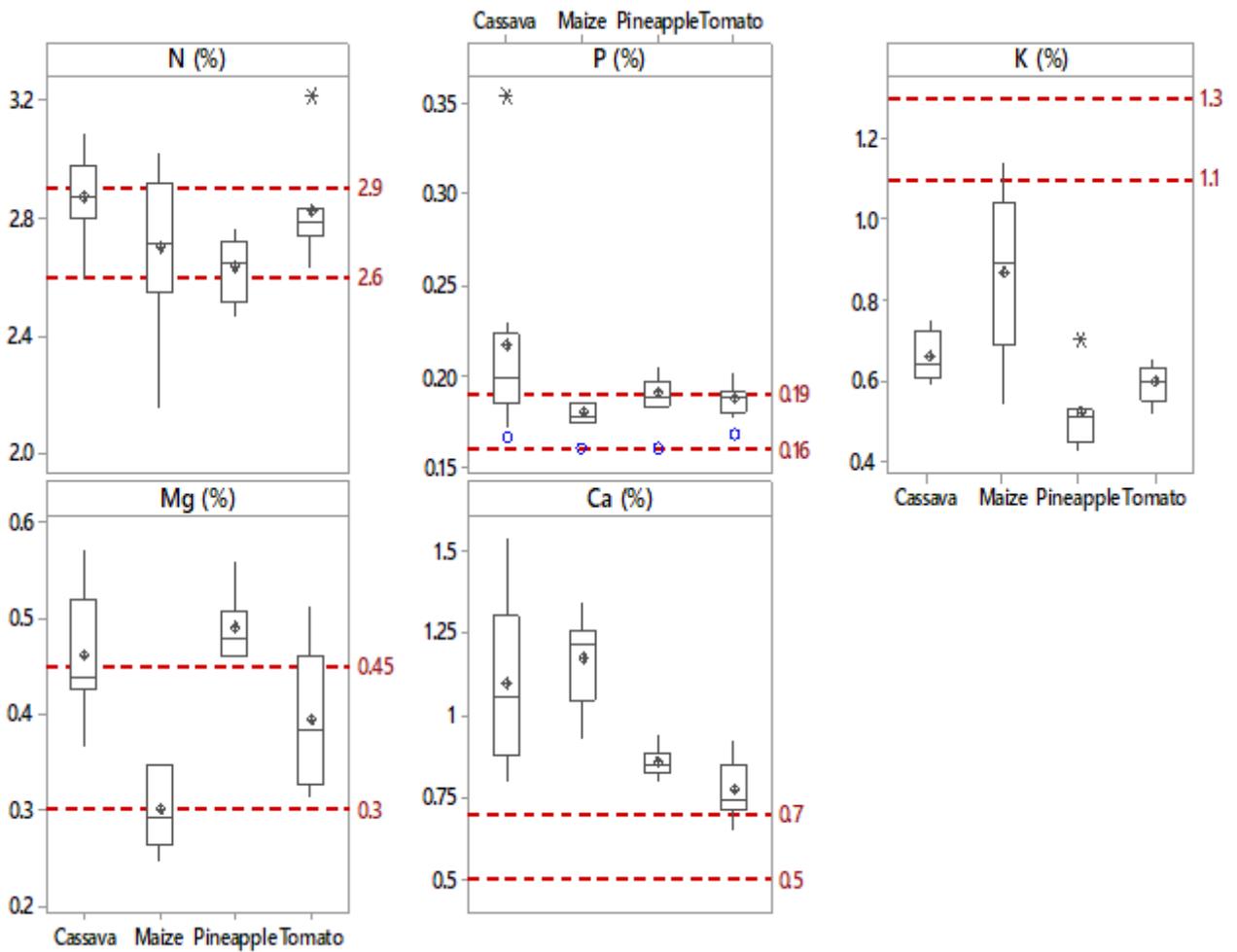


Figure 31: N, P, K, Mg and Ca concentrations in oil palm leaf 17 at field level for each intercropping system (n=30).

Red dashed lines show the optimum ranges (Uexküll et Fairhurst, 1991). Blue circles show the critical P thresholds (Eq. 1). Stars in the N, P and K graphs show outliers.

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

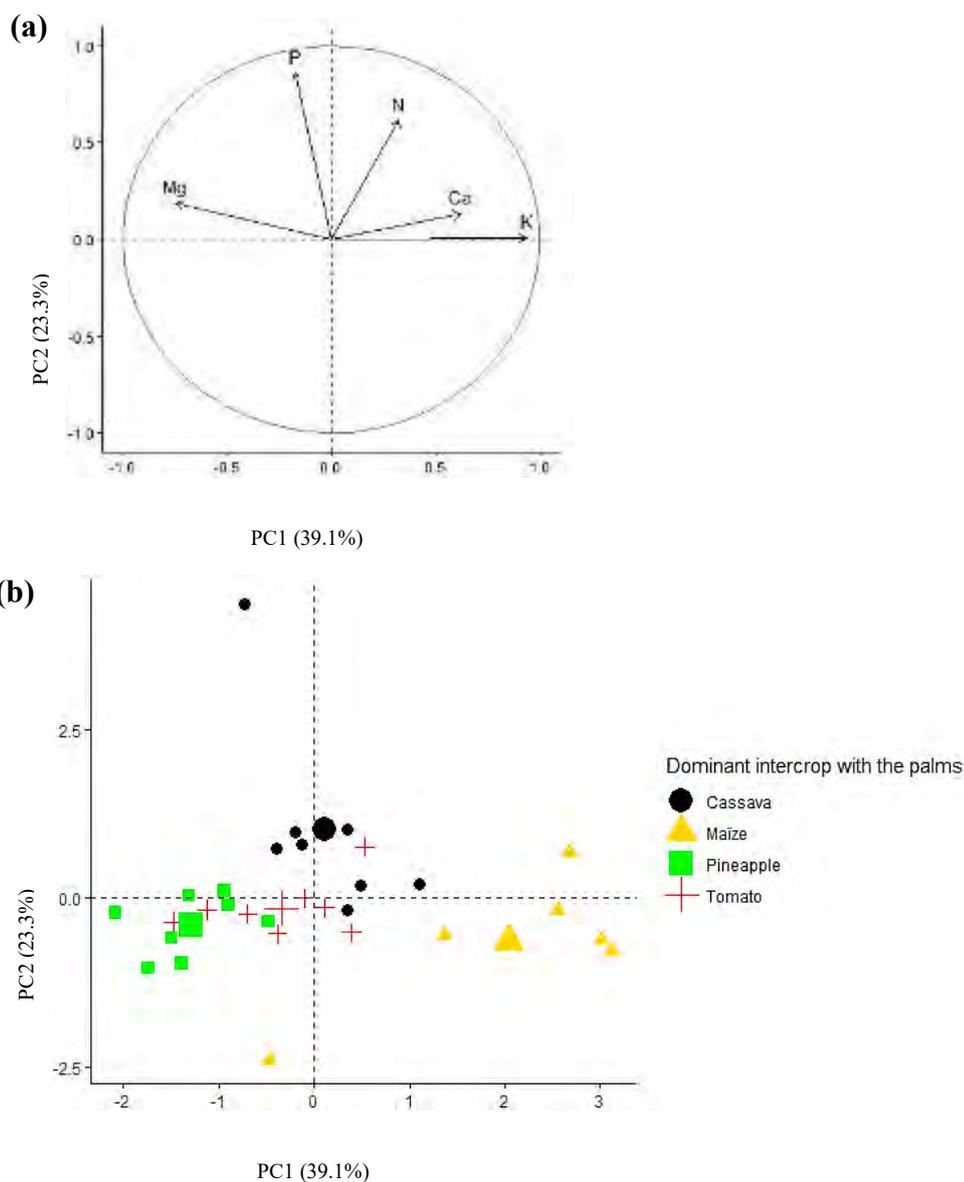


Figure 32: The PCA plots: (a) PCA loadings for the nutrient concentrations in oil palm leaf 17 (first two axes); (b) PCA scores for the nutrient concentrations in oil palm leaf 17 (first two axes) in each of the two plots per field. The larger points are the centroids for each intercropping system.

4.3.3. Differences in palm growth indicators between the cropping systems

The results of the linear mixed effect model analysis (Annexe 6) showed that NGL only depended significantly on the intercropping system (p -value < 0.05). The ICC values were 0.1% for NGL, 82.5% for VI and 85.7% for L17, indicating that between-sites variability was highest for L17. NGL was lower for the pineapple system than for the other systems (Table 15).

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

Tableau 15: Growth indicators of the tree for each agroforestry system: total number of green leaves (NGL), vigor index (VI) and length of leaf 17 (L17) (mean \pm standard errors)

Systems	NGL	VI	L17 (cm)
Cassava	37.04 \pm 1.10 a	784.54 \pm 273.03 a	271.85 \pm 32.99 a
Maize	37.47 \pm 0.51a	712.28 \pm 273.03 a	235.67 \pm 38.10 a
Pineapple	30.36 \pm 0.71b	926.32 \pm 315.27 a	267.64 \pm 38.10 a
Tomato	36.62 \pm 0.52 a	898.08 \pm 315.27 a	248.17 \pm 32.99 a

Asterisks indicate significance levels at p-value < 0.05 (). Means within a column followed by different letters are significantly different (p-value < 0.05).*

4.3.4. Relationship between leaf nutrient concentrations and soil nutrient levels

The results from the correlation analysis between the N, P_{Av}, K_{exch}, Ca_{exch} and Mg_{exch} concentrations in the 0-10 cm soil layer at 1 m from the trunk and the N, P, K, Ca and Mg concentrations in palm leaf 17 are shown in Table 16. The only significant correlation was for K ($r = 0.72$, p -value < 0.001).

Tableau 16: Correlation coefficients between soil nutrient concentrations in the 0-10 cm soil layer at 1 m from the trunk and oil palm leaf 17 nutrient concentrations

Leaf concentration	Soil concentration				
	N	P _{Av}	K _{exch}	Mg _{exch}	Ca _{exch}
N	-0.04	-0.47	-0.12	0.07	0.11
P	0.30	-0.06	-0.11	0.29	0.47
K	0.24	0.006	0.72***	0.23	0.32
Ca	0.25	0.06	0.28	0.29	0.19
Mg	0.23	0.25	-0.41	0.24	0.15

*Asterisks indicate significance levels at p-value < 0.001 (***).*

4.3.5. Simplified N and K budget in soil

The nutrient budget related to the crop succession (first line of Table 17) suggested that the soil was enriched in N with any of the crop successions management, whereas the soil was slightly depleted in K with the cassava and maize crop successions and strongly depleted in K with pineapple successions (-324 kg ha⁻¹ for three years). Only the tomato succession had a positive

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

K budget (+129 kg ha⁻¹). The total N fertilizer left for the palms (third line of Table 17) was 89 kg N ha⁻¹ for the cassava, 165 kg N ha⁻¹ for the maize, 321 kg N ha⁻¹ for the pineapple and 792 kg N ha⁻¹ for the tomato systems while the K fertilizer left for the palms was 25 kg K ha⁻¹ for the cassava, 35 kg K ha⁻¹ for the maize, -294 kg K ha⁻¹ for the pineapple and 159 kg K ha⁻¹ for the tomato systems. Therefore, in the pineapple system, not only the K fertilizer applied to the palm component was the lowest, the soil indigenous supply was also the most depleted in this nutrient through the crop successions exportations.

Tableau 17 : Estimated N and K budgets over three years for the associated crops in the intercropping systems

System	Cassava		Maize		Pineapple		Tomato	
	N	K	N	K	N	K	N	K
1- Nutrient budget of the crop succession (kg ha⁻¹)	+39	-35	+115	-25	+296	-324	+767	+129
2- Maximum fertilizer application for the palms (kg ha⁻¹)	50	60	50	60	25	30	25	30
3- Fertilizer left for the palms (kg ha⁻¹)	89	25	165	35	321	-294	792	159

The total N and K budget (row 1) is calculated as the difference between the total inputs corresponding to the fertilizer applied over three years for the crop and the total output corresponding to the harvested products. Fertilizer left for the palm (row 3) is calculated as the sum of the nutrients applied as fertilizer under the palms and the nutrients potentially left by the associated crops.

4.4. Discussion

4.4.1. Differences in palm N and P nutrition between the systems

The between-sites variability was globally low (ICC ≤ 50%). This indicated that the farmers' fields used as experimental sites represented cropping systems correctly. However, high ICC for VI (82.5%) and L17 (85.7%) suggested that some growth parameters could vary markedly among farmer's fields, presumably due to specific management practices and variability of seedling phenotype at planting. Akpo (2009) reported that poor handling of seedlings in nurseries was a major constraint in seed management system among southern Benin smallholders. This author further established that nursery management practices could affect seedling phenotype at planting.

The leaf nutrient concentrations indicated that most oil palm intercropping systems of southern Benin are equivalent and provide adequate N and P nutrition for the palms (Figure 30). This suggested that the frequent applications of urea for the associated crops were sufficient to meet their N requirements and to prevent the development of competition for N between the crops

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

and the palms. Moreover, since legumes such as *Vigna unguiculata* (cowpea) were included in the maize and cassava systems, their residues could have increased the soil nitrogen levels but we did not measure the N supplied through symbiotic fixation. The calculated N budget confirmed that the risk of N competition between the palms and the associated crops was low in all the intercropping systems studied (Table 17). Considering N fixation by the legume would certainly improve this balance, but it is likely that this would not result in higher growth. The association of satisfactory N nutrition with satisfactory P nutrition was consistent with the literature reporting a close linear relationship between N and P levels in immature palms (Caliman *et al.*, 1994).

The PCA showed two outliers where P concentration were very high for the cassava system and N and P concentrations were very low for the maize system. It is likely that such extremes resulted from contamination or analytical error. The VI and L17 indicators were not significantly different between the systems. However, NGL was significantly lower for the pineapple systems than for the other systems. The absence of a significant difference between the palm growth parameters (VI and L17) could be explained by the satisfactory levels of N available to the palms. Caliman *et al.* (2002) have shown that immature oil palm growth is mainly dependent on N nutrition. However, the oil palm growth was significantly lower in the pineapple system even though N was not limiting (Table 15).

The highest L17 mean values were about 20 cm lower than those reported by Caliman *et al.* (2002) in experimental fields. Low NGL could be explained by the fact that southern Benin is not optimal climatically for oil palm, since average rainfall is 1200 mm year⁻¹ when it may reach 3000 mm year⁻¹ in Indonesia (Woittiez *et al.*, 2018). Few values for VI are available in the literature for immature oil palms. Caliman *et al.* (2002) used VI as a variable in PCA to obtain the best explanatory variables for the yields obtained in the first two years of harvesting, but they did not report the values of VI. *de Berchoux and Lecoustre* (1986) reported very high correlations between VI and growth but did not provide the values either.

4.4.2. The effect of the pineapple crop succession on oil palm K nutrition and growth

The palm leaf K concentration was strongly dependent on the intercropping system, with much lower values in the pineapple system. The relatively low values of palm NGL in this system suggested that K was limiting for the palm growth. The competition for this nutrient exerted by the pineapple crop succession was probably the cause. In fact, both oil palms and pineapples take up large amounts of K (Malézieux and Bartholomew, 2003; Teixeira *et al.*, 2011). The

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

simplified K budget for the pineapple crop succession was strongly negative, indicating that the soils' indigenous supply was depleted by the K exportations of the crop succession. Moreover, the pineapple system had the lowest fertilizer dose specifically dedicated to the palms (Table 13, 3). Farmers in this region reduced the fertilizer applications to the oil palms to take advantage of the fertilizer applied to the associated crop: the more fertilizer the associated crop receives, the less the oil palms receive (Koussihouèdé et al., 2019). Farmers were right in their decision to integrate the crop succession management in the reasoning of the palm fertilization. However, our results suggested that their fertilizer strategy failed to satisfy both species needs and resulted in interspecific competition for K, as suggested by the low K concentration in the palm leaves and the low level of the palm growth indicator in the pineapple system. The high correlation found between soil K_{exch} and leaf K concentrations confirmed that higher amount of K taken up by the plant was related to higher availability in the soil. In Cameroon, Rafflegeau *et al.* (2010) also reported a K deficiency in mature oil palm plantations with intercrops during the immature phase, which they attributed to insufficient K fertilizer application. Woittiez *et al.* (2018) also reported that inadequate fertilization impaired palm growth and yields in mature plantations in Indonesia. Several authors have shown that the nutritional status and growth of palms during their immature phase has a strong effect on the precocity and yields in the production phase (Caliman *et al.*, 2002; Rafflegeau *et al.*, 2010). We should, therefore, expect that the oil palms in the pineapple succession will yield less during the first years of the productive phase than in the other intercropping systems.

The lower the K concentration in the palm leaf, the higher was that of Mg. This is commonly observed for many species, including oil palm (Caliman *et al.*, 1994; Corley and Tinker, 2016, p 361) and was explained by the antagonism between these cations for both their adsorption on the soil exchange complex and their absorption by roots (Corley and Tinker, 2016, p 361). Leaf Ca concentrations were high, which might be due to K-Ca antagonism, as K values were particularly low too.

4.4.3. Differences in soil fertility between the intercropping systems at the end of the immature period

The soil fertility at the end of the three-year palm immature phase was strongly dependent on the intercropping system. The soils under cassava and pineapple systems had the lowest exchangeable K concentration, while the soil under the tomato system had the highest soil N concentration. These soil analysis data were in concordance with the nutrient budget

Chapitre 4: Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin

calculations where the cassava and pineapple systems had the lowest K budget and the tomato system had the highest N budget (first line of Table 17).

Despite applying fertilizer on a 1-m diameter ring around the palms in the cassava system, the soil K concentration was the lowest near the trunk, suggesting that the interspecific competition for K was stronger near the trunk than 4.5 m away (Figure 29). According to Okpala-Jose (1995) in Nigeria, it might be possible to reduce such competition by leaving 2.3 m space between the cassava plants and immature palms, instead of only 1 m as generally practiced on the Allada plateau. Except for K in the cassava system and P in the tomato system, the soil nutrient concentrations did not depend on the distance from the trunk (Figure 29). This might mean that by the end of the immature phase of the oil palm, the distribution of oil palm roots, and their uptake of nutrients, was not limited to the 1-m diameter ring around the palm. This interpretation is consistent with the observations of Nodichao *et al.* (2011) in young Beninese plantations in *terre de barre*. The entire upper horizon of soil being uniformly exploited by the palm roots made interspecific competition possible, as highlighted for the K nutrition of the palms in intercropping with pineapple.

4.4.4. Relationship between profitability of the crop succession and growth of the immature oil palms

The pineapple intercropping system was the one in which the palm leaf K deficiencies were the most marked. It also had the lowest growth rates as indicated by NGL and VI. However, pineapple is a high-value cash crop that provides farmers with high farm incomes and returns on investment (Koussihouèdé *et al.*, 2019). The high input and profitable pineapple succession had therefore, the greatest adverse effect on immature palms. Farmers in this area need to be made aware that the fertilizer applied to the pineapple does not cover the total requirements of the intercropping system. In the tomato succession, which is also a high input and profitable succession, the K budget of the crop succession was highly positive. However, the palms' K nutrition did not fully reflect this increase (Figure 30). Taking into account that 80% of the K fertilizer left for the young oil palm in this intercropping system might come from the tomato's remaining fertilizer and / or tomato leaf residues (Table 17), it is possible that this relatively low K use efficiency for the palm nutrition might be due to leaching, and/or mismatch between the kinetic of palm demand and that of K turnover through the soil/tomato crops compartments.

4.5. Partial conclusion

The N and P nutrition of the immature oil palms was satisfactory in all the intercropping systems. The palm growth associated with crops successions dominated by maize, cassava and tomato was higher than that with the pineapple crop succession, where there was a pronounced competition for K between both species. In the intercropping systems with tomato, the palm nutrition and growth did not benefit much from the high positive budget of K related to the management of the successive tomato crops. More research is needed on K fertilizer efficiency and timing of the transfers of nutrients through the soil/palm/crop components during the palm immature period. Changes caused by the various intercropping practices on soil biological functions should be investigated in order to better adapt the fertilizer recommendations for immature palm tree in intercropping.

Avant – propos

Les quantités de biomasse constituent un indicateur important pour l'évaluation des états de peuplements palmier car elles permettent non seulement de raisonner des recommandations de fertilisation pour chaque système de culture via le calcul des efficacités des éléments apportés et bilans des nutriments dans le sol mais aussi le suivi temporel des états végétatifs de peuplements palmier. Toutefois, Il n'existe pas jusqu'à présent des équations allométriques pouvant être utilisés sur des palmiers immatures et valides dans les conditions pédoclimatiques du Sud du Bénin. Dans ce chapitre de la thèse, des équations allométriques ont été développées pour prédire la biomasse d'une feuille de palmier immature. Un échantillon de 15 palmiers a été choisi avec pertinence pour mettre en évidence les relations linéaires entre les mensurations morphométriques des feuilles de palmier immature et la biomasse totale de la feuille. Ce cinquième chapitre de la thèse relate les méthodes utilisées et les résultats obtenus. Ce chapitre est rédigé sous la forme d'un article de recherche non encore publié.

Chapitre 5 : Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature



5.1. Introduction

Le palmier à huile (*Eleais guineensis*, Jacq.), monocotylédone de la famille Arecacées, est l'oléagineux le plus productif d'huile à l'hectare (Corley et Tinker, 2016). Les performances agro-économiques de la plante ont entraîné une expansion rapide de la production élaeicole dans les régions tropicales d'Asie, d'Afrique et d'Amérique. Cependant, contrairement à la situation dans la plupart des pays producteurs où les plantations de palmier à huile sont établies autant par les grandes agro-industries que par les petits exploitants, le secteur « palmier à huile » béninois est dominé par les petits producteurs ruraux (Fournier et al., 2001). Ces plantations sont implantées dans le sud du pays, région écologiquement propice à la culture. La culture du palmier à huile y est conduite comme un système agroforestier temporaire où les trois premières années correspondant à la phase immature et non productive du palmier, sont valorisées par l'association d'une succession de cultures vivrières annuelles.

L'objectif des agriculteurs dans ce système est de bénéficier du double intérêt qui consiste à tirer un profit des productions de cultures vivrières tout en assurant l'entretien de la palmeraie. Cependant, bien que financièrement attrayant (Nchanji et al., 2016), il n'est pas assuré que ces systèmes de culture soient sans effet sur le devenir du jeune palmier. En effet, plusieurs auteurs démontrent que l'application de pratiques agricoles inappropriées à ce stade peut entraver la nutrition et la croissance des palmiers à un niveau impossible à rattraper (Caliman et al., 2002; Rafflegeau et al., 2010). Dans la mesure où les nutriments minérale et hydrique sont déterminantes pour le rendement de la plante (Corley et Tinker, 2016), la caractérisation de l'état nutritionnel du palmier au stade immature est nécessaire pour diagnostiquer assez tôt les carences et adapter les recommandations d'engrais à conseiller aux agriculteurs.

L'état nutritionnel du palmier à huile est généralement déterminé à partir d'un diagnostic foliaire (Ollagnier et Ochs, 1982; Caliman et al., 2003; Woittiez et al., 2018). La méthode consiste à comparer les teneurs en nutriments des folioles au rang 17 avec des valeurs critiques prédéfinies. Cependant, malgré sa grande pertinence pour indiquer l'état nutritionnel du palmier, l'indicateur foliaire ne permet pas de quantifier les stocks de nutriments absorbés par le palmier, alors que cette connaissance est nécessaire dans les démarches de diagnostic agronomique régional où l'on s'intéresse au bilan des nutriments dans le sol et aux efficacités des éléments apportés pour la production et leurs relations avec les systèmes de culture.

La mesure des quantités d'éléments stockés dans les différents compartiments du palmier à huile est difficile à réaliser en particulier dans des parcelles d'agriculteurs, car elle implique la

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

destruction des palmiers entiers et ensuite le transport des quantités élevées de biomasses fraîches en vue d'évaluer des biomasses sèches totales à l'hectare. Ces biomasses sont associées par la suite aux teneurs moyennes de nutriments dans le compartiment considéré.

Une alternative pour éviter la destruction, est de s'appuyer sur des modèles allométriques pour estimer la biomasse en fonction de paramètres morphométriques faciles à mesurer (Chave et al., 2014 ; Pilli et al., 2006). La biomasse sèche totale produite par la plante est répartie dans ses biomasses aériennes et souterraines. Dans le cas des palmiers, plus de 96% de la production annuelle totale de matière sèche est stockée dans la biomasse aérienne (Corley et Tinker, 2003). Les études sur la morphologie du palmier à huile immature indiquent qu'à ce stade, le palmier à huile ne possède pas de tronc (Verheye, 2010 ; Corley et Tinker, 2016). Le jeune palmier s'apparente à un bouquet de feuilles reposant sur un cœur central duquel émanent également les racines de la plante. La biomasse aérienne du jeune palmier est donc constituée du cœur central et majoritairement des feuilles. Au vue de l'importance de la biomasse foliaire dans la biomasse totale du palmier immature, sa valeur pourrait être un bon prédicteur de la biomasse aérienne de l'arbre entier. Cependant, on ne dispose pas d'équations d'estimation de la biomasse des feuilles de palmiers immatures.

Des équations allométriques d'estimation de la biomasse foliaire du palmier ont été mises au point par Corley et al. (1971) ; Breure (2003) pour des feuilles de palmiers adultes. Ces équations ont été définies en Malaisie et en Indonésie, dans les conditions agroécologiques les plus favorables pour le palmier à huile. De même, l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) applicable aux palmiers de moins de 7 ans a été définie en Indonésie. Il n'est donc pas assuré que ces équations restent valides dans le cas de palmiers immatures et dans les conditions pédoclimatiques du Bénin. Plusieurs auteurs comme Corley et Tinker (2016) ; Henry et al. (2011) ; Korom et al. (2016) ont montré que les facteurs tels que la fertilité du sol, la variation du climat, le type de matériel génétique, les conditions topographiques peuvent influencer sur la précision du modèle allométrique.

Sur le plan méthodologique, Henson et Tayeb Dolmat (2003) ont établi des équations allométriques pour prédire la biomasse de la feuille du palmier à partir de mesures prises sur le pétiole. L'étude d'Aholoukpè et al. (2013) au Bénin démontre qu'il existe une bonne relation entre la biomasse des feuilles du palmier adulte et certaines mesures sur le rachis. Ces auteurs suggèrent que l'évaluation de ces équations sur des palmiers immatures et sous d'autres

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

conditions est pertinente au vu de l'importance de la biomasse foliaire dans la biomasse totale des palmiers immatures.

Les objectifs de cette étude sont alors i) de tester les équations de Henson et Tayeb Dolmat (2003) et de Aholoukpè et al. (2013) sur des palmiers immatures ; et ii) d'établir des équations allométriques pour prédire la biomasse des feuilles de palmiers immatures applicables dans les conditions pédoclimatiques et agronomiques du sud Bénin.

5.2. Matériels et méthodes

5.2.1. Zone d'étude

L'étude a été réalisée sur le plateau d'Allada au sud du Bénin (2° à 2° 30'E; 6° 25'-7° 30' N). La région est la deuxième plus importante productrice de palmiers à huile au Bénin. Le climat y est de type soudano-guinéen avec un régime pluviométrique bimodal. La première (grande) saison des pluies s'étend de mars à juillet et présente un pic de pluie à la mi-juin. La seconde (petite) saison des pluies, s'étend de septembre à novembre et culmine en début octobre. La température moyenne journalière varie entre 25°C et 29°C. La pluviométrie moyenne interannuelle sur la région d'étude est de 1100 mm entre 1951 et 2010 (Allé, 2014). Les sols dominants sont de type ferrallitique faiblement désaturés appauvris modaux sur sédiments meubles du continental terminal communément appelés *terres de barre* (Azontondé et al., 2010). Ces sols correspondent aux *Rhodic Ferralsols* dans la classification FAO (FAO, 2006).

5.2.2. Matériel végétal et mesures

5.2.2.1. Phyllotaxie et caractéristiques de la feuille de palmier à huile

Les feuilles du palmier s'insèrent dans la couronne suivant une phyllotaxie régulière en forme de spirale dans laquelle la position de chaque feuille détermine son rang (voir Figure 2a, chapitre 1). Du centre de la couronne à sa périphérie se succèdent des feuilles néoformées non fonctionnelles (flèches) puis des feuilles fonctionnelles. La feuille de rang «1» correspond à la plus jeune feuille fonctionnelle complètement ouverte. Une feuille de palmier à huile est composée d'un pétiole dont la base s'encastre sur le cœur du palmier, d'un rachis dans le prolongement du pétiole et de folioles insérées sur le rachis. Sur la feuille de palmier, le point C marque la frontière entre le pétiole et le rachis (Figure 2b, chapitre 1).

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

5.2.2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué des feuilles de quinze (15) palmiers immatures sélectionnés dans deux palmeraies villageoises de 2 et 3 ans d'âge. La variété de palmier à huile planté dans ces palmeraies est le «*Tenera*» diffusé par le Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes (CRA-PP) de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Les palmiers sont plantés à une densité de 143 plants à l'hectare.

L'histoire de la gestion agronomique de chaque palmeraie est consignée dans le Tableau 18. Le consentement des agriculteurs a été formellement reçu avant le démarrage des activités.

Tableau 18 : Histoire de la gestion agronomique de chaque palmeraie.

Palmeraie	Nombre total de palmiers sélectionnés	Age	Végétation précédant la palmeraie	Gestion de la palmeraie sur 3 ans		
				1 an	2 ans	3 ans
1	9	2 ans	Maïs	Deux passages du maïs dans la palmeraie : pas d'apport d'engrais ni au palmier ni au maïs.	Pas de culture	
2	6	3 ans	Manioc	1 passage du maïs dans la palmeraie; pas d'apport d'engrais ni au palmier ni au maïs.	Association du manioc dans la palmeraie; pas d'apport d'engrais ni au palmier ni au manioc.	Pas de culture

5.2.2.3. Mesures

L'établissement de modèles allométriques nécessite la collecte de données morphométriques sur les feuilles à intégrer comme variables indépendantes mais aussi son abattage pour les pesées de biomasses foliaires à utiliser comme variables dépendantes. En outre, les mesures sur les folioles, rachis et pétiole sont difficiles à réaliser sur un palmier sur pied en raison de l'insertion axiale des feuilles de palmier à huile dans la couronne et requièrent la dissection de l'arbre après abattage.

Deux étapes successives ont été observées pour les mesures :

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

- Abattage et dissection des palmiers

L'abattage a été réalisé au ras du sol en évitant de mutiler les feuilles les plus basses du palmier. Chaque palmier a été disséqué pour en individualiser chaque feuille et collecter les variables ci-après : nombre de folioles, longueur totale de la feuille, longueur du pétiole et du rachis, épaisseur et largeur de la section transversale du pétiole au point C (Figure 2b, chapitre 1). Une méthode adaptée d'Aholoukpè et al. (2013) a été utilisée pour le choix des feuilles mesurées sur le palmier. Ainsi, en plus des feuilles de rang 1 à 9, toutes celles situées sur les spires 1, 2, 5 et 7 ont été observées. Au total, 258 feuilles ont été considérées pour les mesures.

- Pesée des biomasses sèches et fraîches

Chaque composante de la feuille du palmier (flèches, folioles, rachis, pétiole et cœur) a été pesée séparément pour en déterminer la masse fraîche. Le fragment central de 0,30 m du rachis a également été isolé et pesé séparément (Aholoukpè et al., 2013). Des échantillons ont été ensuite séchés à l'étuve à 65°C jusqu'au poids constant pour déterminer le taux de masse sèche et multiplier par la masse fraîche totale afin de calculer la masse sèche totale de chaque composante de la feuille. La biomasse sèche totale d'une feuille est calculée en faisant la somme des masses sèches des trois composantes de la feuille.

5.2.3. Démarche d'analyse des données

Les étapes ci-après ont été suivies pour l'analyse des données.

- a) Evolution de la biomasse de la feuille selon son rang dans la couronne.
- b) Test des équations 1 et 2 développées par Aholoukpè et al. (2013) et de l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) pour l'estimation de la biomasse d'une feuille du palmier immature.
- c) Développement d'équations allométriques d'estimation de la biomasse d'une feuille de palmier.

Cette étape prend en compte la construction et la validation des équations construites.

Les équations d'Aholoukpè et al. (2013) s'écrivent :

$$BS \text{ rachis} = 1,133 \times D \text{ rachis} \times L \text{ rachis} \text{ (Equation 1)}$$

Où BS rachis est la biomasse sèche du rachis d'une feuille ; D rachis est la densité linéaire du rachis correspondant au rapport $\frac{BS_{frag}}{L_{frag}}$ où BS frag est la biomasse sèche du fragment du rachis d'une feuille et L frag la longueur égale à 0,3 m du fragment central du rachis ; L rachis est la longueur du rachis.

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

$$\text{BS feuille} = 1,147 + 2,135 * \text{BS rachis} \text{ (Equation 2)}$$

Où BS feuille est la biomasse sèche d'une feuille en kg et BS rachis est la biomasse sèche du rachis d'une feuille en kg déterminée par l'équation 1.

L'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) pour les palmiers de moins de 7 ans s'écrit :

$$\text{BS feuille} = \beta P + \alpha$$

Où BS feuille est la biomasse sèche d'une feuille en kg ; P est égal au produit de la largeur et de l'épaisseur du pétiole mesurées au point C de la feuille ; β est égale à la valeur $0,0101t + 0,0284$ et α à la valeur $00394 t - 00076$; t correspond à l'âge de la palmeraie exprimé en année.

5.2.4. Analyses statistiques

Le logiciel Minitab 17 a été utilisé pour l'ANOVA à un facteur et l'ajustement des valeurs observées sur les valeurs estimées de biomasse des rachis et des feuilles de palmiers. Les données recueillies sur les 258 feuilles ont été considérées dans ces analyses. Le coefficient de détermination ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$), l'erreur quadratique de la moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE) ont permis d'évaluer la qualité de l'ajustement et de comparer les modèles dans chaque cas. Un seuil de significativité de 5% a été considéré dans le cadre de l'ANOVA. Les comparaisons multiples des niveaux du facteur « rang de la feuille » ont été réalisées avec la méthode Tukey HSD.

Des régressions linéaires ont été réalisées grâce au logiciel Xlstat (2019) pour le développement des modèles allométriques. L'algorithme de Kennard-Stone dans le package *prospectr* (Stevens et Ramirez-Lopez, 2013) du logiciel R (v.3.5.1.) (R core team, 2018) a été utilisé pour sélectionner l'échantillon de feuilles à prendre en compte pour la construction des modèles allométriques et celui à utiliser pour leur validation. Les modèles ont ainsi été établis sur 200 feuilles et validés sur 58 feuilles. Le coefficient de détermination ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE) ont été calculés lors de la construction des modèles et de leur validation pour évaluer la qualité de la prédiction des régressions linéaires effectuées et comparer les modèles construits.

5.3. Résultats

5.3.1. Evolution de la biomasse de la feuille du palmier immature en fonction de sa position dans la couronne

La Figure 32 montre la tendance suivie par la biomasse des feuilles en fonction de leur rang. Cette figure indique que la biomasse des feuilles du jeune palmier à huile augmente jusqu'au rang 10 puis tend à diminuer graduellement. De plus, il existe une variabilité hautement significative entre la biomasse des feuilles suivant leur rang (ddl = 20 ; valeur de F = 7,36 ; P <0,001). La biomasse de la feuille de rang 10 est significativement plus élevée que celle des autres feuilles (Figure 32).

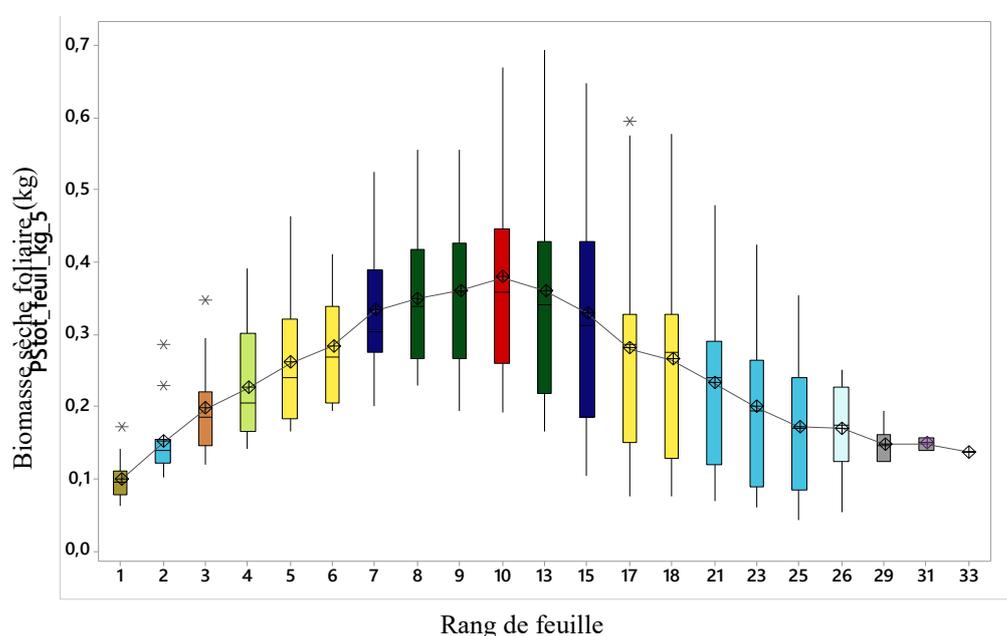


Figure 33: Variation de la biomasse sèche des feuilles du palmier immature suivant leur rang.

Les boîtes à moustaches de la même couleur ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

5.3.2. Test des équations d'Aholoukpè et al. (2013) et de Henson et Tayeb Dolmat (2003) sur des palmiers immatures

La Figure 33 présente l'ajustement des valeurs observées de biomasse du rachis et de la biomasse de la feuille en fonction de valeurs estimées respectivement par les équations 1 et 2 d'Aholoukpè et al. (2013). Les résultats ($R^2_{\text{ajusté}} = 48\%$; RMSE = 0,035 ; MAPE = 42,46) indiquent que l'équation 1 (Figure 33a) à partir de la densité linéaire et de la longueur du rachis explique bien la biomasse du rachis d'une feuille de palmier immature. Cependant, l'équation 2 donne une mauvaise estimation de la biomasse totale de la feuille par la biomasse du rachis ($R^2_{\text{ajusté}} = 39\%$; RMSE = 0,068 ; MAPE = 37,44 ; Figure 33b).

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

La Figure 33c présente l'ajustement des valeurs observées de biomasse de la feuille en fonction de valeurs estimées par l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) à partir de variables mesurées sur le pétiole. Il en ressort une mauvaise estimation de la biomasse du rachis d'une feuille de palmier immature par les variables prises sur le pétiole de la feuille ($R^2_{\text{ajusté}} = 39\%$; $RMSE = 0,074$; $MAPE = 19,37$; Figure 33c).

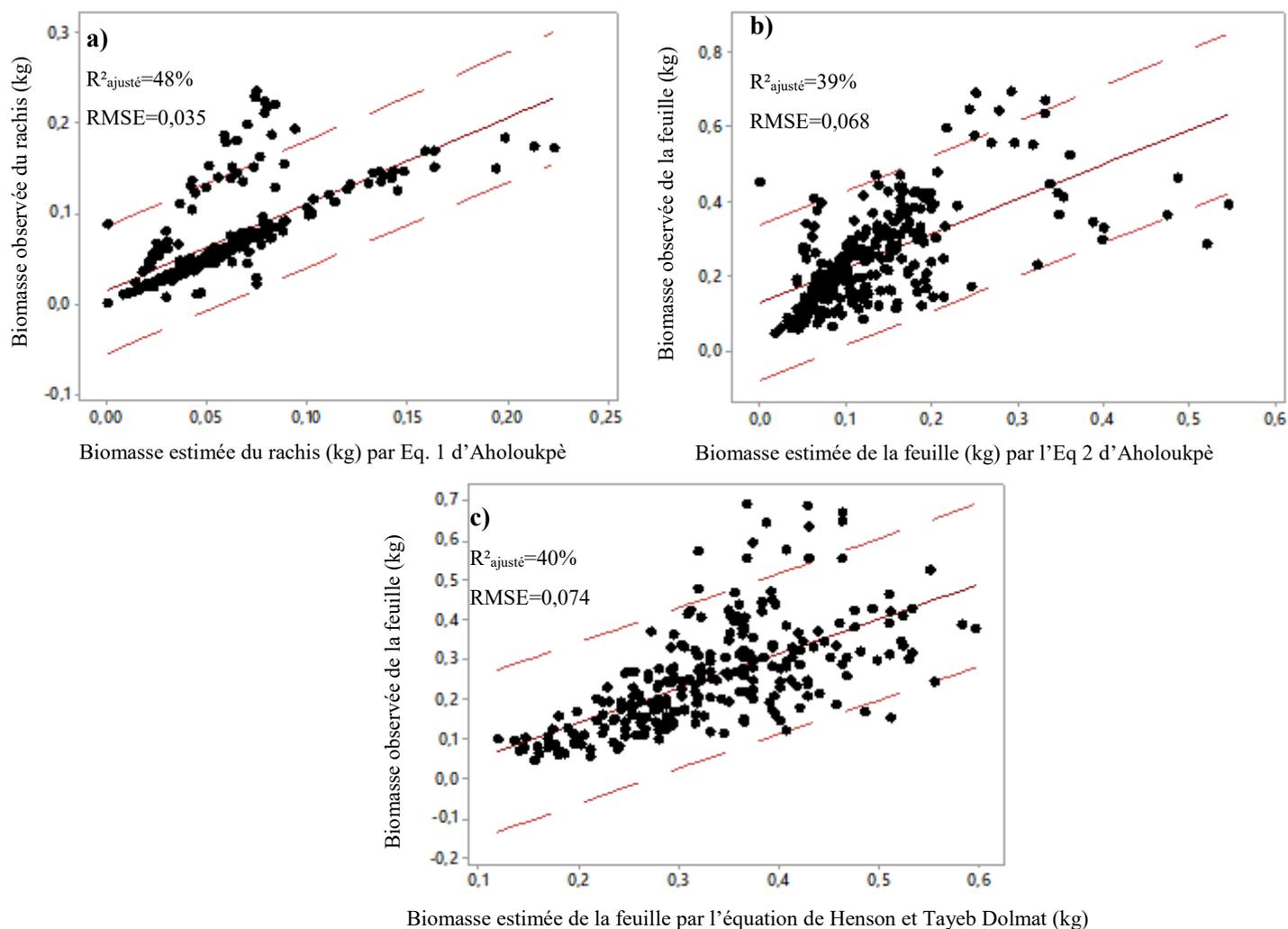


Figure 34: Graphes d'ajustement des valeurs estimées par rapport aux valeurs observées sur les feuilles. a) valeurs observées de biomasse sèche du rachis versus valeurs estimées par l'équation 1 de Aholoukpè et al. (2013) ; b) valeurs observées de biomasse sèche d'une feuille versus valeurs estimées par l'équation 2 de Aholoukpè et al. (2013) ; c) valeurs observées de biomasse sèche d'une feuille versus valeurs estimées par l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003).

La ligne rouge représente la droite d'ajustement des valeurs observées de biomasse de rachis et des feuilles aux valeurs estimées. Les lignes en tiret rouge représentent les limites de l'espace prédicteur.

5.3.3. Développement d'un modèle allométrique pour l'estimation de la biomasse d'une feuille de palmier immature

Les variables morphométriques étant toutes fortement corrélées entre elles, (Tableau 19) la construction du modèle allométrique se base sur des régressions simples entre chaque variable indépendante (mesures morphométriques de la feuille) et la variable réponse (biomasse sèche de la feuille). Le Tableau 20 présente les modèles obtenus ainsi que les paramètres permettant la comparaison de la précision de ces modèles en validation. Ces différentes relations sont significatives ($P < 0,01$). Le modèle 1 avec pour variable indépendante la longueur du pétiole présente les meilleurs résultats ($R^2_{\text{ajusté}}$; RMSE ; MAPE, Tableau 20) à la fois lors de la construction des modèles que lors de leur validation. C'est donc le modèle 1 qui prédit le mieux la biomasse de la feuille du palmier immature. Le modèle 2 établi à partir de la longueur totale de la feuille présente également une bonne relation avec la biomasse de la feuille du palmier, bien qu'il soit moins performant que le modèle 1 (Figure 34).

Tableau 19 : Matrice de la corrélation entre les variables indépendantes.

	Longueur du pétiole	Longueur du rachis	Longueur totale de la feuille	Largeur du pétiole	Epaisseur du pétiole	Nombre de folioles
Longueur du rachis	0,69					
Longueur totale de la feuille	0,83	0,97				
Largeur du pétiole	0,70	0,57	0,65			
Epaisseur du pétiole	0,65	0,70	0,74	0,78		
Nombre de folioles	0,55	0,78	0,77	0,55	0,68	
Poids sec d'une tranche du rachis	0,70	0,77	0,81	0,60	0,67	0,59

**Les corrélations en gras sont significatives au seuil de 5%.*

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

Tableau 20 : Modèles allométriques d'estimation de la biomasse sèche des feuilles et paramètres statistiques associés.

	Variables indépendantes	Equations allométriques	Calibration			Validation	
			R ² _{ajusté}	RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
Modèle 1	Longueur du pétiole (dm)	$y = 0,074x - 0,08$	64%	0,08	27,61	0,06	34,99
Modèle 2	Longueur totale de la feuille (dm)	$y = 0,019x - 0,15$	57%	0,09	29,29	0,08	42,07
Modèle 3	Longueur du rachis (dm)	$y = 0,028x - 0,12$	47%	0,102	34,56	0,102	52,23
Modèle 4	Largeur du pétiole (dm)	$y = 1,712x - 0,18$	42%	0,107	37,95	0,086	41,29
Modèle 5	Poids sec d'une tranche du rachis (kg)	$y = 26,22x + 0,043$	43%	0,106	40,48	0,089	50,45
Modèle 6	Epaisseur du pétiole (dm)	$y = 2,4399x - 0,117$	44%	0,114	0,089	0,08	39,09
Modèle 7	Nombre de folioles	$y = 0,0019x + 0,06$	33%	0,11	45,94	0,1	58,28

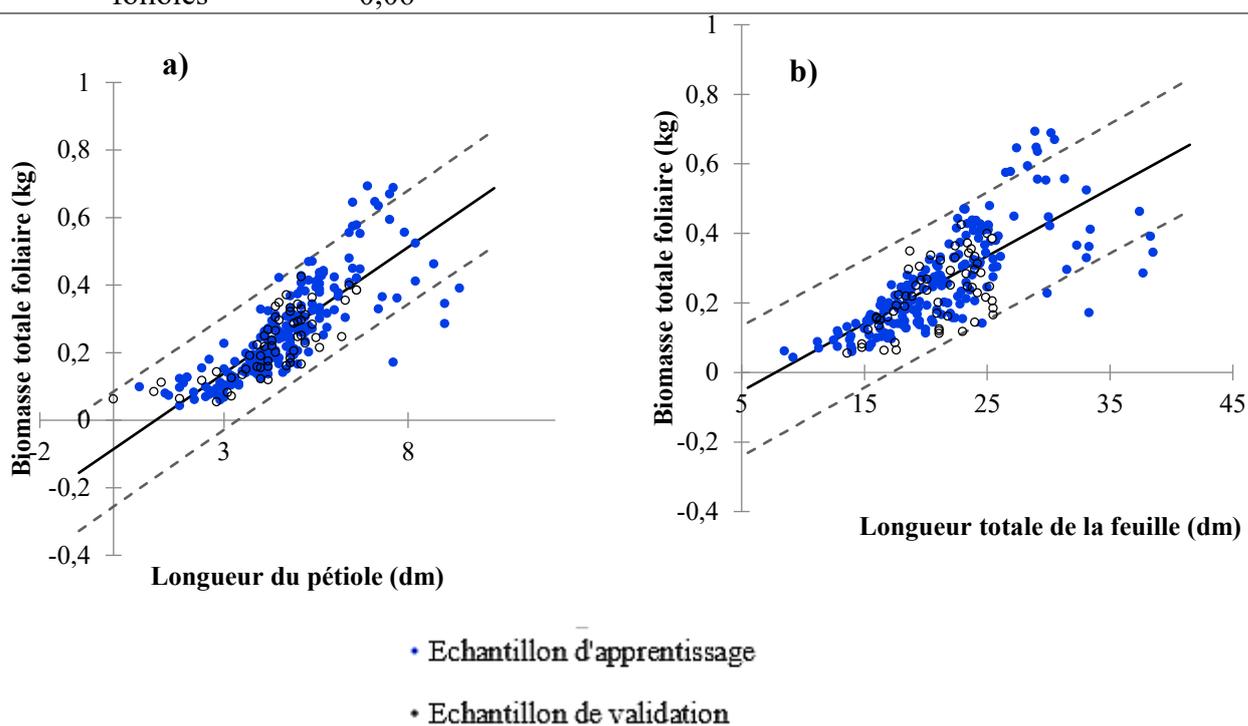


Figure 35 : Droites de régression de la biomasse des feuilles par rapport aux variables morphométriques de la feuille. a) biomasse des feuilles en fonction de la longueur du pétiole ; b) biomasse des feuilles en fonction de la longueur totale de la feuille.

Les lignes en tiret représentent les limites de l'espace prédictif.

5.4. Discussion

5.4.1. Différences entre la biomasse des feuilles du palmier immature en fonction du rang

Après son émission au centre de la couronne, la feuille du palmier immature croît jusqu'au rang 10 puis décroît graduellement. Cette tendance suggère que contrairement aux palmiers adultes où au-delà du rang 10, les feuilles de palmier à huile atteignent la maturité et leurs biomasses se stabilisent autour d'une valeur constante (Aholoukpè et al., 2013), les feuilles des jeunes palmiers atteignent leur biomasse la plus élevée au rang 10 mais commencent leur dégénérescence après le rang 10. Le processus d'allocation des assimilats carbonés pourrait être évoqué pour expliquer ce résultat: les assimilats seraient attribués aux feuilles jusqu'à ce qu'elles atteignent leur biomasse maximale au rang 10. Au-delà du rang 10, l'accumulation s'arrête et la plante mobilise ses ressources pour l'émission et l'entretien des nouvelles feuilles, ce qui déclenche la sénescence progressive de la feuille. En effet, plusieurs auteurs montrent que les réserves transitoires de carbohydrates des plantes jouent un rôle important de régulation des fluctuations du taux de production d'assimilats carbohydratés (Chapin et al., 1990; Legros et al., 2009a; Legros et al., 2009b; Silpi et al., 2007).

Les études de Henson et al. (2011) et de Legros et al. (2009a et b) rapportent dans le cas des palmiers adultes que les réserves de carbone transitoires sont majoritairement situées dans le tronc du palmier. Il est possible que dans le cas des palmiers immatures où il n'existe pas de tronc, la fonction des feuilles de rang supérieur à 10 soit réduite à une fonction de source d'assimilats notamment de carbohydrates transitoires. Ces réserves sont ensuite mobilisées par la plante pour faire face aux fluctuations du taux d'assimilation dans les périodes d'approvisionnement insuffisant.

5.4.2. Qualité de prédiction de la biomasse des feuilles de palmiers immatures par les modèles préexistants

Bien que développée dans le cas de palmiers adultes, l'équation 1 d'Aholoukpè et al. (2013) à partir de la densité linéaire et de la longueur du rachis (Figure 34a) prédit bien la biomasse du rachis des feuilles du palmier immature. *A contrario*, la biomasse de la feuille entière est peu prédite par l'équation 2 du même auteur, utilisant la biomasse du rachis calculée. La biomasse de la feuille du palmier immature est également peu prédite par l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) à partir de la coupe transversale du pétiole (Figure 33b et c). Ce résultat indique que la biomasse du rachis de palmier immature peut être estimée à partir de mesures simples : la densité linéaire et la longueur du rachis facilement mesurables sans abattre le palmier.

Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à huile immature

Cependant, l'information sur le rachis portée par ces deux variables n'est pas suffisante pour donner une bonne estimation de la biomasse de la feuille entière. La faible performance du modèle foliaire 5 (Tableau 20) utilisant le poids sec d'une tranche de 0,3 dm de rachis comme variable indépendante conforte cette conclusion.

Ces faibles performances de l'estimation de la biomasse de la feuille par les modèles préexistants pourraient être dues aux différences entre palmiers adultes et palmiers immatures dans l'accumulation de matières sèches dans les feuilles. Aussi, des facteurs comme la gestion agronomique des palmiers : palmiers issus de station de recherche dans le cas de l'étude de Aholoukpè et al. (2013) et les différences entre les écologies des régions d'étude dans le cas de l'équation de Henson et Tayeb Dolmat (2003) peuvent être évoqués comme facteurs explicatifs (Henry et al., 2011).

5.4.3. Importance de la longueur des parties de la feuille dans la prédiction de la biomasse foliaire du palmier à huile immature

Au regard des indicateurs statistiques obtenus lors de la construction et de la validation des modèles statistiques, les variables longueur du pétiole, longueur du rachis et longueur totale de la feuille prédisent mieux la biomasse des feuilles. Ainsi donc, les variables dimensionnelles suffisent à prédire la biomasse de la feuille du palmier immature. Ce résultat suggère une élongation proportionnelle de la feuille en fonction de l'accumulation de la biomasse en son sein et corrobore les résultats de *de* Berchoux et al. (1986) qui rapportent que la longueur de la feuille augmente de manière significative en fonction de l'âge des arbres jusqu'à 10-13 ans. Parmi ces variables dimensionnelles, la longueur du pétiole est celle qui prédit le mieux la biomasse des feuilles. Aholoukpè et al. (2013) ont prouvé, quant à eux, que la prise en compte des poids spécifiques des parties de la feuille améliore la précision des modèles de prédiction de la biomasse de la feuille du palmier adulte.

5.5. Conclusion partielle

L'équation 2 d'Aholoukpè et al. (2013) et celle de Henson et Tayeb Dolmat (2003) ne prédisent pas bien la biomasse d'une feuille de palmier à huile immature. Parmi les équations allométriques développées dans cette étude, la longueur du pétiole est apparue comme le paramètre le plus performant pour estimer la biomasse de la feuille du palmier ($R^2_{adj.} = 64\%$). Les relations allométriques non linéaires doivent être envisagées pour améliorer la performance des prédicteurs de la biomasse foliaire. Mieux, pour faciliter la prédiction de la biomasse totale

***Chapitre 5: Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse foliaire de palmier à
huile immature***

des palmiers immatures, il faudra envisager la construction de modèles pour l'estimation de la biomasse moyenne de l'ensemble des feuilles de rang inférieur à 10 d'une part et celle des feuilles de rang supérieur à 10 d'autre part.

Discussion générale et perspectives



1. Introduction

Dans les chapitres précédents, divers outils et méthodes agronomiques ont été utilisés pour évaluer les performances des systèmes agroforestiers du plateau d'Allada et analyser leur variabilité en fonction de la gestion technique pendant la phase immature de l'arbre.

Dans ce dernier chapitre, une première section revient sur la méthodologie adoptée, les réponses apportées aux hypothèses de départ et relève les atouts et limites des outils utilisés. Dans une deuxième section, des propositions d'amélioration de ces systèmes de culture sont formulées. Dans une dernière section, les perspectives pour les études futures sont présentées.

2. Résumé de la démarche - Atouts et limites des outils

Ce travail a combiné deux types de dispositifs :

- 1) Un dispositif d'enquête sur la diversité des pratiques de conduite des palmeraies au stade immature et sur leur rationalité socioéconomique.
- 2) Un dispositif de diagnostic agronomique régional (DAR) sur un réseau de parcelles représentatives des systèmes identifiés à la première étape.

Le premier dispositif a été développé au cours de la première année de thèse; 160 interviews d'agriculteurs et 13 enquêtes en focus groups ont été réalisées dans ce cadre. Ces enquêtes ont montré que les successions de cultures annuelles en association avec le jeune palmier pouvaient se classer en fonction de la culture qui revenait le plus fréquemment dans la succession : maïs ou manioc ou ananas ou tomate. En termes de fertilisation des cultures, le raisonnement utilisé par les agriculteurs est systémique. En effet, plus la quantité de fertilisant apportée à la culture associée est élevée, moins de fertilisant est apporté au palmier. Ces résultats confirment notre hypothèse que la gestion technique des palmeraies immatures se distingue à la fois par la succession de culture annuelle et par la fertilisation chimique apportée aux espèces associées pendant cette période (H1, Chapitre 2).

Nos résultats mettent aussi en exergue les différences régionales qui existent dans la conduite de la phase immature du palmier. En effet, si la région du plateau d'Allada peut être considérée comme homogène du point de vue pédoclimatique et les techniques culturales sont globalement les mêmes, on observe des différences importantes dans les préférences des agriculteurs notamment pour la nature des successions de cultures annuelles associées au jeune palmier, qui aboutissent à des systèmes de culture différents entre les trois « sous-régions » qui

composent la région d'étude. Ainsi, en dehors du système maïs retrouvé un peu partout, le système manioc est retrouvé principalement à Toffo, le système tomate à Allada et le système ananas à Zè.

Ces enquêtes ont aussi montré que les choix de successions de cultures étaient cohérents avec le contexte socioéconomique de l'exploitation, ce qui confirme notre hypothèse que les choix des systèmes agroforestiers varient suivant des facteurs socioéconomiques propres à l'exploitation agricole et à la région (H2, Chapitre 2). L'accès à la main d'œuvre, le réseau social, le nombre de bouches à nourrir semblent déterminants dans les choix. Les résultats d'enquêtes nous ont permis de calculer des indicateurs socioéconomiques pour chaque type de succession culturale : Coût total de production, marge brute, marge nette, retour sur investissement, ratio d'autoconsommation, durée de stockage (...). A partir des résultats de cette étape, on pouvait conclure que la prise en compte des contraintes biophysiques à la parcelle ne pouvaient pas suffire pour raisonner des conseils de gestion des palmeraies dans cette région et que les propositions techniques qui seraient intéressantes pour certains agriculteurs pourraient ne pas l'être pour tous. Sans cette étape d'enquête, on serait passé à côté de la logique propre à chaque système et on aurait peut-être été amené à faire des propositions qui ne sont pas faisables pour certains agriculteurs soit parce qu'elles augmentent la charge de travail, alors que c'est leur contrainte majeure, soit parce qu'elles vont à l'encontre de leurs objectifs primordial de sécurité alimentaire.

La deuxième étape a démarré dès la deuxième année de la thèse et s'est terminée à la fin de la troisième année correspondant à la fin de la phase immature du palmier. Toutes les palmeraies constituant le réseau avaient le même âge, (deux ans au démarrage du suivi) et le même type de sols, de sorte que les différences de fonctionnement et de performances ne pouvaient être attribuées qu'aux différences de gestions techniques. Tenant compte des connaissances existantes, nous avons choisi de comparer les différents systèmes du point de vue des statuts de nutrition minérale en priorité, en utilisant le diagnostic foliaire de la feuille 17. De plus, nous avons cherché à mettre en relation ces indicateurs de nutrition avec ceux de croissance du jeune arbre. Cette analyse a prouvé que la nutrition de l'arbre en potassium était un facteur limitant majeur et qu'il existait un gradient de nutrition potassique entre les parcelles en fonction de la nature de la culture le plus fréquemment associée. De même, l'état végétatif du palmier était significativement diminué en fonction de la nature de la culture associée. Notre hypothèse que la compétition exercée par la culture associée pour le partage des nutriments du sol limite la nutrition et la croissance du peuplement palmier est confirmée (H3d, Chapitre 4). Les effets de

ces déficiences potassiques sur la performance des palmiers ont encore plus d'écho dans un contexte de déficit hydrique à l'échelle du pays (Nouy et al., 1999). Le potassium est en effet connu pour son rôle important dans l'atténuation des stress hydriques chez le palmier (Nodichao et al., 2011 ; Nodichao, 2008). Nos résultats mettent aussi en exergue les différences entre les objectifs que les agriculteurs pensent atteindre avec leur pratique et les performances qui découlent réellement de ces pratiques sur le plan biophysique. L'exemple du système à ananas est typique de ce constat : Un fort apport de fertilisant minéral est effectué dans ce système par l'agriculteur qui perçoit cette pratique comme préservant le mieux l'état du palmier. Nos recherches ont cependant montré que c'est le système où les états nutritionnels et végétatifs du palmier sont les plus diminués.

Les comparaisons des états de fertilité chimique des sols à distances croissantes de l'arbre ont montré dans tous les systèmes que la teneur dans le sol de la plupart des nutriments ne diffère pas, ce qui réfute notre hypothèse que la fertilité des sols diminue sous l'influence croissante de l'arbre (H3c, Chapitre 4). Considérant les rendements des cultures annuelles, on a montré qu'ils étaient généralement plus faibles sous la couronne de l'arbre, probablement en raison de la compétition pour la lumière, ce qui confirme notre hypothèse que la compétition exercée par l'arbre pour l'accès à la lumière induit une diminution des rendements des cultures vivrières sous la couronne de l'arbre (H3a, Chapitre 3). En outre, il n'y avait pas que la compétition pour la lumière qui affecte le fonctionnement de la culture annuelle associée à l'arbre. Les suivis de profils hydriques du sol et les mesures de rendements de la culture à des distances croissantes de l'arbre ont prouvé que la compétition pour l'eau est aussi significative, au moins dans le cas du maïs et de la tomate. Notre hypothèse que la compétition exercée par l'arbre pour l'accès à l'eau du sol induit une diminution des rendements des cultures vivrières est donc confirmée dans le cas de ces systèmes (H3b, Chapitre 3). En ce qui concerne le manioc par contre, les profils hydriques ont suggéré un phénomène de séparation racinaire entre les deux espèces et donc un faible risque de compétition. Cette interprétation est cohérente avec le fait que le niveau de rendement du manioc est maintenu sur toute la surface non couverte par la couronne de l'arbre. Enfin, nous avons pu développer un modèle linéaire qui prédit bien la biomasse de la feuille sur la base de la longueur du pétiole, ce qui conforte notre hypothèse qu'il existe des relations linéaires entre les variables mesurées sur les feuilles des palmiers et la biomasse foliaire d'un palmier immature (H4, Chapitre 5).

La démarche de DAR développé dans ce travail a révélé ses nombreux atouts : Il est clair que cette diversité de situations d'agriculteurs et les résultats sur leur fonctionnement et leurs

performances auraient été impossibles à acquérir dans le délai de la thèse, à partir d'un essai classique en station expérimentale. Toute cette gamme de situations aurait été difficile à reproduire en station expérimentale. De plus, la démarche de DAR a apporté ici de nombreuses indications pour avancer dans la construction d'un modèle «ad-hoc» du fonctionnement de ces jeunes palmeraies villageoises associées à des cultures annuelles au sud du Bénin. Il ne s'agirait pas d'un modèle exhaustif dans sa représentation du fonctionnement de ces palmeraies, car seul les processus jugés pertinents pour l'action ou le conseil seraient représentés, mais un tel modèle qui serait particulièrement efficace pour prédire rapidement les effets des pratiques des agriculteurs sur les performances de leurs systèmes, et les modifications de pratiques à proposer pour les améliorer.

Quelques limites de l'étude tiennent en grande partie à la lourdeur de la mise en œuvre de la démarche de DAR dans nos conditions. Les plus importantes sont: 1) le fait que le suivi des parcelles sur deux ans seulement n'a pas permis de bien mettre en évidence les effets de la conduite en phase immature sur la production du palmier. A la deuxième année de suivi, les palmiers avaient seulement trois ans d'âge et ne devaient entrer en production que l'année suivante. Seuls des indicateurs de croissance ont pu être collectés en faisant l'hypothèse qu'ils expriment les effets cumulatifs de la conduite et qu'ils sont corrélés avec la production de régimes au cours des premières années après l'entrée en production ; 2) Les suivis hydriques n'ont pas pu être effectués dans toutes les situations et certains effets potentiels de l'association ont été complètement négligés comme ceux relatifs à la régulation des bioagresseurs dans le cadre du système agroforestier ; 3) On n'a pas pu bénéficier de la comparaison de nos résultats sur la croissance de l'arbre avec des résultats similaires en situation de culture pure. De même, l'intégration de résultats d'analyse de sols sous une forêt comparable à celle qui a précédé la mise en culture de palmier aurait pu permettre de conforter encore plus la question des effets de ces systèmes de culture sur la production de l'arbre et sur le maintien de la fertilité des sols.

3. Propositions pour l'amélioration des performances des systèmes de culture étudiés

Nos résultats ont montré que la nutrition potassique était le facteur limitant majeur de la croissance du jeune palmier associé aux cultures annuelles au Bénin. Le déficit de nutrition est le plus important dans les associations avec les cultures d'ananas alors que ce sont ces cultures qui reçoivent le plus d'engrais potassique. La comparaison des entrées de K par les engrais et les résidus de culture et les sorties par les récoltes montrent que si les agriculteurs ont raison de

considérer que la fertilisation minérale doit être raisonnée en fonction de l'association, ils se trompent sur la dose qui serait nécessaire dans ce contexte. En l'occurrence, la dose apportée sur l'ananas ne couvre que les besoins en K de l'ananas qui sont très importants et ne permet pas de satisfaire en même temps celle de l'arbre. Or les agriculteurs font complètement l'impasse sur la fertilisation généralement effectuée au pied de l'arbre. En vue d'améliorer la production de l'arbre dans l'association, nos conseils sont les suivants :

- une augmentation de la dose de Kcl pour les agriculteurs qui en ont les moyens ;
- un apport d'engrais organique qui peut se traduire par la restitution dans les ronds des jeunes palmiers des feuilles d'élagage des vieilles palmeraies et les résidus de récolte et de transformation d'ananas riches en K pour les agriculteurs moins nantis. Ces sources de matière organique sont disponibles dans la région ;
- améliorer la biodisponibilité du K dans ces systèmes en introduisant dans les rotations des plantes fertilisantes connues pour avoir une bonne efficacité de prélèvement du K. Ces plantes seront restituées au sol pour recycler le K qu'elles auraient accumulé dans leur biomasse.

Aussi, nos résultats ont montré que les rendements des cultures associées étaient faibles dans la zone sous couronne de l'arbre, conséquence de la compétition pour la lumière exercée par l'arbre. Il doit donc être dit aux agriculteurs de ne pas installer de culture dans la zone sous couronne du palmier.

4. Perspectives

Notre travail sur les systèmes agroforestiers à base de palmier apporte de nombreux éléments de compréhension sur leur fonctionnement, leurs performances et leur dynamique. Ces travaux soulèvent cependant un certain nombre de questions de recherche et d'amélioration méthodologique :

- i) Le diagnostic foliaire utilisé dans ce travail a permis de mettre en évidence le caractère limitant de la nutrition potassique du palmier. Cependant, le diagnostic foliaire ne renseigne pas sur l'efficacité des éléments apportés vis-à-vis de la nutrition potassique, ni sur le bilan de K. L'efficacité de K est le ratio entre la quantité totale de K absorbée par les cultures et la quantité de K apportée. Ce ratio permet de dire si on pouvait ou non faire mieux en terme de nutrition potassique au regard des quantités apportées. Le bilan de K est la différence entre les entrées dans le sol (par les engrais, la matière organique, la désagrégation de la roche-mère) et les sorties par le prélèvement total des cultures, la

lixiviation des nutriments du sol (...). Ce calcul de bilan permet de dire comment l'engrais apporté s'est réparti entre différents postes et quels impacts environnementaux il pourrait avoir. L'évaluation des minéralomasses dans nos palmeraies villageoises sont un terme important pour ces estimations d'efficience et de bilan de K. Les équations allométriques développées dans cette thèse (Chapitre 5) pour prédire la biomasse foliaire du jeune palmier constituent un point de départ pour ces estimations dans les travaux futurs.

- ii) En raison de difficultés opérationnelles, les relations hydriques entre les espèces associées ont été approchées essentiellement à partir des résultats de profils hydriques du sol proches et loin des arbres. De mesures complémentaires de potentiel hydrique foliaire des plantes pourraient permettre de conforter le diagnostic hydrique dans les travaux futurs. Une telle démarche a été mobilisée dans des systèmes agroforestiers similaires (Clermont-Dauphin et al., 2018; Pellegrino et al., 2005).
- iii) Seuls les rendements des produits récoltés des cultures associées ont été évalués dans notre étude. Le recyclage des éléments nutritifs laissés par les résidus de récolte a été pris en compte dans les bilans nutritionnels à l'échelle des systèmes (Chapitre 4). Cependant, les valeurs de quantités de nutriments restitués aux sols utilisées dans ces bilans ont été tirés de la bibliographie et pourraient être peu représentatives des valeurs qu'on peut obtenir dans nos situations. Dans les travaux futurs, l'estimation des minéralomasses restituées au sol pourrait contribuer à l'évaluation de la durabilité environnementale des systèmes notamment vis-à-vis de leur potentiel de stockage du carbone dans les sols.

Conclusion générale



Cette étude porte sur les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile en milieu rural sur le plateau d'Allada au Sud du Bénin. Elle apporte des réponses à des questions sur les modèles techniques, les motivations socioéconomiques des agriculteurs dans le choix de leur système mais aussi sur les performances agronomiques de ces systèmes. Le dispositif d'enquêtes mise en place a donné la possibilité, de constituer des groupes de palmeraies immatures caractérisées par différents modes de gestion (systèmes) de la phase immature de l'arbre. L'étude a ainsi permis d'identifier quatre principaux types de systèmes à base de palmier. Ce sont : les systèmes palmier- manioc, palmier-ananas, palmier –tomate et palmier- maïs.

Chaque système repose sur diverses motivations répondant à des objectifs bien spécifiques à l'exploitation. En termes de motivations explicitées par les agriculteurs, l'étude montre que les agriculteurs qui choisissent d'associer le maïs au palmier privilégient la satisfaction des besoins alimentaires du ménage. Ceux qui choisissent d'associer principalement le manioc ont pour objectif principal de gagner un revenu sans encourir trop de risque financier. Ceux qui associent la tomate et l'ananas ont pour objectif principal de gagner le plus de revenu possible de leur terrain. Ces résultats prouvent que sur le plateau d'Allada, la conduite d'une palmeraie immature est adaptée en fonction du projet de l'exploitant qui n'est pas toujours d'ordre économique en priorité. Ainsi, une proposition d'amélioration de ces systèmes qui pourrait être intéressante pour un type d'agriculteur pourrait ne pas l'être pour un autre type d'agriculteurs soit parce qu'elle augmente la charge de travail, alors que c'est la contrainte majeure de certains, soit parce qu'elles vont à l'encontre de leurs objectifs primordial de sécurité alimentaire.

En termes de déterminants sociodémographiques, nos résultats montrent que les ressources financières pour l'embauche de main-d'œuvre, la taille du ménage et l'inclusion dans les organisations paysannes sont les facteurs importants dans la décision de choix des systèmes agroforestiers à palmier à huile par les agriculteurs. Le système maïs est plus choisi par les agriculteurs ayant un faible accès à la main-d'œuvre et un grand nombre de bouche à nourrir. Le système manioc est adopté par les agriculteurs qui ont un accès facile à la main-d'œuvre mais qui ne sont pas affiliés à une organisation paysanne (coopérative, groupement) ou par ceux qui ont un faible accès à la main-d'œuvre mais moins de bouche à nourrir. Le système ananas est adopté par les agriculteurs qui ont un accès facile à la main-d'œuvre et sont membre d'une organisation paysanne. Le système tomate est souvent adopté par les agriculteurs affiliés à une organisation paysanne. Ainsi, les agriculteurs choisissent les cultures à associer en fonction de leurs moyens et conditions sociales. Parmi ces moyens, l'accès à la main-d'œuvre est crucial et

constitue le facteur le plus important à prendre en compte par les chercheurs et politiques pour établir les spécifications technologiques.

Sur le plan biophysique, nos hypothèses de départ sont que la compétition pour les ressources du sol est le principal type d'interaction entre les espèces associées dans ces systèmes et que les effets de cette compétition limitent les états et performances à la fois des palmiers et des cultures associées. Ces hypothèses ont été testées sur la base d'un diagnostic agronomique sur un réseau de parcelles. Nos résultats de recherche confirment ces hypothèses. Cependant, les effets de cette compétition pour les ressources se manifestent différemment en fonction des systèmes de culture et des ressources considérées. Un état nutritionnel du peuplement palmier satisfaisant en N mais déficient en K est relevé dans toutes les quatre situations étudiées. L'intensité de cette déficience varie cependant en fonction des systèmes. Les bilans minéraux simulés à partir des exportations annuelles de l'arbre et de la culture réalisés à l'échelle des systèmes ont permis de confirmer cette tendance sauf dans le cas de la tomate : tous les systèmes de culture montrent un bilan positif de recyclage du N mais un bilan négatif pour le K. Le bilan était fortement négatif dans le cas du système ananas. De même, l'état végétatif du palmier dans le système ananas est significativement diminué par rapport aux palmiers dans les autres systèmes. Le partage de l'eau du sol entre peuplements est influencé par la nature de la culture associée. Les profils hydriques du sol à 1 m et à 4,5 m de l'arbre reliés aux rendements des cultures associées dans ces mêmes zones montrent des dynamiques différentes suivant qu'on considère l'association au manioc ou au maïs. Alors que le maïs souffrirait d'une compétition pour l'eau exercée par l'arbre, ce ne serait pas le cas pour le manioc. Dans tous les systèmes, la teneur de la plupart des nutriments ne diffère pas à distance de l'arbre. Enfin, des équations allométriques ont été développées dans cette thèse pour prédire la biomasse foliaire du jeune palmier. Ces outils méthodologiques sont nécessaires pour des estimations de minéralomasses de jeune palmier dans les travaux futurs. L'ensemble des résultats et des connaissances produites dans ce travail permettent de formuler des propositions pour l'amélioration de la durabilité des palmeraies villageoises.

Labor omnia vincit improbus.

Références bibliographiques



- Actualitix. (2019). *Atlas de statistique sur les pays*. <https://fr.actualitix.com/pays/wld/huile-de-palme-pays-producteurs.php>
- Adesina, A. A., & Chianu, J. (2002). Determinants of farmers' adoption and adaptation of alley farming technology in Nigeria. *Agroforestry Systems*, 55(2), 99-112. <https://doi.org/10.1023/A:1020556132073>
- Adesina, A. A., Mbila, D., Nkamleu, G. B., & Endamana, D. (2000). Econometric analysis of the determinants of adoption of alley farming by farmers in the forest zone of southwest Cameroon. *Agriculture, ecosystems & environment*, 80(3), 255–265.
- Adjadi, E. (2008). *Le développement du palmier à huile sélectionné au Bénin*. (p. 9) [Rapport d'étude].
- Adjè, A. (2004). *Contribution à l'analyse du micro-climat, de la fertilité des sols et de la productivité des systèmes de culture à base du palmier à huile (Elaeis guineensis Jacq) au Sud-Bénin : Cas des sites expérimentaux de Pobè et d'Obèkè-Ouèrè*. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Université de Cocody, Abidjan, 152p.
- Adjè, I. A., & Adjadi, E. (2001). Production and distribution of selected palm oil seedlings among smallholders : The experience of the Republic of Benin. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 8(5), 529–533.
- Aholoukpè, H. (2013). *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*. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro, 240p
- Aholoukpè, H., Coffi, A., Nodichao, L., Domonhede, H., & Kakpo, F. (2014). *Conduite d'une plantation de palmier à huile au Bénin* (ISBN : 978-99919-0-273-9). INRAB/CRAPP.
- Aholoukpè, H., Vissoh, V. P., Amadji, G., Deleporte, P., Dubos, B., Nodichao, L., Kakai, R. G., Chotte, J. L., & Blavet, D. (2013a). Typologie des plantations villageoises de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) dans le département du Plateau au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 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.
- Akpo, E. (2013). *Analysing seed systems performance : The case of oil palm in Benin*. Wageningen UR.
- Allé, C. S. U. Y. (2014). *Analyse de la gestion des changements climatiques par les producteurs de maïs sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin*. Université d'Abomey-Calavi (UAC), Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications ' (CIPMA - Chaire UNESCO).
- Altieri, M. A. (2002). Agroecology : The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems & environment*, 93(1-3), 1-24.
- Asrat, S., Yesuf, M., Carlsson, F., & Wale, E. (2010). Farmers' preferences for crop variety traits : Lessons for on-farm conservation and technology adoption. *Ecological Economics*, 69(12), 2394-2401. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.07.006>

- Assogbadjo, A. E., Glèlè Kakaï, R., Edon, S., Kyndt, T., & Sinsin, B. (2011). Natural variation in fruit characteristics, seed germination and seedling growth of *Adansonia digitata* L. in Benin. *New Forests*, 41(1), 113-125. <https://doi.org/10.1007/s11056-010-9214-z>
- Azontondé, A., 2000 : *Dynamique de la matière organique et de l'azote dans le système de Mucuna-maïs sur un sol ferrallitique (terres de barre) au Sud- Bénin*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. IRD/INRAB, 241 p.
- Azontondé, H. A., Igue, M., & Dagbénonbakin, G. (2010). *Carte de fertilité des sols du Bénin par zone agroécologique*. Afrique-étude/INRAB.
- 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. *IAHS Publ.* 199 : 253-256.
- Bąk, K., Gaj, R., & Budka, A. (2016). Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in mature maize under variable rates of mineral fertilization. *Fragmentary Agronomy*, 33(1), 7–19.
- Bakoumé C., Jannot C., Rafflegeau S., Ndigui B., Weise S. (2002) Revue du secteur rural : Études complémentaires sur la relance des filières hévéa et palmier à huile, Rapport Palmier, CIRAD, Montpellier, France. <https://agritrop.cirad.fr/523598/>
- Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S., Kalinganire, A., Coe, R., & Van Noordwijk, M. (2015). Advances in knowledge of processes in soil–tree–crop interactions in parkland systems in the West African Sahel : A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 205, 25-35.
- Beaudet, P., & Tremblay, N. (2006). *Bilan des éléments nutritifs de quelques cultures maraîchères*. Agriculture et agroalimentaire, canada. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Rapport_final_Projet_prelevements_Beaudet_Tremblay_2006.pdf
- Berthaud, A. (1993). Les mesures de croissance sur jeune palmier à huile. *Oléagineux*, 48(10), 429–436.
- Beukema, H., Danielsen, F., Vincent, G., Hardiwinoto, S., & Van Andel, J. (2007). Plant and bird diversity in rubber agroforests in the lowlands of Sumatra, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 70(3), 217-242.
- de Berchoux, C., & Lecoustre, R. (1986). *Croissance et développement du palmier à huile. Chapitre II. De la germination à l'entrée en récolte*. Institut de Recherche pour les Huiles et Oléagineux. 150 p.
- Bhagwat, S. A., Willis, K. J., Birks, H. J. B., & Whittaker, R. J. (2008). Agroforestry : A refuge for tropical biodiversity? *Trends in ecology & evolution*, 23(5), 261-267.
- Borland, A. M., Hartwell, J., Weston, D. J., Schlauch, K. A., Tschaplinski, T. J., Tuskan, G. A., Yang, X., & Cushman, J. C. (2014). Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. *Trends in Plant Science*, 19(5), 327–338.
- Braconnier, S., Chipungahelo, G., Margate, R., & Kleih, U. (1998). Les cultures associées avec le cocotier : Modèle de fonctionnement et d'analyse économique. *Plantations, recherche, développement*, 246-260.

- Brouwers, J.H.A.M. (1993). Rural people's response to soil fertility decline. The Adja Case (Benin). PhD Dissertation. Wageningen Agricultural University.
- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ (1984) Classification and regression trees. Wadsworth, California.
- Breure, K. (2003). The search for yield in oil palm: Basic principles. In "Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields" (T. Fairhurst and R. Hardter, Eds.), pp. 59–98. Potash & Phosphate Institute/Potash Institute of Canada and International Potash Institute, Singapore.
- Broschat, T. K. (2009). Palm nutrition and fertilization. *HortTechnology*, 19(4), 690–694.
- Bruinsma, J. (2009). The resource outlook to 2050 : By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050. *Expert meeting on how to feed the world in, 2050*, 24-26.
- Bucagu, C., Vanlauwe, B., Van Wijk, M. T., & Giller, K. E. (2013). Assessing farmers' interest in agroforestry in two contrasting agro-ecological zones of Rwanda. *Agroforestry systems*, 87(1), 141–158.
- Bullock, R., Mithöfer, D., & Vihemäki, H. (2014). Sustainable agricultural intensification : The role of cardamom agroforestry in the East Usambaras, Tanzania. *International journal of agricultural sustainability*, 12(2), 109–129.
- Caliman, J.-P., Daniel, C., & Tailliez, B. (1994). La nutrition minérale du palmier à huile. *Plantations, recherche, développement*, 1(3), 36–54.
- Caliman, J.-P., Widodo, R. H., Suyanto, S., & Tailliez, B. (2002). *Importance of palm growth during immaturity and impact on yield at an early stage*. 392–406.
- Carrère, R. (2010). Oil palm in Africa : Past, present and future scenarios. *WRM series on tree plantations*, 15, 111.
- Carter, C., Finley, W., Fry, J., Jackson, D., & Willis, L. (2007). Palm oil markets and future supply. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 307–314.
- Chapin III, F. S., Schulze, E., & Mooney, H. A. (1990). The ecology and economics of storage in plants. *Annual review of ecology and systematics*, 21(1), 423-447.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., & Goodman, R. C. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Cheng, H., Shen, Y., Huang, Q., Li, X., Liu, L., & Fan, Z. (2013). Allelopathic effect of cassava on companion weeds. *Weed Science*, 31(2), 31-33.
- Chesson, P. (2000). Mechanisms of maintenance of species diversity. *Annual review of Ecology and Systematics*, 31(1), 343-366.
- Chikowo, R., Zingore, S., Snapp, S., & Johnston, A. (2014). Farm typologies, soil fertility variability and nutrient management in smallholder farming in Sub-Saharan Africa. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 100(1), 1–18.

- Chogou, S. K., Gandonou, E., & Fiogbe, N. (2017). Mesure de l'efficacité technique des petits producteurs d'ananas au Bénin. *Cahiers Agricultures*, 26(2), 25004. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017008>
- Clermont-Dauphin, C., Dissataporn, C., Suvannang, N., Pongwichian, P., Maeght, J., Hammecker, C., & Jourdan, C. (2018). Intercrops improve the drought resistance of young rubber trees. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(6), 56. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0537-z>
- Clermont-Dauphin, C., Suvannang, N., Pongwichian, P., Cheylan, V., Hammecker, C., & Harmand, J.-M. (2016). Dinitrogen fixation by the legume cover crop *Pueraria phaseoloides* and transfer of fixed N to *Hevea brasiliensis*—Impact on tree growth and vulnerability to drought. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 217, 79-88.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). *The Oil palm fourth edition*. World Agriculture Series, Blackwell.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil palm fifth edition*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Corley, R., Hardon, J., & Tan, G. (1971). Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*, 20(2), 307-315.
- Cramb, R., & McCarthy, J. F. (2016). *The Oil Palm Complex : Smallholders, Agribusiness and the State in Indonesia and Malaysia*. NUS Press.
- Cros, D. (2014). *Etude des facteurs contrôlant l'efficacité de la sélection génomique chez le palmier à huile (Elaeis guineensis Jacq)*. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro, 124p.
- Daane, J., Breusers, M., & Frederiks, E. (1997). Farmer strategies on the Adja plateau of Benin. *Farmer strategies on the Adja plateau of Benin*.
- Dabin, B. (1956). Contribution à l'étude de la fertilité des terres de barre. *L'Agronomie Tropicale*, 11(4), 490-506.
- Daniel, C., & de Taffin, G. (1974). The management of young oil palm plantations in dry zones in Dahomey. *Oleagineux*, 29(5), 227-232.
- Dewi, S., Khasanah, N., Rahayu, S., Ekadinata, A., & van Noordwijk, M. (2009). Carbon footprint of Indonesian palm oil production : A pilot study. *Bogor, Indonesia. World Agroforestry Centre-ICRAF, SEA Regional Office*, 8.
- Djegui, N. (1992). *Influence des systèmes de cultures sur le statut organique (particulièrement sur la dynamique de l'azote) des sols sur terres de barre du Sud-Bénin* [These de doctorat, Toulouse, INPT]. <https://www.theses.fr/1992INPT001A>
- Djegui, N., de Boissezon, P., & Gavinelli, E. (1992). Statut organique d'un sol ferrallitique du Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures. *Cahiers ORSTOM Série Pédologie*, 27, 5-22.
- Doré T., Sebillotte M., Meynard J.M., 1997. A Diagnostic Method for Assessing Regional Variations in Crop Yield. *Agricultural Systems* 54 : 169-188.
- Doré T., Clermont-Dauphin C., Crozat Y., David C., Jeuffroy M.H., Loyce C., Makowski D., Malézieux E., Meynard J.M., Valantin-Morison M., 2008. Methodological progress in

- on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 28 : 151-161.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., & TITTONELL, P. (2011). Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy : Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 197-210.
- Douthwaite, B., Manyong, V. M., Keatinge, J. D. H., & Chianu, J. (2002). The adoption of alley farming and Mucuna : Lessons for research, development and extension. *Agroforestry systems*, 56(3), 193–202.
- Dronne, Y. (2005). L’huile de palme dans le marché mondial : Productions et échanges. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 12(2), 98–106.
- Erhabor, J. O., Aghimien, A. E., & Filson, G. C. (2002). The root distribution pattern of young oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) grown in association with seasoned crops in southwestern Nigeria. *Journal of Sustainable Agriculture*, 19(3), 97-110.
- Erhabor, J. O., & Filson, G. C. (1999). Soil fertility changes under an oil palm-based intercropping system. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2-3), 45-61.
- Félix, G. F., Scholberg, J. M. S., Clermont-Dauphin, C., Cournac, L., & TITTONELL, P. (2018). Enhancing agroecosystem productivity with woody perennials in semi-arid West Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(6), 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0533-3>
- Feller, C. (1995). La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 : 1. *Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique+ Annex, ORSTOM, Coll. TDM, 144.*
- Fleury, P. (1994). *Le diagnostic agronomique des végétations prairiales et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles: typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions, méthodes et applications dans les Alpes du Nord.* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Follin JC.(2000). Enjeux de la recherche sur le palmier à huile en Afrique. *Oléagineux Corps Gras et Lipides*, 7 (2) : 138-139. Fontanel, D. (2012). Huiles et beurres de pulpes de fruits : Revue des principales sources exploitées, teneurs en insaponifiables, propriétés et usages traditionnels d’intérêt cosmétique. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 19(4), 232-237.
- 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. Revue de géographie de Bordeaux*, 55(220), 475–494.
- Fournier, S., Okounlola-Biaou, A., & Adje, I. (2001). L’importance des filières locales : Le cas de l’huile de palme au Bénin. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 8(6), 646–653.
- Fridley, J. D. (2001). The influence of species diversity on ecosystem productivity : How, where, and why? *Oikos*, 93(3), 514-526.
- Gao, L., Xu, H., Bi, H., Xi, W., Bao, B., Wang, X., Bi, C., & Chang, Y. (2013). Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 8(7), e70739.

- Garrity, D. P., Akinnifesi, F. K., Ajayi, O. C., Weldesemayat, S. G., Mowo, J. G., Kalinganire, A., Larwanou, M., & Bayala, J. (2010). Evergreen Agriculture : A robust approach to sustainable food security in Africa. *Food security*, 2(3), 197–214.
- Germer, J., & Sauerborn, J. (2008). Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. *Environment, Development and Sustainability*, 10(6), 697-716.
- Hartley, C. W. S. (1988). (1988). *The Oil Palm* (H. Longman Scientific & Technical, Éd.; Tropical A, 761 p).
- Hawkins, H.-J., Hettasch, H., West, A. G., & Cramer, M. D. (2009). Hydraulic redistribution by Protea ‘Sylvia’ (Proteaceae) facilitates soil water replenishment and water acquisition by an understorey grass and shrub. *Functional Plant Biology*, 36(8), 752-760.
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., 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(3), 477-569.
- Henson, I. E., & Dolmat, M. T. (2003). Physiological analysis of an oil palm density trial on a peat soil. *J. Oil Palm Res*, 15(2), 1-27.
- Henson, I. E., Ruiz, R., & Romero, H. M. (2011). The growth of the oil palm industry in Colombia. *J. Oil Palm Res*, 23, 1121-1128.
- Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., & Zhang, F. (2011). P for Two, Sharing a Scarce Resource : Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. *Plant Physiology*, 156(3), 1078-1086. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175331>
- Hothorn, T., Hornik, K., & Zeileis, A. (2006). Unbiased recursive partitioning : A conditional inference framework. *Journal of Computational and Graphical statistics*, 15(3), 651–674.
- Hothorn, T., & Zeileis, A. (2015). partykit : A modular toolkit for recursive partytioning in R. *The Journal of Machine Learning Research*, 16(1), 3905–3909.
- Houndehin, J., & Agnoun, Y. (2014). *Capitalisation des méthodes de conservation/transformation de la tomate*. Revue documentaire. 32 p.
- Howeler, R., Litaladio, N., & Thomas, G. (2013). *Save and grow : Cassava. A guide to sustainable production intensification*. FAO.
- Huang, J., Fu, R., Liang, C., Dong, D., & Luo, X. (2010). Allelopathic effects of cassava (*Manihot esculenta crantz*) on radish (*Raphanus sativus L.*) and ryegrass (*Lolium perenne L.*). *Allelopathy Journal*, 25(1).
- Igue, A. M., Saidou, A., Adjanohoun, A., Ezui, G., Attiogbe, P., Kpagbin, G., Gotoechan-Hodonou, H., Youl, S., Pare, T., & Balogoun, I. (2013). Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin. *Bulletin de la Recherche agronomique du Bénin*.(1), 12–23.
- INSAE. (2013). *Quatrième Recensement Général de la Population et de l’Habitat*. INSAE.

- Izenman A.J. (2013) Recursive Partitioning and Tree-Based Methods. In: Modern Multivariate Statistical Techniques. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78189-1_9
- Jacquemard, J.-C., & Baudouin, Luc. (1987). contribution à l'étude de la croissance du palmier à huile. Présentation d'un modèle descriptif. *Oléagineux*, 42(10), 343 – 351.
- Jacquemard, J.-C., Baudouin, L., & Noiret, J.-M. (2001). Oil palm. *Tropical plant breeding*, 10(111), 338p.
- Jaffré, T., & Namur, C. de. (1983). Evolution de la biomasse végétale épigée au cours de la succession secondaire dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Acta Oecologia*, 4, 259p.
- Jagoret, P. (2011). *Analyse et évaluation de systèmes agroforestiers complexes sur le long terme : Application aux systèmes de culture à base de cacaoyer au Centre Cameroun*. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro, 236p
- Jerneck, A., & Olsson, L. (2014). Food first ! Theorising assets and actors in agroforestry : Risk evaders, opportunity seekers and 'the food imperative' in sub-Saharan Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 12(1), 1-22. <https://doi.org/10.1080/14735903.2012.751714>
- Jourdan C., Rey H. 1996. Architecture racinaire du palmier à huile. Modélisation et simulation. *Plantation, Recherche, Développement*, (3)5 : 313-327.
- 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.
- Keng, P., Basri, M., Zakaria, M., Rahman, M. A., Ariff, A., Rahman, R. A., & Salleh, A. (2009). Newly synthesized palm esters for cosmetics industry. *Industrial crops and products*, 29(1), 37-44.
- Kessler, J. (1992). The influence of karité (*Vitellaria paradoxa*) and néré (*Parkia biglobosa*) trees on sorghum production in Burkina Faso. *Agroforestry systems*, 17(2), 97-118.
- Khalid, H., Zin, Z. Z., & Anderson, J. (1999). Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. I. Above-ground biomass. *Journal of Oil Palm Research*, 11(1), 23-32.
- Kizito, F., Dragila, M., Senè, M., Brooks, J., Meinzer, F., Diedhiou, I., Diouf, M., Lufafa, A., Dick, R., & Selker, J. (2012). Hydraulic redistribution by two semi-arid shrub species : Implications for Sahelian agro-ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 83, 69-77.
- Korom, A., Mui-How, P., & Toishiya, M. (2016). Relationships between Crown Size and Aboveground Biomass of Oil Palms : An Evaluation of Allometric Models. *Sains Malaysiana*, 45(4), 523-533.
- Koussihouèdé, H., Clermont-Dauphin, C., Aholoukpé, H., Barthès, B., Chapuis -Lardy, L., Jassogne, L., & Amadji, G. (2020a). Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin. *Agroforestry systems*, 94:41-56.
- Koussihouèdé, H., Aholoukpé, H., Adjibodou, J., Hinkati, H., Dubos, B., Barthès, B., Chapuis-Lardy, L., Amadji G., & Clermont-Dauphin, C. (2020b). Comparative analysis of

- nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin. *Experimental Agriculture*, 1–16. DOI: 10.1017/s0014479720000022.
- Kuyah, S., Whitney, C. W., Jonsson, M., Sileshi, G. W., Öborn, I., Muthuri, C. W., & Luedeling, E. (2019). Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* :39-47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>
- Lamade, E., Bouillet, J.-P. 2005. Carbon storage and global change: the role of oil palm. *Oléagineux Corps gras Lipides*, 12 (2) : 154–160.
- Lamade, E., Ollivier, J., Rozier-Abouab, T., & Gérardeaux, E. (2014). Occurrence of potassium location in oil palm tissues with reserve sugars : Consequences for oil palm K status determination. *IOPC Conference, 17–19 June 2014, Bali Convention Center*.
- Lamanda, N. (2005). *Caractérisation et évaluation agroécologique de systèmes de culture agroforestiers : Une démarche appliquée aux systèmes de culture abase de cocotiers (Cocos nucifera L.) sur l'île de Malo, Vanuatu*. Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, Paris, France, 200 p
- Lawani, A. O. (2016). Le palmier à huile au Bénin: le passé, le présent et l'avenir: quels atouts et contraintes pour la conquête du marché national. *Présentation au salon "Huile rouge de palme"; 2^e édition; Porto novo, 17-18 Novembre 2016*.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, 25(1), 1–18.
- Lee, J. S. H., Ghazoul, J., Obidzinski, K., & Koh, L. P. (2014). Oil palm smallholder yields and incomes constrained by harvesting practices and type of smallholder management in Indonesia. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 501-513. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0159-4>
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Caliman, J.-P., Siregar, F. A., Clément-Vidal, A., Fabre, D., & Dingkuhn, M. (2009a). Phenology, growth and physiological adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to sink limitation induced by fruit pruning. *Annals of Botany*, 104(6), 1183-1194.
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Clément-Vidal, A., Caliman, J.-P., Siregar, F. A., Fabre, D., & Dingkuhn, M. (2009b). Role of transitory carbon reserves during adjustment to climate variability and source–sink imbalances in oil palm (*Elaeis guineensis*). *Tree Physiology*, 29(10), 1199-1211.
- Lenth, R. (2018). Emmeans : Estimated marginal means, aka least-squares means. *R Package Version*, 1(2).
- Lokossou, B., Affokpon, A., Adjanohoun, A., Dan, C. B. S., & Mensah, G. A. (2012). Evaluation des variables de croissance et de développement du bananier plantain en systèmes de culture associée au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, 1-8.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443–454.
- Louppe, D, N'Dour, B, Samba, SAN (1996) Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil au Sénégal: Méthodologie de mesure et estimation des effets d'arbres émondés avec

- ou sans parage d'animaux. In: Peltier R (ed) Les parcs à Faidherbia, Cahier scientifiques, vol 12. CIRAD-Forêt, Montpellier, France, pp 123–138.
- Loyce, C., & Wery, J. (2006). Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. *L'agronomie aujourd'hui. QUAE Editions*, 77-95.
- MAEP, de l'Elevage et des P. (2011). *Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA)*. MAEP Benin.
- Malézieux, E., & Bartholomew, D. P. (2003). Plant nutrition. In *The pineapple: botany, production and uses*, 143–165.
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., De Tourdonnet, S., & Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems : Concepts, tools and models : A review. In *Sustainable agriculture* (p. 329-353). Springer.
- Mba, O. I., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry—A review. *Food bioscience*, 10, 26-41.
- McIntyre, B., Riha, S., & Ong, C. (1997). Competition for water in a hedge-intercrop system. *Field Crops Research*, 52(1-2), 151-160.
- Meijer, S. S., Sileshi, G. W., Catacutan, D., & Nieuwenhuis, M. (2016). Agroforestry and deforestation in Malawi : Inter-linkages between attitudes, beliefs and behaviours. *Agroforestry Systems*, 90(4), 645–658.
- Mekoya, A., Oosting, S. J., Fernandez-Rivera, S., & Van der Zijpp, A. J. (2008). Multipurpose fodder trees in the Ethiopian highlands : Farmers' preference and relationship of indigenous knowledge of feed value with laboratory indicators. *Agricultural Systems*, 96(1-3), 184–194.
- Mensah, G. A. (1999). Le palmier à huile, un arbre à buts multiples et une source de technologies traditionnelles variées. *Bulletin de la Recherche Agronomique Numéro*, 1-9.
- Mercer, D. E. (2004). Adoption of agroforestry innovations in the tropics : A review. *Agroforestry systems*, 61(1-3), 311-328.
- Montambault, J. R., & Alavalapati, J. R. (2005). Socioeconomic research in agroforestry : A decade in review. *Agroforestry systems*, 65(2), 151-161.
- Nchanji, Y. K., Nkongho, R. N., Mala, W. A., & Levang, P. (2016). Efficacy of oil palm intercropping by smallholders. Case study in South-West Cameroon. *Agroforestry Systems*, 90(3), 509–519.
- N'Danikou, S., Achigan-Dako, E. G., Tchokponhoue, D. A., Agossou, C. O., Houdegbe, C. A., Vodouhe, R. S., & Ahanchede, A. (2015). Modelling socioeconomic determinants for cultivation and in-situ conservation of *Vitex doniana* Sweet (Black plum), a wild harvested economic plant in Benin. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s13002-015-0017-3>
- Ng, S. K. (1977). Review of oil palm nutrition and manuring. Scope for greater economy in fertilizer usage. *Oléagineux*, 32(5), 197–209.

- 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, Léfi, Chopart, J.-L., Rounsard, 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.
- Nouy, B, Baudouin, L, Djégui, N, Omoré, A. (1999). Le palmier à huile en conditions hydriques limitantes. *Plantation, Recherche, Développement*, 6 (1) : 31-45.
- 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.
- Okpala-Jose A. (1995) Relating the performance of oil palm to microclimatic changes at varying distances the palms and adjacent cassava stands, in: Jalani B.S. et al. (Eds.), PORIM Int. Palm Oil Congr. – Agriculture, Kuala Lumpur: Palm Oil Res. Inst. Malaysia, pp. 603– 613.
- Ollagnier, M., & Ochs, R. (1981). Gestion de la nutrition minérale des plantations industrielles de palmiers à huile : Économies d'engrais. *Oléagineux*, 36(8-9), 409–421.
- Ollivier, J., Daniel, C., & Braconnier, S. (1994). *Cultures vivrières associées à de jeunes cocotiers, exemples au vanuatu*.
- Pattanayak, S., & Evan Mercer, D. (1998). Valuing soil conservation benefits of agroforestry : Contour hedgerows in the Eastern Visayas, Philippines. *Agricultural Economics*, 18(1), 31-46. [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(97\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(97)00037-6)
- Pattanayak, S. K., Mercer, D. E., Sills, E., & Yang, J.-C. (2003). Taking stock of agroforestry adoption studies. *Agroforestry systems*, 57(3), 173–186.
- Pegoraro, R. F., Souza, B. A. M. de, Maia, V. M., Silva, D. F. da, Medeiros, A. C., & Sampaio, R. A. (2014). Macronutrient uptake, accumulation and export by the irrigated 'vitória' pineapple plant. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(3), 896–904.
- Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M., & Wery, J. (2005). Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil*, 266(1-2), 129-142.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres. *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy*, 224p.
- Pilli, R., Anfodillo, T., & Carrer, M. (2006). Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 583-593.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2017). *R Core Team (2017) nlme : Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-131*.

- Priyati, R. Y., & Tyers, R. (2016). Price relationships in vegetable oil and energy markets. *UWA Discussion papers in Economics*.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (3.5.1) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rafflegeau, 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. *Agronomy for sustainable development*, 30(4), 777–787.
- Rajasekharan, P., & Veeraputhran, S. (2002). Adoption of intercropping in rubber smallholdings in Kerala, India: A tobit analysis. *Agroforestry Systems*, 56(1), 1-11. <https://doi.org/10.1023/A:1021199928069>
- Reijnders, L., & Huijbregts, M. A. J. (2008). Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, 16(4), 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.054>
- Rival, A., & Levang, P. (2014). *Palms of controversies : Oil palm and development challenges*. CIFOR.
- Rizvi, S., Tahir, M., Rizvi, V., Kohli, R., & Ansari, A. (1999). Allelopathic interactions in agroforestry systems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18(6), 773-796.
- Roupsard, O., Ferhi, A., Granier, A., Pallo, F., Depommier, D., Mallet, B., Joly, H., & Dreyer, E. (1999). Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. In an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. *Functional ecology*, 13(4), 460-472.
- Saïdou, A. (1992). *Effets de l'apport de différents matériaux végétaux sur la fertilité d'un sol ferrallitique (terre de barre) du Sud Bénin*. Thèse d'Ingénieur Agronome, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, p. 71.
- Saidou, A., Balogoun, I., Kone, B., Gnangle, C. P., & Aho, N. (2012). Effet d'un système agroforestier à karité (*Vitellaria paradoxa* c.f. Gaertn) sur le sol et le potentiel de production du maïs (*Zea maize*) en zone Soudanienne du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(5), 2066-2082. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i5.16>
- Saïdou, A., Janssen, B. H., & Temminghoff, E. J. M. (2003). Effects of soil properties, mulch and NPK fertilizer on maize yields and nutrient budgets on ferralitic soils in southern Benin. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100(2), 265-273. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00184-1)
- Salako, F., Lal, R., & Swift, M. (1995). Intercropping oil palm (*elaeis guineensis*) with cocoyam (*xanthosoma sagittifolium*) on windrows and non-windrows in southern Nigeria. *Journal of Sustainable Agriculture*, 6(1), 47-60.
- Sanou, J., Bayala, J., Bazie, P., & Teklehaimanot, Z. (2012). Photosynthesis and biomass production by millet (*Pennisetum glaucum*) and taro (*Colocasia esculenta*) grown under baobab (*Adansonia digitata*) and néré (*Parkia biglobosa*) in an agroforestry parkland system of Burkina Faso (West Africa). *Experimental agriculture*, 48(2), 283.

- Scheidecker, D., & Prevot, P. (1954). Nutrition minérale du palmier à huile à Pobé (Dahomey). *Oléagineux*, 1, 13–19.
- Schroth, G., Lehmann, J., Rodrigues, M. R. L., Barros, E., & Macêdo, J. L. V. (2001). Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 53(2), 85-102. <https://doi.org/10.1023/A:1013360000633>
- Schwartz, A. (2000). Culture du coton, sécurité alimentaire et développement durable dans les savanes de l’Afrique subsaharienne. L’exemple du Burkina Faso. In *Actes du colloque «Sécurité alimentaire et développement durable»*. Paris: Editions Technique et documentation. 189-198.
- Seneviratne, H. T. J., Sumanasekara, V. D. W., & Dissanayake, D. (2015). Role of agroforestry in achieving food and nutritional security, climate change mitigation and environmental resilience : A review. *NBRO Symposium*.
- Sileshi, G. W., Kuntashula, E., Matakala, P., & Nkunika, P. O. (2008). Farmers’ perceptions of tree mortality, pests and pest management practices in agroforestry in Malawi, Mozambique and Zambia. *Agroforestry systems*, 72(2), 87–101.
- Silpi, U., Lacoite, A., Kasempap, P., Thanysawanyangkura, S., Chantuma, P., Gohet, E., Musigamart, N., Clément, A., Améglio, T., & Thaler, P. (2007). Carbohydrate reserves as a competing sink : Evidence from tapping rubber trees. *Tree physiology*, 27(6), 881-889.
- Sissoko, F., Coulibaly, D., Cissé, O., & Dugué, P. (2015). Évaluation de l'arrière-effet de la culture du coton sur la production céréalière en zone cotonnière du Mali. *Presses agronomiques de Gembloux*, 149 p.
- Sparnaaij, L. D. (1959). *The analysis of bunch production in the oil palm*. Wageningen UR.
- Sun, S.-J., Meng, P., Zhang, J.-S., & Wan, X. (2014). Hydraulic lift by *Juglans regia* relates to nutrient status in the intercropped shallow-root crop plant. *Plant and Soil*, 374(1), 629-641. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1888-5>
- Suresh, K., Mathur, R. K., & Behera, S. K. (2016). Oil Palm. In *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops*. Springer. 333–342.
- Syahrudin. (2005). The Potential of Oil Palm and Forest Plantations for Carbon Sequestration on Degraded Land in Indonesia. *Ecology and Development Series 28* : 1–115.
- Teixeira, L. A. J., Quaggio, J. A., Cantarella, H., & Mellis, E. V. (2011). Potassium fertilization for pineapple : Effects on soil chemical properties and plant nutrition. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(2), 627–636.
- Thenkabail, P. S., Stucky, N., Griscom, B. W., Ashton, M. S., Diels, J., Van der Meer, B., & 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(23), 5447-5472.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Tittonell, P., Muriuki, A., Shepherd, K. D., Mugendi, D., Kaizzi, K. C., Okeyo, J., Verchot, L., Coe, R., & Vanlauwe, B. (2010). The diversity of rural livelihoods and their influence

- on soil fertility in agricultural systems of East Africa – A typology of smallholder farms. *Agricultural Systems*, 103(2), 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.10.001>
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., Rowe, E. C., & Giller, K. E. (2005a). Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya : I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, ecosystems & environment*, 110(3-4), 149–165.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., Leffelaar, P. A., Rowe, E. C., & Giller, K. E. (2005b). Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya : I. Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, ecosystems & environment*, 110(3-4), 149–165.
- Torquebiau, E., Mary, F., & Sibelet, N. (2002). Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *Bois & forêts des tropiques*, 271, 23-35.
- Tossou CC, Floquet AB, Sinsin BA (2009) Dimension socioéconomique des principales espèces fruitières cultivées sur le Plateau d'Allada au sud du Bénin. *Bulletin de la Recherche agronomique du Bénin*. 1–12.
- Turner, E. C., Snaddon, J. L., Fayle, T. M., & Foster, W. A. (2008). Oil palm research in context : Identifying the need for biodiversity assessment. *PloS one*, 3(2), e1572.
- UEMOA. (2013). étude de faisabilité et d'élaboration d'un programme d'action détaillé pour la promotion des filières oléagineuses graines de coton et du palmier à huile dans l'espace uemoa. (1): *bilan diagnostic et programme d'actions*, Commission de l'UEMOA, Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement, 223p.
- USDA. (2018). *oilseed : Worlds markets and trade*. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>
- Verheye, W. (2010). Growth and production of oil palm. In *Land use, land cover and soil sciences*. UNESCO-EOLSS Publishers.
- Vermaak, I., Kamatou, G. P. P., Komane-Mofokeng, B., Viljoen, A., & Beckett, K. (2011). African seed oils of commercial importance—Cosmetic applications. *South African Journal of Botany*, 77(4), 920-933.
- Volkoff, B. (1976). *Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille d'Abomey* (Centre IRD de Bondy; p. 41 p.). ORSTOM. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:08689>
- Von Uexkull, H. R., & Fairhurst, T. H. (1991). *The oil palm : Fertilizing for high yield and quality*. International Potash Institute.
- Waldron, A., Garrity, D., Malhi, Y., Girardin, C., Miller, D. C., & Seddon, N. (2017). Agroforestry can enhance food security while meeting other sustainable development goals. *Tropical Conservation Science*, 10, 1940082917720667.
- Woittiez, L. S., Turhina, S., Deccy, D., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2018). Fertiliser application practices and nutrient deficiencies in smallholder oil palm plantations in Indonesia. *Experimental Agriculture*, 1–17.
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm : A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57-77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>

- Yabi, A. J., & Moustafa, R. (2013). Analysis of maize production and supply for food security improvement in the Borgou region in Northeast of Benin. *African Journal of Agricultural Research*, 8(11), 943–951.
- Yemadje, R., Crane, T., Vissoh, P. V., Mongbo, R., Richards, P., Kossou, D., & Kuyper, T. (2012). The political ecology of land management in the oil palm based cropping system on the Adja plateau in Benin. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 60–63, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2012.06.007>
- Zhiwei, C. H. S. Y. F., & Lizhen, H. Q. L. X. L. (2013). Chemical Constituents and Potential Allelopathic Effects of the Lipophilic Parts from Cassava Leaves on Companion Weeds. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 4, 12.
- Zomboudré, G., Zombré, G., Guinko, S., & Roy Macauley, H. (2005). Réponse physiologique et productivité des cultures dans un système agroforestier traditionnel : Cas du maïs (*Zea mays* L.) associé au karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) dans la zone est du Burkina Faso. *BASE*. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13880>.

Annexes



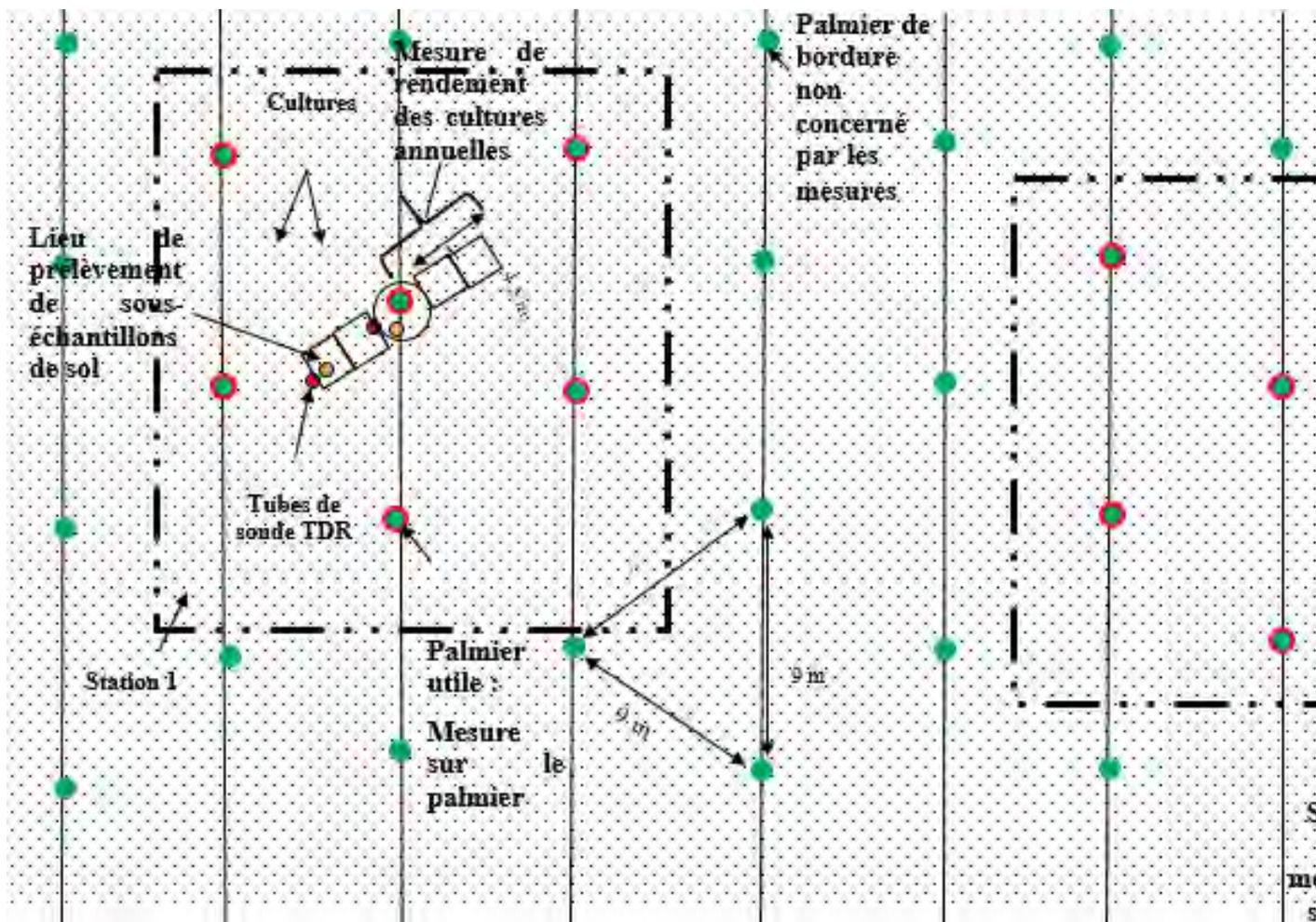
ANNEXE 1

Effectifs des ménages possédant du palmier à huile issus du recensement national (RPGH4/INSAE, 2013b).

Communes concernées (Les communes concernées par le cette recherche sont en gras)	Nombres de ménages à palmier à huile
Abomey-calavi	448
Kpomassè	51
Ouidah	220
So-Ava	72
Allada	1889
Zè	1400
Toffo	1325
Tori	111
Total sur le département de l'Atlantique	5516

ANNEXE 2

Dispositif installé dans chaque palmeraie du réseau de parcelle d'agriculteur sur le plateau d'Allada au Sud- Bénin



ANNEXE 3

Résumé des modèles d'analyse pour l'analyse de l'humidité du sol**Résumé du modèle pour l'analyse de l'humidité du sol à 0-40 cm pour le manioc**

```

Linear mixed-effects model fit by REML
Data: hdata
  AIC   BIC  logLik
5338.894 5388.478 -2659.447
Random effects:
Formula: ~JOUR | Parcelle
Structure: Diagonal
  (Intercept)   JOUR Residual
StdDev:   8.707022 0.01769249 9.681259
Correlation Structure: ARMA(1,1)
Formula: ~1 | Parcelle
Parameter estimate(s):
  Phi1  Theta1
0.9985951 -0.8015985
Variance function:
Structure: Different standard deviations per stratum
Formula: ~1 | Position
Parameter estimates:
  1    2
1.000000 1.371648
Fixed effects: Humidité ~ JOUR * Position
              Value Std.Error DF t-value p-value
(Intercept)  2.944309  5.290362 1049  0.5565420  0.5780
JOUR         -0.008986  0.012407 1049 -0.7242312  0.4691
Position     4.247667  1.745683 1049  2.4332412  0.0151
JOUR:Position -0.006121  0.005171 1049 -1.1837640  0.2368
Correlation:
  (Intr) JOUR  Positn
JOUR      -0.165
Position  0.532 -0.177
JOUR:Position -0.177 0.513 -0.371
Standardized Within-Group Residuals:
  Min    Q1    Med    Q3    Max
-1.9073820 -0.6468846 -0.1401166  0.5885940  1.9559193
Number of Observations: 1056
Number of Groups: 4
> anova.lme(model)
              numDF denDF F-value p-value
(Intercept)    1  1049 0.791910 0.3737
JOUR          1  1049 0.029407 0.8639
Position     1  1049 4.610686 0.0320
JOUR:Position 1  1049 1.401297 0.2368

```

Résumé du modèle pour l'analyse de l'humidité du sol à 40-80 cm pour le manioc

```

Linear mixed-effects model fit by REML
Data: hdata
  AIC   BIC  logLik
5789.725 5854.185 -2881.862
Random effects:
Formula: ~JOUR | Parcelle
Structure: General positive-definite, Log-Cholesky parametrization
  StdDev  Corr
(Intercept) 3.808137588 (Intr)
JOUR      0.008942932 0.972
Residual  8.187084380
Correlation Structure: ARMA(1,1)
Formula: ~1 | Parcelle
Parameter estimate(s):
  Phi1  Theta1
0.51557183 0.07896352
Variance function:
Structure: Different standard deviations per stratum
Formula: ~1 | Parcelle
Parameter estimates:
  1      2      3      4
1.0000000 0.1323350 1.0095300 0.6427536
Fixed effects: Humidité ~ JOUR * Position
  Value Std.Error  DF  t-value p-value
(Intercept) 4.812173 1.9758572 1049 2.435486 0.0150
JOUR      0.009695 0.0053456 1049 1.813595 0.0700
Position  2.153599 0.2415470 1049 8.915862 0.0000
JOUR:Position 0.004654 0.0014865 1049 3.130964 0.0018
Correlation:
  (Intr) JOUR  Positn
JOUR      0.687
Position  -0.184 0.362
JOUR:Position 0.157 -0.417 -0.859
Standardized Within-Group Residuals:
  Min      Q1      Med      Q3      Max
-3.34116055 -0.79216594 -0.04064614 0.85961322 2.69407152
Number of Observations: 1056
Number of Groups: 4
> anova.lme(model)
  numDF denDF F-value p-value
(Intercept)  1 1049  7.2426 0.0072
JOUR      1 1049 10.6695 0.0011
Position  1 1049 514.3450 <.0001
JOUR:Position 1 1049  9.8029 0.0018

```

Résumé du modèle pour l'analyse de l'humidité du sol à 0-40 cm pour le maïs

```

> summary(model6)
Linear mixed-effects model fit by REML
Data: hdata

```

AIC BIC logLik
4262.919 4309.614 -2121.459

Random effects:

Formula: ~JOUR | Parcelle

Structure: Diagonal

(Intercept) JOUR Residual

StdDev: 1.167758 0.004658175 3.105558

Correlation Structure: ARMA(1,1)

Formula: ~1 | Parcelle

Parameter estimate(s):

Phi1 Theta1

0.3518739 0.1393458

Variance function:

Structure: Different standard deviations per stratum

Formula: ~1 | Position

Parameter estimates:

1 2

1.000000 1.591222

Fixed effects: Humidité ~ JOUR * Position

Value Std.Error DF t-value p-value

(Intercept) 3.849882 1.0592653 786 3.634483 0.0003

JOUR 0.001946 0.0056973 786 0.341549 0.7328

Position 1.368306 0.6122740 786 2.234793 0.0257

JOUR:Position 0.007532 0.0037702 786 1.997721 0.0461

Correlation:

(Intr) JOUR Positn

JOUR -0.584

Position -0.679 0.670

JOUR:Position 0.581 -0.777 -0.858

Standardized Within-Group Residuals:

Min Q1 Med Q3 Max

-2.1361898 -0.7226990 -0.1408748 0.5529441 3.6440680

Number of Observations: 792

Number of Groups: 3

> **anova.lme(model6)**

numDF denDF F-value p-value

(Intercept) 1 786 67.55758 <.0001

JOUR 1 786 8.63578 0.0034

Position 1 786 59.12423 <.0001

JOUR:Position 1 786 3.99089 0.0461

Résumé du modèle pour l'analyse de l'humidité du sol à 40-80 cm pour le maïs

Linear mixed-effects model fit by REML

Data: hdata

AIC BIC logLik

4765.649 4812.344 -2372.825

Random effects:

```

Formula: ~JOUR | Parcelle
Structure: Diagonal
  (Intercept)  JOUR Residual
StdDev:  1.879965 0.02223735 5.290322
Correlation Structure: ARMA(1,1)
Formula: ~1 | Parcelle
Parameter estimate(s):
  Phi1  Theta1
-0.07530043  0.45112946
Variance function:
Structure: Different standard deviations per stratum
Formula: ~1 | Position
Parameter estimates:
  1  2
1.0000000 0.9213323
Fixed effects: Humidité ~ JOUR * Position
      Value Std.Error DF  t-value p-value
(Intercept) 12.790470 1.6635730 786  7.688553 0.0000
JOUR        -0.002363 0.0149946 786 -0.157607 0.8748
Position     0.458021 0.7625537 786  0.600640 0.5483
JOUR:Position -0.002747 0.0046879 786 -0.585878 0.5581
Correlation:
  (Intr) JOUR  Positn
JOUR        -0.336
Position    -0.710 0.416
JOUR:Position 0.609 -0.484 -0.858
Standardized Within-Group Residuals:
  Min      Q1      Med      Q3      Max
-2.62033135 -0.72382988 -0.06609418  0.62253984  6.89342021
Number of Observations: 792
Number of Groups: 3
> anova.lme (model)
      numDF denDF  F-value p-value
(Intercept)   1  786 132.58355 <.0001
JOUR          1  786  0.25436 0.6142
Position      1  786  0.03636 0.8488
JOUR:Position 1  786  0.34325 0.5581

```

Résultats des ICC liés au temps et aux parcelles pour les humidités du sol dans les systèmes maïs et

manioc

	Maïs		Manioc	
	0-40 cm	40-80 cm	0-40 cm	40-80 cm
ICC parcelle	3,85	38,6	14,4	34,87
ICC temps	6,27	9,05	9,67	6,03

ANNEXE 4

Résultats des analyses de variance et ICC sur les performances des cultures annuelles

Rendements et biomasse suivant les systèmes à ananas et à maïs (nombre de parcelle =3)

Sources de variation	Maïs			Ananas			Biomasse					
	Rendement			Biomasse			Rendement			Biomasse		
	ddl	Chi2*	P	Chi2	P	Chi2*	P	Chi2*	P	Chi2*	P	
Zone	2	41,16	< 0,001(***)	48,8	< 0,001(***)	58,91	< 0,001(***)	159,6	< 0,001(***)	7	< 0,001(***)	
ICC%												
Parcelle	12,44			38,36			34,42			0,82		

* Chi2: valeur de la statistique du Chi2

Rendements et quantités de biomasse suivant le système tomate (nombre de parcelle =3)

Sources de variation	Tomate					
	Rendement			Biomasse		
	ddl	Chisq	P	Chisq	P	P
Position	2	34,17	< 0,001(***)	61,4	< 0,001(***)	5
ICC%						
Parcelle	0,22			9,36		

Rendements et quantités de biomasse suivant le système manioc (nombre de parcelle =3)

Sources de variation	Manioc					
	Rendement			Biomasse		
	ddl	F	P	Chisq	P	P
Position	2	24,45	< 0,001(***)	52,88	< 0,001(***)	
ICC%						
Parcelle	-			24,74		

Sources de variation	Manioc					
	Rendement			Biomasse		
	ddl	F	P	Chisq	P	P
Cycle	1	3,94	> 0,05(ns)	1,97	> 0,05(ns)	
ICC%						
Parcelle	7,70					

ANNEXE 5

Principal component analysis (PCA) loadings of the N, P, K, Mg and Ca.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
N	0.2309376	0.568060142	0.5588788	-0.55325603	-0.07441613
P	-0.1235404	0.795039285	-0.2023590	0.55804311	0.01700085
K	0.6678550	0.007466097	-0.1128514	0.07399347	0.73191770
Mg	-0.5365304	0.172990796	-0.4157856	-0.53055166	0.47733278
Ca	0.47733278	0.123444932	-0.6790377	-0.30908827	-0.48023235

Loadings are scaled by their respective eigenvalues and represent the correlation of each variable with the PCA axis. Correlation values significant for $p \geq 0.05$ are in bold

ANNEXE 6

The mixed model results for the nutrition and growth parameters

N		P		K		Mg		Ca		NGL		VI	
Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value	Chisq	<i>p</i> -value
5.95	0.11 (ns)	2.65	0.45 (ns)	21.56	< 0.001 (***)	24.05	< 0.001 (***)	27.05	< 0.001 (***)	8.47	0.037 (*)	0.32	0.57 (n.s.)
ICC%		ICC%		ICC%		ICC%		ICC%		ICC%		ICC%	
7.15		18.41		17.09		5.85		3.07		0.1		82.48	

Df: degree of freedom; Chisq: the value of the chi squared test

ANNEXE 7

Quelques photos de terrain



Palmier utile marqué



Mélange des sacs de 50kg d'urée et de NPK avant application en milieu villageois

Palmier





Mesure d'humidité à 4,5 m de l'arbre



Mesure d'humidité à 1 m de l'arbre



Association palmier-manioc. Le manioc est présent même sous la couronne de l'arbre



Mesure de la circonférence
au collet

Mesure du diamètre de la
couronne

Abattage et
palmier pou
des équatio

Biographie de l'auteur

KOUSSIHOUÉDE Kpèdétin Inès Hermione née le 22 mars 1988 à Cotonou au Bénin est mariée et mère de deux enfants.

Elle a effectué les études primaires et secondaires de 1991 à 2005 où elle a été titulaire d'un baccalauréat scientifique. Entre 2006 et 2007, elle a débuté les études supérieures en sciences agronomiques à l'Université Africaine de Technologie et de Management (UATM-Gasa Formation). En 2008, elle rejoint la faculté des sciences agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (FSA/UAC) et obtint le diplôme de Licence en agronomie option production végétale en 2011 puis celui de Master en 2014. Très tôt, elle a manifesté sa passion pour le domaine des sciences du sol et avait effectué son premier stage pratique au Laboratoire des Sciences du Sol de la Faculté des sciences agronomiques en 2010.

Elle fut enrôlée par son professeur de pédologie, le Professeur Guillaume L. Amadji, dans les fonctions d'assistante de recherche. Elle 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 agrosystèmes.

Elle possède une expérience dans les pratiques d'agriculture durable grâce à des stages dans des institutions internationales comme l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA/BENIN), le Centre International d'Expérimentation et de Valorisation des Ressources Africaines (CIEVRA-Bénin).

Engagée dans la gestion durable des sols et dans la lutte contre les effets du changement climatique, elle a participé aux travaux du Réseau de carbone des sols pour une agriculture durable en Afrique (CaSA) pour l'évaluation des stocks de carbone des sols du littoral béninois et a contribué à la rédaction d'un chapitre de livre sur ce même sujet.

Elle est également co-auteure d'une étude prospective intitulée, *vision pour un monde sans faim*, réalisée par l'ONG Bridges Bénin (actuelle HT Bénin) sous l'initiative de la Fondation Friedrich –Ebert (Bénin).

En 2020, elle obtint le diplôme de Docteur en sciences agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

COMPETENCES

- Conception de projet de recherche- développement ;
- Maîtrise des outils pour la gestion intégrée des sols tropicaux ;
- Maîtrise des méthodes usuelles d'analyse des sols et des végétaux ;
- Gestion des pratiques culturales pour une utilisation durable des sols des palmeraies ;
- Evaluation des systèmes de culture ;
- Etude de la matière organique des sols ;
- Connaissance des techniques d'agriculture biologique et d'agroécologie ;
- Transfert de connaissances théoriques et pratiques à des groupes de scientifiques, agronomes et paysans.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Koussihouèdé H., Aholoukpé H., Adjibodou J., Hinkati H., Dubos, B., Barthès B., Chapuis-Lardy L., Amadji G., Clermont-Dauphin C. 2020. Comparative analysis of nutritional status and growth of immature oil palm in various intercropping systems in southern Benin. *Experimental Agriculture*, 1–16. DOI: 10.1017/s0014479720000

Koussihouèdé H, Clermont-Dauphin C, Aholoukpé H, Barthès B., Chapuis-Lardy L., Jassogne L., Amadji G. 2020. Diversity and socio-economic aspects of oil palm agroforestry systems on the Allada plateau, southern Benin. *Agroforestry Systems* 94:41-56; DOI 10.1007/s10457-019-00360-0.

Koussihouèdé, K. I. H., Aholoukpè, N. S. H. Assogba Komlan, F. V., Amadji, G. L., 2017. Soil organic carbon status in a vegetable cropping systems in Southern Benin: A rapid assessment. *African Journal of Soil Science* 5(3), 410–419.

Koussihouèdé, K.I.H., Aholoukpè N.S.H., Assogba-Komlan F.V., Amadji G.L., 2016. Influence comparée de la litière de volaille et des déjections compostées de petits ruminants sur la production de l'amarante (*Amaranthus cruentus* L.) sur terre de barre au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 14-19. http://www.slire.net/download/2446/article_2_pg_brab_80_d_cembre_2016_koussihou_d_et_al_influence_compar_e.pdf.

Aholoukpè N.S.H., Amadji G.L., **Koussihouèdé K.I.H.** (2020). Stocks de carbone dans les sols de différentes zones agroécologiques du Bénin In *Carbone des sols en Afrique. Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*, (éds.), Chevallier, T., Razafimbelo, T., Chapuis-Lardy, L., Brossard. Marseille et Rome, IRD et FAO. <https://doi.org/10.4060/cb0403fr>. Lien gratuit vers le livre : <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb0403fr>.

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Koussihouèdé K .I. H., Aholoukpè N. S. H., Adjibodou J., Hinkati H., Barthès B., Amadji G., Clermont-Dauphin C., 2019. Les jeunes palmiers à huile affectent-ils la production des cultures annuelles associées dans les plantations villageoises du Sud Bénin ? *Poster présenté à la 2^e conférence sur l'intensification durable (CID), 08-10 Octobre 2019, Hôtel Ngor Diarama, Dakar, Sénégal.*

Koussihouèdé K .I. H., Aholoukpè N. S. H., Adjibodou J., Hinkati H., Dubos B., Chapuis-Lardy L., Barthès B., Amadji G., Clermont-Dauphin C., 2019. K competition between crops and young oil palm in agroforestry systems in the Allada plateau smallholdings, Benin. *Poster présenté au 4^{ème} Congrès Mondial sur l'agroforesterie. 20-22 Mai 2019, centre de conférence « le Corum », Montpellier, France.*

Koussihouèdé K .I. H., Aholoukpè N. S. H., Hinkati H., Hounsou M., Barthès B., Clermont-Dauphin C., Amadji G. 2018. Interactions vis-à-vis de production et de la dynamique de l'eau dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile au sud-Bénin. XVIII^e édition des Journées Scientifiques Internationales de Lomé (JSIL 2018) sous le thème : « *l'Afrique face aux ODD : quelles recherches et innovations pour un développement durable ?* » Campus universitaire de Lomé, 08-13 Octobre 2018, Lomé, Togo.

Koussihouèdé K .I. H., Aholoukpè N. S. H., Adjibodou J., Barthès B., Clermont-Dauphin C., Amadji G. 2018. Effet des associations cultures annuelles – palmier à huile sur l'état nutritionnel des jeunes palmiers dans la région du plateau d'Allada au sud-Bénin. Atelier

conjoint Université de Tokyo (UT) et l'Université d' Abomey-Calavi (UAC): Février 22-23, 2018, Abomey-Calavi, Bénin. (Communication faite en anglais).

Koussihouèdé K .I. H. 2017. Diagnostic sur la production, l'efficacité d'utilisation des nutriments et le stockage de carbone des sols dans les systèmes agroforestiers à base de palmier à huile au Sud Bénin. Séminaire de lancement du projet SoCa << *Beyond climate, soil C sequestration to sustain family farming in the Tropics* >> ; UMR eco & sol ; Montpellier, 05-08 juillet 2017.

ACTIVITES DE VULGARISATION

Un documentaire avec Max Bird sur le système d'exploitation villageois du palmier à huile et le carbone du sol dans un contexte de changement climatique. Lien youtube vers le film : <https://www.youtube.com/watch?v=73PcTlrgprQ>

Un documentaire avec une équipe IRD (Tiphaine Chevallier, Joseph Fumtim) sur les services rendus par chaque système ainsi que sur les acquis de la recherche. Lien youtube vers le documentaire : <https://youtu.be/Ce6qtXOipVE>

Emission radio (radio « la voix de la lama ») faite avec les agriculteurs du réseau de parcelles représentatives de chaque système de culture à base de palmeraie immature.