
Quantification des stocks de carbone et évaluation de la biodiversité ligneuse des cacaoyères agroforestières de l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Man, district des montagnes)

Auteur : Cerny, Clément

Promoteur(s) : Doucet, Jean-Louis; Coenraets, Edouard

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21277>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**QUANTIFICATION DES STOCKS DE CARBONE ET
ÉVALUATION DE LA BIODIVERSITÉ LIGNEUSE
DES CACAOYÈRES AGROFORESTIÈRES DE
L'OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE
(MAN, DISTRICT DES MONTAGNES)**

CLEMENT CERNY

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

CO-PROMOTEURS : DOUCET J-L. & COENRAETS E.

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority¹ of Gembloux Agro-Bio Tech.

© Le présent document n'engage que son auteur

© This document is the sole responsibility of its author.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs, membres du personnel enseignant de GxABT.

In this case, the academic authority is represented by the promoters, members of the GxABT teaching staff.

**QUANTIFICATION DES STOCKS DE CARBONE ET
ÉVALUATION DE LA BIODIVERSITÉ LIGNEUSE
DES CACAOYÈRES AGROFORESTIÈRES DE
L'OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE
(MAN, DISTRICT DES MONTAGNES)**

CLEMENT CERNY

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

CO-PROMOTEURS : DOUCET J-L. & COENRAETS E.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je souhaite exprimer mes plus sincères remerciements au Pr. Jean-Louis Doucet. Mon engagement dans ce travail a débuté en octobre 2023, lors de l'organisation du module de foresterie tropicale, où nous avons pu discuter pour la première fois du sujet. Depuis ce moment, M. Doucet m'a soutenu sans relâche tout au long de cette aventure. Merci d'abord pour l'opportunité que vous m'avez offerte en me proposant ce sujet de mémoire ; concret, passionnant et engageant. Merci également pour vos suivis réguliers durant ma mission de terrain, pour les nombreuses heures de déterminations botaniques, pour vos partages d'expérience et pour vos recommandations précieuses dans ce travail. Je suis reconnaissant pour la supervision générale, les relectures aussi millimétrées qu'indispensables et la liberté de travail que vous m'avez accordée. Je vous dois bien un café, cette fois encore...

Je tiens également à remercier Edouard Coenraets, gestionnaire des projets Carbone, pour son investissement sans faille dans l'encadrement de mon TFE. Que ce soit au bureau, par mail, sur WhatsApp ou Teams, en Belgique, en Côte d'Ivoire, au Cameroun, ou en Suisse, Edouard a toujours été présent pour répondre à mes questions, faire part de son expertise et échanger de manière générale. Merci aussi pour la relecture et les conseils tout au long de ce travail. C'était un réel plaisir de bénéficier d'un tel encadrement.

Je souhaite également dire merci à la Chocolaterie Galler®, partenaire du laboratoire de Foresterie Tropicale de la Faculté de Gembloux. Ce projet de durabilité est né de leur initiative, et c'est grâce à eux que ce mémoire a pu voir le jour. Merci à l'équipe de la chocolaterie pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité. Je remercie aussi la Fondation Roi Baudouin pour le financement de ce projet. Merci également à l'ULiège qui m'a accordé une bourse afin d'assumer la majorité des coûts liés au voyage.

En tant que partenaire, je tiens à remercier la coopérative YEYASSO pour m'avoir accueilli pendant trois mois. Son directeur général, M. Yeo Y. Moussa, m'a encadré et intégré au sein de l'équipe, coordonnant tous les membres pour assurer la réussite de mes activités. Au-delà de son professionnalisme, je le remercie également de m'avoir ouvert les portes de son foyer. M. Ouattara Daba Karim, gestionnaire de projets, a également joué un rôle crucial dans cette étude. Karim, dont la force de travail m'a marqué, a été pour moi bien plus qu'un simple tuteur, devenant un véritable grand frère. Il m'a aidé à coordonner les activités, à échanger les fichiers, et m'a aussi accueilli chez lui, me faisant de plus découvrir la région.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les producteurs relais, membres de Yeyasso, qui m'ont accompagné dans les champs de cacao. Leur connaissance du terrain, leurs relations avec les producteurs, leur engagement au travail et leur bonne humeur ont été des éléments indispensables à ce projet. Grâce à eux, j'ai été sérieusement aidé et j'ai vécu une expérience magnifique. Un merci tout particulier à Vemo Bakayoko, Gue Kla Michel, Gbongue Rickson Diomande et leurs familles respectives qui m'ont hébergé, nourri et tutoré dans leurs villages. Ils m'ont permis de découvrir la culture locale, de savourer les repas typiques et d'apprendre les langues locales. Vous avez particulièrement bien illustré les valeurs du « pays de l'hospitalité » ! Merci pour cet enrichissement culturel, qui, je l'espère, a été réciproque.

À tous les producteurs qui m'ont accueilli dans leurs champs et partagé mes journées de terrain : merci infiniment. Je n'oublierai jamais votre bienveillance, votre dévouement, nos échanges, ainsi que les avocats, les mangues, les ananas, les papayes, et toutes les autres merveilles que vous m'avez offertes.

Je tiens à remercier le Pr. Yves Brostaux pour son aide précieuse et sa disponibilité face à mes questions sur la statistique. Un grand merci également au Pr. Gauthier Ligot pour son assistance dans l'élaboration du modèle allométrique. Merci à Guillaume Nève (Nature+) pour sa relecture attentive.

Je souhaite aussi adresser un clin d'œil à tous les membres du laboratoire de foresterie tropicale, où j'ai trouvé un cadre de travail idéal. Leur bonne humeur constante, l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée, les tartes du lundi, le café et les parties de spikeball me manquent déjà. Ce cadre de travail m'a vraiment permis de maintenir une productivité constante, et je suis reconnaissant pour le bureau qui m'a été prêté.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents et ma fraterie. Grâce à leur soutien financier et émotionnel, j'ai pu vivre sereinement mon expérience et travailler sur un sujet qui me passionne, à l'autre bout du monde. Leur éducation m'a doté des capacités d'adaptation et de résilience nécessaires pour réussir dans cette aventure. Ce n'était pas simple d'être loin de la maison alors que maman faisait face aux défis cruels de la vie. J'espère que me voir épanoui t'a aidé et continuera de t'aider à surmonter les épreuves. Merci.

Et pour terminer, évoquer le mot « carbone » 200 fois dans ce TFE m'a systématiquement fait penser à mon fidèle vélo, fièrement composé de cette matière... Gros big up à cette échappatoire qui s'est avérée salvatrice et indispensable pour moi ! Merci le sport !

RÉSUMÉ

- Contexte** Au vu des effets dévastateurs de la cacao-culture sur les terres forestières, il est indispensable de trouver un moyen permettant la conservation des arbres au sein des champs. L'agroforesterie apparaît comme une solution idéale, combinant notamment rendements agricoles sur le long terme, diversification des revenus, stockage de carbone et préservation de la biodiversité.
- Objectifs** Ce mémoire a pour ambition d'installer un dispositif permanent représentatif de la cacao-culture pratiquée par la coopérative partenaire. Ceci, en vue de quantifier et d'assurer le suivi dans le temps de la biodiversité ligneuse et des stocks de carbone.
- Localisation** Coopérative agricole YEYASSO COOP – CA de Man, district des Montagnes, dans l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire. La Coopérative est divisée en 6 sections selon un gradient géographique.
- Méthodes** Deux types de dispositifs permanents ont été implémentés au sein d'un échantillonnage représentatif des champs agroforestiers des différentes sections de la coopérative. Le premier a consisté à marquer, géo-référencer, mesurer et identifier tous les arbres ($d_{hp} \geq 10$ cm) dans 5% parcelles de la coopérative. Le second a servi à déterminer la densité de plantation de cacao des parcelles via des placettes aléatoires implantées dans ces champs. La diversité botanique a ensuite été analysée et la biomasse estimée à l'aide d'équations allométriques. Le carbone organique du sol a été défini sur base de la littérature scientifique.
- Résultats** 124 espèces d'arbre ont été observées sur la surface prospectée (70,42 ha). La richesse spécifique est similaire entre les sections de Yapeu, Bogouine, Douele et elle est supérieure aux sections de Gan et Man-Gbombelo. Au niveau du stockage de carbone, un champ agroforestier à cacaoyers stocke en moyenne 77,6 tC/ha à travers la biomasse (souterraine et aérienne) et le sol, dans cette région de la Côte d'Ivoire. La section de Gan séquestre significativement plus de carbone dans la biomasse des arbres d'ombrage que les autres sections. Les arbres de $d_{hp} \geq 60$ cm, soit 6% des tiges, stockent 63% du carbone total des arbres d'ombrage à travers la biomasse aérienne et souterraine.
- Conclusions** L'agroforesterie menée par la Coopérative permet le maintien d'une diversité ligneuse non négligeable. Le stockage de carbone moyen est inférieur à celui observé dans les agroforêts du Cameroun mais supérieur à celui déjà observé en Côte d'Ivoire. Les arbres de gros diamètre jouent un rôle crucial dans le stockage de carbone. L'étude souligne l'importance de préserver les grands arbres et de promouvoir des pratiques agroforestières durables à travers des mécanismes internationaux, dont les paiements pour services environnementaux.
- Mots clés** Agroforesterie, cacao, biomasse, carbone, biodiversité ligneuse, arbres d'ombrage, dispositif permanent, allométrie, crédit carbone, forêt tropicale, Afrique de l'Ouest, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

- Context** Given the devastating effects of cocoa on forest lands, it is essential to find a way to conserve trees in the fields. Agroforestry appears to be an ideal solution, combining long-term agricultural yields, income diversification, carbon storage and biodiversity conservation.
- Objectives** This thesis aims to install a permanent device representative of the cocoa-culture practiced by the cooperative partner, to quantify and ensure the monitoring of woody biodiversity and carbon stocks over time.
- Location** Agricultural cooperative YEYASSO COOP – Man, Mountain district, in the far west of Ivory Coast. The Cooperative is divided into 6 sections according to a geographical gradient.
- Methods** Two types of permanent devices were implemented within a representative sample of agroforestry fields in the different sections of the cooperative. The first was to mark, geo-reference, measure and identify all trees (dbh \geq 10 cm) in 5% of the cooperative's fields. The second was used to determine the density of cocoa plantation fields through random plots implanted in these fields. The botanical diversity was then analyzed and the biomass estimated using allometric equations. Soil organic carbon was defined based on scientific literature.
- Results** 124 tree species were observed on the surveyed area (70.42 ha). The specific wealth is similar between the sections of Yapeu, Bogouine, Douele and it is superior to the sections of Gan and Man-Gbombelo. In terms of carbon storage, an agroforestry field with cocoa trees stores on average 77.6 tC/ha through biomass (under- and below- ground) and soil in this region of Ivory Coast. The Gan section significantly captures more carbon in the shade tree biomass than other sections. Trees with dbh \geq 60 cm, accounting for only 6% of the stems, store 63% of the total carbon of shade trees through below- and under- ground biomass.
- Conclusions** The agroforestry carried out by the cooperative allows the maintenance of a considerable diversity of wood. The average carbon storage is lower than that observed in agroforestry in Cameroon but higher than that already observed in Côte d'Ivoire. Large diameter trees play a crucial role in carbon storage. The study highlights the importance of preserving tall trees and promoting sustainable agroforestry practices through international mechanisms, including payments for environmental services.
- Keywords** Agroforestry, cocoa, biomass, carbon, woody biodiversity, shade trees, permanent device, allometry, carbon credit, tropical forest, West Africa, Ivory Coast.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| I. INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1. Agriculture et forêts tropicales : un conflit éternel..... | 1 |
| 1.2. La Côte d’Ivoire : un pays déforesté..... | 1 |
| 1.3. Le cacao, moteur de la déforestation en Côte d’Ivoire..... | 2 |
| 1.4. L’agroforesterie : la clé de la durabilité ?..... | 5 |
| 1.5. Services écosystémiques dans les champs agroforestiers..... | 7 |
| 1.5.1. Contribution à la séquestration du carbone des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers..... | 7 |
| 1.5.2. Conservation de la biodiversité..... | 8 |
| 1.6. Valorisation des services écosystémiques..... | 9 |
| 1.7. Contexte et Objectifs de l’étude..... | 11 |
| II. MATÉRIEL ET MÉTHODE..... | 12 |
| 2.1. Présentation de la zone d’étude..... | 12 |
| 2.2. Échantillonnage des parcelles..... | 13 |
| 2.3. Dispositif permanent..... | 14 |
| 2.3.1. Arbres d’ombrages..... | 14 |
| 2.3.1.1. Diamètre..... | 15 |
| 2.3.1.2. Hauteur..... | 16 |
| 2.3.1.3. Déterminations botaniques..... | 16 |
| 2.3.1.4. Encodages..... | 17 |
| 2.3.2. Cacaoyers..... | 17 |
| 2.4. Cartographie..... | 20 |
| 2.5. Evaluation de la biodiversité ligneuse..... | 20 |
| 2.5.1. Paramètres structuraux..... | 20 |
| 2.5.2. Indices et estimateurs de diversité..... | 20 |
| 2.5.2.1. Ressemblance entre les strates (composition floristique)..... | 20 |
| 2.5.2.2. Biodiversité des sections (richesse floristique)..... | 21 |
| 2.6. Biomasse et stocks de carbone..... | 22 |
| 2.6.1. Quantification..... | 22 |
| 2.6.2. Facteurs d’analyse..... | 23 |
| 2.6.3. Modélisation..... | 24 |
| III. RÉSULTATS..... | 25 |
| 3.1. Rendement d’inventaire..... | 25 |
| 3.2. Cartographie de la zone d’étude..... | 27 |
| 3.3. Biodiversité..... | 28 |
| 3.3.1. Structure et composition globale du peuplement ligneux..... | 28 |
| 3.3.2. Comparaison des communautés entre sections..... | 30 |
| 3.3.3. Richesse spécifique..... | 31 |
| 3.3.3.1. Courbes d’accumulation en espèces..... | 31 |
| 3.3.3.2. Nombre d’espèces..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3.3. Indices de richesse spécifique..... | 34 |
| 3.4. Biomasse et Carbone | 34 |
| 3.4.1. Résultats globaux | 34 |
| 3.4.2. Contribution des espèces agroforestières..... | 35 |
| 3.4.2.1. Contribution absolue | 35 |
| 3.4.2.2. Contribution spécifique | 35 |
| 3.4.2.3. Contribution par classe diamétrique | 36 |
| 3.4.3. Effet des facteurs « section » et « classe d'âge » | 37 |
| 3.4.3.1. Facteur « section »..... | 37 |
| 3.4.3.1.1. Arbres d'ombrages..... | 37 |
| 3.4.3.1.2. Cacaoyers..... | 38 |
| 3.4.3.1.3. Global (arbres d'ombrage + cacaoyers)..... | 39 |
| 3.4.3.2. Facteur « classe d'âge » | 40 |
| 3.4.3.2.1. Arbres d'ombrages..... | 40 |
| 3.4.3.2.2. Cacaoyers..... | 41 |
| 3.4.3.2.3. Global (arbres d'ombrage + cacaoyers)..... | 42 |
| 3.4.4. Relations allométriques | 43 |
| 3.4.4.1. Diamètre – hauteur (arbres d'ombrage) | 43 |
| 3.4.4.2. Diamètre moyen – âge de la plantation (cacaoyers)..... | 44 |
| IV. DISCUSSION..... | 45 |
| 4.1. Biodiversité ligneuse des champs agroforestiers | 45 |
| 4.2. Stock de carbone des champs agroforestiers à cacaoyers | 47 |
| 4.2.1. Stockage global | 47 |
| 4.2.2. Contribution par essences | 48 |
| 4.2.3. Contribution par classes de diamètre | 48 |
| 4.2.4. Différences entre les sections de la coopérative..... | 48 |
| 4.2.5. Différences entre les classes d'âge des plantations | 49 |
| 4.3. Allométrie | 49 |
| 4.3.1. Relation Diamètre – Hauteur | 49 |
| 4.3.2. Relation âge de la plantation – diamètre moyen des cacaoyers..... | 50 |
| 4.4. Limites de l'étude..... | 50 |
| 4.5. Perspectives | 51 |
| V. CONCLUSION..... | 53 |
| VI. CONTRIBUTION PERSONNELLE DE L'ÉTUDIANT | 54 |
| VII. BIBLIOGRAPHIE | 55 |
| VIII. ANNEXES..... | 66 |

TABLE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1- Classement des 10 premiers pays producteurs de fèves de cacao dans le monde, sur base des chiffres de la FAO (2022). Les chiffres sont exprimés en milliers de tonnes de fèves récoltées..... | 3 |
| Figure 2 - La boucle du cacao (Source : « La culture du cacao en Côte d'Ivoire », https://medium.com/@Nanaboa/la-culture-du-cacao-en-c%C3%B4te-divoire-8df8254af304). L'extrême Ouest (région de Man) fait désormais partie de la boucle. | 4 |
| Figure 3 - Régions et couvert forestier (Treecover selon Hansen, 2000) de la Côte d'Ivoire [à gauche] ; Répartition des plantations de cacao par régions (Kalischek et al., 2023) [à droite]..... | 4 |
| Figure 4 - Dynamique de stockage de carbone dans la biomasse ligneuse de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au centre-Cameroun (Saj et al., 2019)..... | 7 |
| Figure 5- Cartographie de la zone d'étude. | 13 |
| Figure 6- Superficie totale [ha] des champs de la coopérative affiliés à Galler® pour chaque sous-région (strates). | 13 |
| Figure 7- Surfaces échantillonnées (axe Y, en ha) par section selon l'objectif initial de 5%. Il a été préféré que l'échantillonnage réel de 5% soit systématiquement légèrement supérieur, plutôt qu'inférieur. | 14 |
| Figure 8- Mesure du dhp au-delà des contreforts (déformation) [à gauche] ; Mesures distinctes du dhp et numérotation spécifique pour un arbre fourchu avant 1m30 [à droite].. | 15 |
| Figure 9- Nettoyage du tronc (épiphytes) à la machette pour mesurer le DHP [à gauche] ; Mesure du DHP après avoir éliminé les épines sur un fromager (Ceiba pentandra L.) [à droite]. | 16 |
| Figure 10- Encodage des informations sur le questionnaire FarmForce et marquage de l'arbre [à gauche] ; Double-trait pour assurer le suivi de la croissance des arbres et numérotation de l'arbre [à droite]..... | 17 |
| Figure 11- Cercle tracé dans la litière correspondant à la limite de la placette d'échantillonnage (EXT = extérieur à la placette, INT = intérieur de la placette) [à gauche] ; Disposition du Vertex au pied du cacaoyer proche du point GPS généré aléatoirement, le centre de la placette d'un rayon de 6 mètres [à droite]. | 18 |
| Figure 12- Mesure du diamètre des cacaoyers à 30 centimètres du sol, suivie directement du marquage à la peinture pour ne pas les mesurer deux fois. | 19 |
| Figure 13- Une placette d'échantillonnage de cacao : le cacaoyer central [à gauche] et les cacaoyers inventoriés [à droite] | 19 |
| Figure 14 – Cartographie des parcelles rattachées aux différentes sections de la coopérative (Yeyasso) et parcelles faisant partie de l'échantillonnage de chaque section. La couleur de fond illustre le relief local (cf. Figure 5). | 26 |
| Figure 15 - Projection cartographie du dispositif permanent installé dans un champ agroforestier (producteur : Oulai Moussa Edmond, section de Yapleu)..... | 27 |
| Figure 16- Distribution de l'abondance des arbres d'ombrages par classes diamétriques..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Figure 17 - Abondances relatives (%) des familles botaniques à travers l'ensemble de la coopérative (70,42 ha). | 29 |
| Figure 18- Ordination NMDS des sections sur base de leur composition en espèce. Les ellipses rapprochées traduisent une similarité entre les milieux. | 30 |
| Figure 19 - Courbe d'accumulation en espèces pour l'ensemble de la coopérative (sans distinction par section). L'effort d'échantillonnage (axe X, en ha) est de 70,42 hectares, permettant d'observer 124 espèces (axe Y, en nombre d'espèces). La courbe atteint un plateau, synonyme d'un échantillonnage suffisant et que l'estimation du nombre réel d'espèces dans la zone sera robuste..... | 32 |
| Figure 20- Courbe d'accumulation en espèces par section. L'effort d'échantillonnage (axe X, en ha) diffère selon la section, et le nombre d'espèces observées (axe Y, en nombre d'espèces) aussi (Tableau 8). | 33 |
| Figure 21 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages uniquement, par section. | 37 |
| Figure 22 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux cacaoyers uniquement, par section. | 38 |
| Figure 23 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages et aux cacaoyers, par section..... | 39 |
| Figure 24 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages uniquement, par classe d'âge de plantation (Jeune \leq 15 ans ; Mature $>$ 15 ans)..... | 40 |
| Figure 25 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux cacaoyers uniquement, par classe d'âge de plantation (Jeune \leq 15 ans ; Mature $>$ 15 ans)..... | 41 |
| Figure 26 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages et aux cacaoyers, par classe d'âge de plantation (Jeune \leq 15 ans ; Mature $>$ 15 ans)..... | 42 |
| Figure 27 - Nuage de points correspondant aux données d'inventaires ; Axe X = dhp (en cm), Axe Y = hauteur (en m). Le modèle allométrique DHP- Hauteur établi est représenté par la courbe rouge. Les autres modèles testés sont disponibles en annexe 8..... | 43 |
| Figure 28 - Distribution des résidus du modèle allométrique DHP- Hauteur..... | 43 |
| Figure 29 - Nuage de points correspondant aux données d'inventaires et modèle allométrique Age de la plantation – diamètre moyen établi (droite rouge) sur base des relevés de terrain..... | 44 |
| Figure 30 - Distribution des résidus du modèle âge de la plantation – diamètre moyen. | 44 |
| Figure 31 – Vue aérienne d'un champ agroforestier prospecté lors de la mission de terrain (Section de Bogouine). Photo par ©Edouard Coenraets..... | 45 |
| Figure 32 - Une bordure de champ, réel vestige de forêt à préserver..... | 52 |

TABLE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 – Stockage de carbone par hectare, en tonnes (tC/ha), correspondant à la somme des biomasses souterraines et aériennes des arbres d’ombrages et des cacaoyers pour différentes études réalisées dans d’importants pays producteurs. | 8 |
| Tableau 2- Effort d'échantillonnage des cacaoyers par surface de plantation. | 19 |
| Tableau 3- Formules du nombre de tiges par hectare (NHA) et de la surface terrière (GHA). . | 20 |
| Tableau 4- Equations allométriques utilisées pour définir la biomasse des arbres d'ombrage, des palmiers et des cacaoyers. | 22 |
| Tableau 5 - Classement des 15 essences les plus abondantes dans les champs. L'abondance relative a été définie comme le nombre de tiges de l'espèce par rapport au nombre total de tiges. La dominance relative a été définie comme la surface terrière (GHA) de l'espèce par rapport à la surface terrière globale des arbres d'ombrage. | 29 |
| Tableau 6- Indice de Jaccard pour chaque section prises deux à deux. Une valeur proche de 1 signifie des milieux similaires. | 30 |
| Tableau 7- Classement des 10 espèces les plus abondantes par section (A. rel = Abondance relative, en %). Les cases colorées mettent en évidence les essences présentes uniquement dans le top 10 de la section lui conférant son « originalité ». Les sections de Man-Gbombelo et Gan contiennent d’avantage d’espèces uniques. | 31 |
| Tableau 8 - Richesse spécifique observée et estimée selon Chao, Jackknife 1 et Jackknife 2 et leurs écart-types (se). | 33 |
| Tableau 9- Indice de Shannon, Simpson et Equitabilité de Piélou par section..... | 34 |
| Tableau 10 - Stockage de carbone total (biomasse souterraine et aérienne des arbres d’ombrages et des cacaoyers + carbone organique du sol) associé aux champs agroforestiers de Yeyasso. Les résultats sont pondérés par la superficie de chaque section ainsi que par le stockage par hectare propre à chacune d’elle. L'équivalent CO ₂ est également exprimé en t/ha. | 34 |
| Tableau 11 - Classement des 10 essences les plus participatives au stockage de carbone, dans l’absolu. | 35 |
| Tableau 12 - Classement des 10 essences les plus participatives au stockage de carbone (contribution spécifique)..... | 36 |
| Tableau 13- Contribution de chaque classe de diamètre au stockage de carbone total. Les chiffres de carbone découlent de la biomasse totale des arbres (AGB + BGB). | 36 |
| Tableau 14 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare contenue dans les arbres d’ombrages, surfaces terrières et densités moyennes associées. La section de Gan stocke significativement plus de carbone par hectare que la section de Man-Gbombelo..... | 37 |
| Tableau 15 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare contenue dans les cacaoyers, surfaces terrières, densités moyennes et erreurs standards associées. Douele est significativement plus dense que Gan mais cela n’a pas d’influence sur les stocks de carbone. | 39 |

| | |
|--|----|
| Tableau 16 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare au total (arbres d'ombrages + cacaoyers), et surfaces terrières moyennes associées. | 40 |
| Tableau 17 – Quantité moyenne de carbone stockée par hectare dans les arbres d'ombrages pour chaque classe d'âge, surfaces terrières et densités moyennes, erreurs standards associées. La classe d'âge n'a pas d'effet significatif sur le stockage de carbone par les arbres d'ombrages. Bien que la densité diffère, il n'y a pas de différence significative. La GHA n'est pas significativement différente non plus. | 41 |
| Tableau 18 - Quantité de carbone stockée par hectare dans les cacaoyers pour chaque classe d'âge et erreur standard associée. La classe d'âge a un effet significatif sur le stockage de carbone par les cacaoyers. | 41 |
| Tableau 19 - Quantité de carbone stocké par hectare au total (arbres d'ombrages + cacaoyers) pour chaque classe d'âge et erreur standard associée. La classe d'âge n'a pas d'effet significatif sur le stockage de carbone total. | 42 |

TABLE DES ANNEXES

| | |
|---|----|
| Annexe 1 : Liste des producteurs issus de l'échantillonnage stratifié à fractions sondées constantes. La somme des surfaces pour chaque sous-section est légèrement supérieure à 5% de la surface totale de la sous-section. Les cases vertes correspondent aux parcelles prospectées, les rouges n'ont pas pu être visitées par manque de temps. | 66 |
| Annexe 2 : Illustrations par Picard et al. (2008) indiquant comment relever correctement le diamètre des arbres selon plusieurs cas de figure. Le trait rouge correspond à l'endroit où doit être réalisée la mesure du diamètre, suivie du marquage à la peinture..... | 67 |
| Annexe 3 : Exemple de confection d'un herbier de terrain, comme réalisé lors de cette mission. Sur le terrain : 2 cartons bien rigides renferment une pile de journaux, le tout étant maintenu par des sangles. Les journaux servent à interposer et faire sécher les échantillons prélevés. Utiliser une vue de journal par échantillon, en mentionnant le plus possible d'informations de collecte : date, lieux, numéro de l'arbre, nom du propriétaire de la parcelle, traits caractéristiques de l'arbre (odeur, tranche, port, etc.). Ces informations doivent impérativement être écrites au crayon à papier. Une fois revenu du terrain, les échantillons doivent passer sous un système de presse. 2 palettes comprimées par des sangles et/ou autres charges lourdes, peuvent être utilisées à cet effet. Faire usage d'une chaleur tournante pour sécher les échantillons uniformément. Au besoin, changer les journaux (en conservant les informations) pour éviter que les échantillons ne pourrissent. | 68 |
| Annexe 4 : Questionnaire FarmForce utilisé sur le terrain pour encoder les informations. La version électronique a permis de réaliser les encodages sur une tablette. De cette manière, un fichier Excel contenant les relevés est directement créé. | 69 |
| Annexe 5 : Utilisation du pied à coulisse numérique pour mesurer les plants de cacao trop fins. La mesure est relevée à 30 centimètres du sol. Le bâton que tient l'opérateur dans sa | |

| | |
|--|----|
| main gauche mesure exactement 30 centimètres et permet de savoir rapidement où doit se situer la mesure. | 73 |
| Annexe 6 : Carnet utilisé pour récolter les informations relatives aux placettes d'estimation de la densité des cacaoyers. La mention « GPS » correspond aux coordonnées du point généré aléatoirement sur QGIS. La mention « GPS CACAOYER » correspond aux coordonnées du cacaoyer central de la placette, le plus proche du point généré aléatoirement. Chaque cacaoyer est inventorié via la mesure de son diamètre à 30 centimètres du sol, ils sont séparés par « - ». Lorsque qu'un cacaoyer se divise en plusieurs tiges à la base, les différentes tiges sont mesurées et séparées par « / ». Ensuite, chaque placette est encodée sur Excel (marquée d'un V lorsque cela a bien été fait). | 74 |
| Annexe 7 : Liste des 124 espèces inventoriées par l'échantillonnage des parcelles. | 75 |
| Annexe 8 : Autres modèles allométriques (Hauteur – Diamètre) possibles : | 78 |
| Annexe 9 : Espèces reprises sur la liste rouge de l'UICN (VU = Vulnérable) (The IUCN Red List of Threatened Species)..... | 80 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|-----------------------------------|---|
| AGB | AboveGround Biomass ; biomasse aérienne des ligneux associée au tronc et au houppier des arbres |
| BGB | BelowGround Biomass ; biomasse souterraine des ligneux associée aux racines |
| BT | Biomasse Totale ; somme de l'AGB et de la BGB, elle reprend la biomasse totale des ligneux |
| DHP | Diamètre à Hauteur de Poitrine. Il est, par convention, fixé à 1 mètre 30 au-dessus du sol et détermine la hauteur standard de mesure du diamètre des arbres. |
| EU ETS | European Union Emissions Trading System ; Système d'Échange de Quotas d'Émission de l'Union Européenne. |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| KW | Kruskal-Wallis |
| NMDS | Non-Metric Dimensional Scaling |
| OIPR | Office Ivoirien des Parcs et Réserves |
| PR | Producteur Relais |
| PSE | Paiement pour Services Environnementaux |
| REDD | Réduction des Émissions de gaz à effet de serre dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SODEFOR | SOCIÉTÉ DE DÉVELOPPEMENT DES FORÊTS (CÔTE D'IVOIRE) |
| tC/ha – tCO₂/ha | Tonnes de carbone/dioxyde de carbone par hectare |
| USD | United States Dollar ; dollar des États-Unis |
| VCM | Voluntary Carbon Market ; Marché volontaire du carbone |

I. INTRODUCTION

1.1. Agriculture et forêts tropicales : un conflit éternel

Depuis 1900, le couvert forestier africain a diminué de 35 à 55%, selon les estimations (Sodhi et al., 2009; Ter Steege et al., 2015). Avec 3,9 millions d'hectares de forêt perdus annuellement entre 2010 et 2020, l'Afrique est actuellement le continent le plus touché par la déforestation (FAO, 2020). Selon Aleman et al. (2017), les terres forestières d'Afrique de l'Ouest comptaient historiquement 42,5 millions d'hectares, répartis entre le Bénin, le Ghana, la Guinée, la Côte d'Ivoire, le Liberia, la Sierra Leone et le Togo et elles auraient régressé de 82,5 % en un siècle.

Dans cette région, l'expansion agricole est la principale cause de la déforestation, contribuant à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, à la perte de biodiversité et à la dégradation des services écosystémiques. De 2011 à 2015, entre 90 et 99 % de la déforestation dans les tropiques étaient attribués à l'agriculture (Pendrill et al., 2022).

La conversion des forêts en plantations de palmiers à huile, de caoutchouc et de cacao, ainsi que l'expansion de l'agriculture sur brûlis liée à la croissance démographique, les feux de brousse incontrôlés et l'exploitation forestière non durable sont les principales causes de la réduction du couvert forestier (Norris et al., 2010; Yao Sadaïou Sabas et al., 2020). Selon Hansen et al. (2008), en Afrique de l'Ouest, les espèces de bois les plus intéressantes commercialement ont été exploitées à un niveau bien supérieur à leur capacité de régénération entre 1996 et 2005.

Dans un premier temps, la dégradation des forêts est souvent rentable pour les populations rurales et, par conséquent, largement pratiquée par celles-ci. Une étude menée au Ghana et au Burkina Faso révèle que les populations rurales bénéficient souvent de l'élimination des forêts, car elles tirent généralement autant de profits, voire plus, des cultures que de l'environnement forestier (Pouliot et al., 2012). Aujourd'hui, environ 65 % des habitants du continent dépendent de l'agriculture pour leur subsistance (Yao Sadaïou Sabas et al., 2020).

1.2. La Côte d'ivoire : un pays déforesté

“Le succès de ce pays repose sur l'agriculture”. Cet adage populaire résume le modèle économique adopté par la Côte d'Ivoire dès son indépendance, en 1960 (Tano, 2021). Force est de constater que les résultats sont là : 60 ans plus tard, la Côte d'Ivoire est un réel leader mondial en termes de productions agricoles. Selon les chiffres de la FAO (FAOSTAT), en 2022, le pays était premier producteur mondial de fèves de cacao (*Theobroma cacao*) et de noix de cajou (*Anacardium occidentale*). La production de caoutchouc (*Hevea brasiliensis*) place la nation en quatrième producteur mondial, derrière la Thaïlande, l'Indonésie et le Viêt Nam. La Côte d'Ivoire est également grande productrice de café (*Coffea sp.*) et d'huile de palme (*Elaeis*

guineensis), le pays se plaçant respectivement en tant que cinquième et troisième producteur africain.

Cette dynamique de plantation ne s'est pas développée sans conséquence. La grande victime de cette politique agricole est la forêt. Les défrichages désorganisés, les feux de brousse et l'exploitation forestière excessive sont systématiquement désignés comme les principaux responsables de la destruction du patrimoine forestier ivoirien (Tano, 2021).

Le gouvernement de la Côte d'Ivoire n'est cependant pas resté totalement passif face à la dégradation de son riche écosystème forestier. De nombreuses initiatives, décisions, projets et actions ont jalonné la politique forestière du pays depuis son indépendance. Plusieurs institutions, comme l'OIPR (Office Ivoirien des Parcs et Réserves) et la SODEFOR (Société de Développement des Forêts) en sont à l'origine. Des mesures telles que la désignation de forêts classées, de réserves naturelles et de parcs nationaux, ainsi que des programmes de reboisement ou encore une législation comprenant un Code forestier (en 1995 et en 2014) ont été réfléchies. Cependant, les intentions de l'État restent ambivalentes. D'une part, il exprime un désir de protéger la forêt et d'autre part, il promeut une agriculture performante, souvent dévastatrice pour le patrimoine forestier. En dépit des efforts annoncés par les autorités, la superficie forestière continue de décroître (Kouadio et al., 2021; Tano, 2021).

La forêt ivoirienne, dont la superficie était estimée à plus de 16 millions d'hectares dans les années 1950, a considérablement diminué pour atteindre 9 millions d'hectares en 1965, 2,7 millions d'hectares en 1991 et seulement 1,385 million d'hectares en 2009. Selon les chiffres, la perte du couvert forestier ivoirien est ainsi estimée à 83,6% (Brou et al., 2005; Koné et al., 2014; Kouadio et al., 2021).

1.3. Le cacao, moteur de la déforestation en Côte d'Ivoire

Le cacao est un pilier économique en Côte d'Ivoire, contribuant à environ 15% du produit intérieur brut (PIB) et à 40% des recettes d'exportation du pays. Près d'un million de producteurs dépendent de ce secteur, fournissant des revenus à cinq millions de personnes, soit un cinquième de la population nationale (Tano, 2012; Situation Economique en Côte d'Ivoire (Vol. 2)). Le plus souvent, les champs se transmettent au sein de la famille et sont de taille relativement modeste, généralement inférieure à 2 hectares, allant jusqu'à 5 hectares (de Lattre-Gasquet et al., 1998). Pour autant, l'ensemble des producteurs ivoiriens assurent près de 40% de la production mondiale. Les 2230 tonnes de fèves de cacao, récoltées en 2022 (FAOSTAT), représentent le double de la production du Ghana, deuxième producteur mondial (Figure 1).

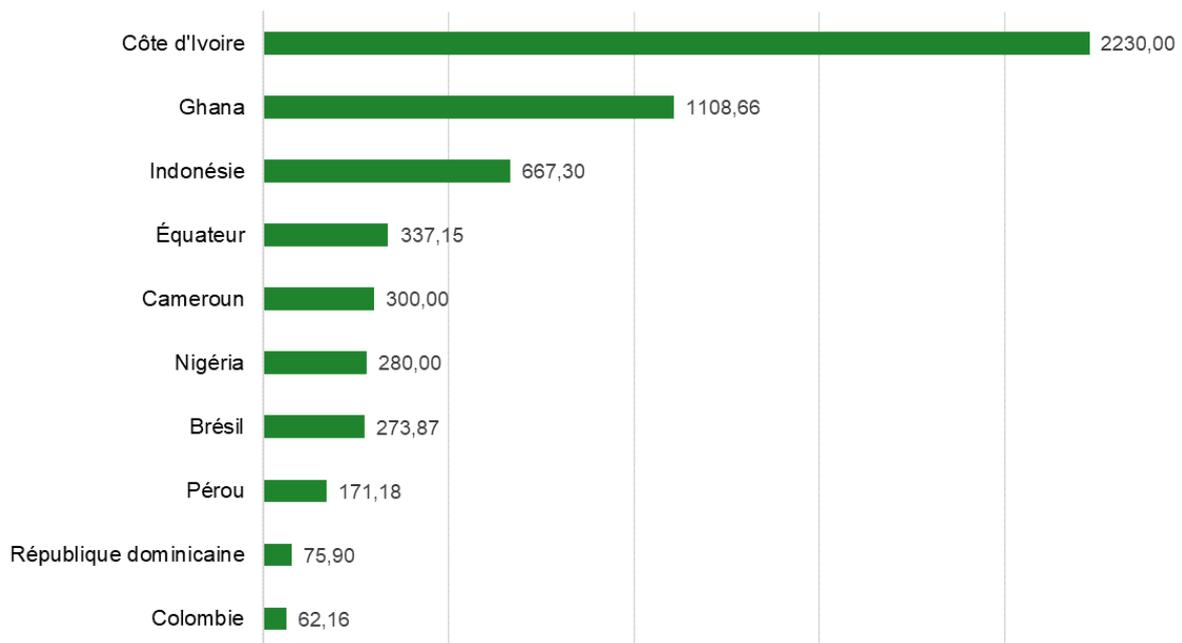


Figure 1 - Classement des 10 premiers pays producteurs de fèves de cacao dans le monde, sur base des chiffres de la FAO (2022). Les chiffres sont exprimés en milliers de tonnes de fèves récoltées.

Malgré son importance économique, sociale et traditionnelle, le secteur du cacao n'atteint pas pleinement son potentiel de développement. Plus de la moitié des producteurs vivent sous le seuil de pauvreté, avec moins de 757 francs CFA (1,15 euro) par jour, et l'expansion des terres cultivées a entraîné la déforestation de presque toutes les forêts du pays (Oomes et al., 2016; Situation Economique en Côte d'Ivoire (Vol. 2)). La culture du cacao est responsable de plus de 37% de la perte de forêt dans les zones protégées en Côte d'Ivoire (Barima et al., 2016; Kouadio et al., 2021; Kouassi et al., 2021; Kalischek et al., 2023).

Le duo cacao-café, pièce maîtresse de l'agriculture ivoirienne, s'étend depuis toujours par vagues successives sur l'entièreté du territoire au détriment de la forêt. La conséquence directe est l'expansion vers de nouveaux massifs forestiers, y compris protégés, lorsque la fertilité décroît (Dabalén et al., 2014; Ruf, 2018; Tano, 2021).

En effet, la fertilité des sols diminue à mesure que les vergers vieillissent, les parasites et les maladies se développent, et la pollinisation perd de son efficacité (Asaah et al., 2013). Au lieu de renouveler les vieilles plantations, les agriculteurs ivoiriens ont préféré migrer pour établir de nouvelles cacaoyères sur des terres encore fertiles (Ruf et al., 2015). Initialement concentrée dans l'Est du pays, la disponibilité des terres forestières ailleurs a stimulé la migration de la culture du cacao. Elle a commencé à se déplacer dans les années 1970 vers les régions centre-Ouest et sud-Ouest (Chauveau et al., 1996; Ruf et al., 2004; Tano, 2021) (Figure 2).

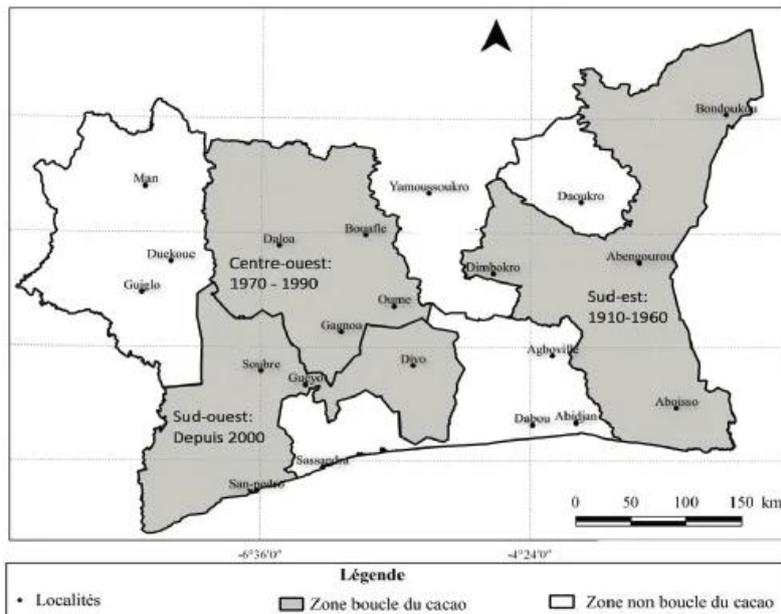


Figure 2 - La boucle du cacao (Source : « La culture du cacao en Côte d'Ivoire », <https://medium.com/@Nanaboa/la-culture-du-cacao-en-c%C3%B4te-divoire-8df8254af304>). L'extrême Ouest (région de Man) fait désormais partie de la boucle.

Ces vagues migratoires, souvent désignées sous le terme de "boucle du cacao", ont entraîné une pression foncière accrue, provoquant la fragmentation du paysage forestier et de nombreux conflits sociaux. Aujourd'hui, l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire (Man, District des Montagnes), pourtant à priori peu adapté à la cacao-culture, est devenu un centre majeur de la production de cacao dans le pays (Figure 3). Dans ce contexte, il est crucial de tirer des enseignements sur le passé afin de prévenir les défis associés à la culture du cacao, tels que la déforestation et ses impacts sur les populations (Yao Sadaïou Sabas et al., 2020).

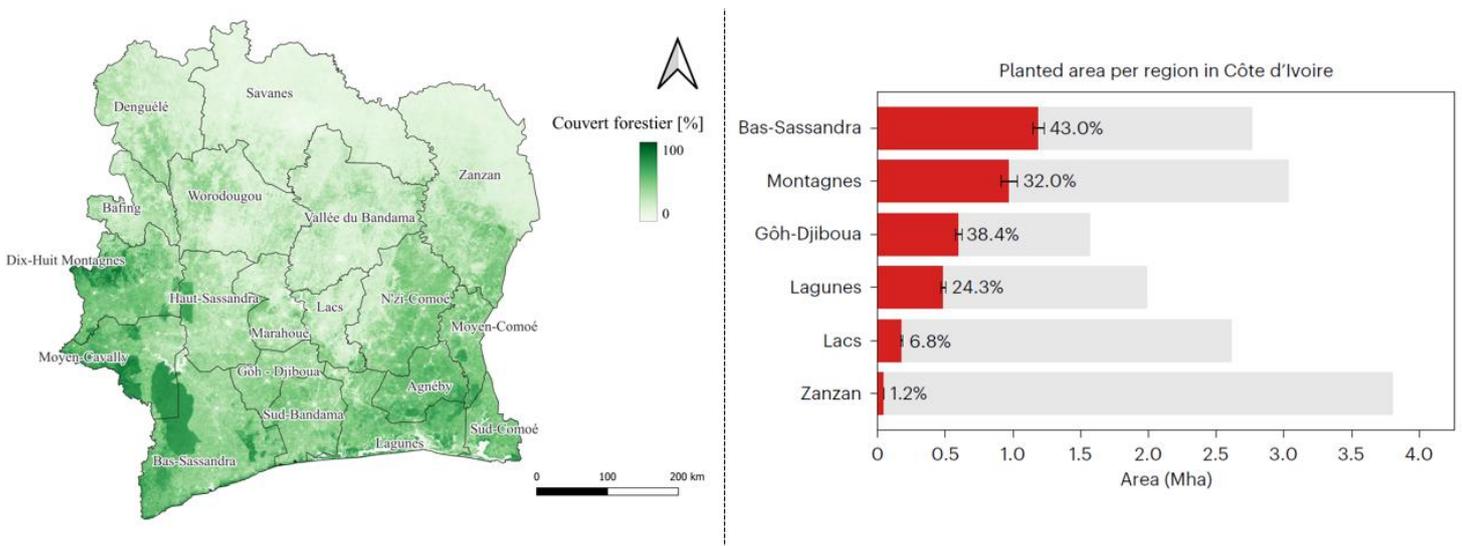


Figure 3 - Régions et couvert forestier (Treecover selon Hansen, 2000) de la Côte d'Ivoire [à gauche] ; Répartition des plantations de cacao par régions (Kalischek et al., 2023) [à droite].

Promouvoir une pratique efficace d'agroforesterie en intégrant des arbres aux plantations de cacaoyers pourrait favoriser la durabilité de la production de cacao en Côte d'Ivoire (Yao Sadaïou Sabas et al., 2020). En effet, l'agroforesterie permet d'harmoniser les bénéfices des arbres avec les moyens de subsistance des communautés grâce à la production agricole durable (Kouassi et al., 2021).

1.4. L'agroforesterie : la clé de la durabilité ?

En Côte d'Ivoire, la production de cacao se fait actuellement principalement dans deux types de systèmes : la forêt enrichie de cacaoyers (les systèmes agroforestiers traditionnels) et les monocultures. Bien que, dans les années 1960, la culture du cacao ait été initialement pratiquée sous couvert forestier, le gouvernement a encouragé ensuite la cacao-culture en plein soleil (Chauveau et al., 1996). L'argument était que le retrait des arbres augmenterait les rendements à court terme (Tscharntke et al., 2011; Koko et al., 2013; Andres et al., 2016). Ainsi, en 2009, entre 70 et 90% des plantations de cacao en Côte d'Ivoire avaient une densité de moins de 10 arbres par hectare (Assiri et al., 2009).

Pourtant, aujourd'hui, les producteurs ne négligent plus les bienfaits de la présence d'arbres dans leurs plantations. Les arbres, arbustes et arbrisseaux, délibérément conservés ou introduits par les agriculteurs, sont utilisés pour divers besoins. Les principaux intérêts trouvés en ces ligneux sont la consommation et la vente de fruits, la production de bois pour la construction ou comme combustible, la pharmacopée traditionnelle ou encore la nourriture pour le bétail (Ngom et al., 2014; Yao et al., 2016; Kougbo et al., 2020). En outre, cette pratique d'agroforesterie (Leakey, 2012), permet via la présence d'arbres d'atténuer l'impact des changements climatiques déjà perceptibles. Elle est ainsi répandue dans les pays tropicaux pour tenter de réduire les impacts négatifs de la conversion des terres forestières en terres agricoles (Gockowski et al., 2011).

Les systèmes agroforestiers sont identifiés comme des puits et stocks de carbone, pouvant parfois contenir jusqu'à 62% des stocks de carbone d'une forêt primaire (Tane Fomekong et al., 2023). En plus de la biomasse accumulée en surface, les arbres augmentent la teneur en carbone des sols grâce à leur biomasse racinaire, la litière qu'ils alimentent et l'élagage de leurs branches. La qualité des sols s'améliore, et les risques d'érosion sont réduits (Kuyah et al., 2016; Bayala et al., 2020). En effet, ces arbres, en plus d'offrir un ombrage apprécié pour les plants de cacao, contribuent à la fertilisation du sol (Yao et al., 2016). La teneur en nutriments, en particulier en azote et en phosphore, est nettement plus élevée dans les cacaoyères ombragées (Ofori-Frimpong et al., 2007; Blaser et al., 2017). De ce fait, les principaux facteurs de la diminution des rendements, tels que les pathogènes, l'ancienneté des cacaoyères et la baisse de la fertilité du sol (Wessel et al., 2015; Schaad et al., 2018), pourraient être atténués.

Une critique régulièrement attribuée aux systèmes agroforestiers est qu'ils sont moins productifs que les monocultures. Toutefois, les pratiques agroforestières compensent cette différence sur le moyen terme par une plus grande résilience face à la fluctuation des prix du

cacao et aux dommages des cultures, une pollinisation efficace, des rendements stables à long terme, une meilleure sécurité alimentaire grâce aux espèces fruitières, une durée de vie accrue des cacaoyers, une lutte naturelle contre les ravageurs, et la protection contre les vents violents (Jadán et al., 2015; Andres et al., 2016; Blaser et al., 2017).

Cette pratique se présente comme une opportunité pour lutter contre la pauvreté et conserver la biodiversité (Deheuvels, 2011). L'agroforesterie combine une production agricole avec des mesures de conservation de l'environnement (Schroth et al., 2011). Ces systèmes culturels sont, de ce constat, reconnus pour leur durabilité et sont éligibles aux mécanismes de Réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+) en raison de leur capacité à fournir de nombreux services écosystémiques.

L'association d'arbres au sein des champs ne doit cependant pas être réalisée de manière anarchique. L'effet des arbres d'ombrage sur le rendement à proprement dit du cacao n'est pas encore complètement défini (Snoeck et al., 2016). Il pourrait être en conflit avec des niveaux de production de cacao élevés ; soit supérieurs à une tonne par hectare de fèves de cacao (Saj et al., 2019).

Bien que la culture en plein soleil semble améliorer les rendements à court terme, les rendements chutent et la quantité de ravageurs augmente lorsque les cacaoyers atteignent 25 à 30 ans, entraînant régulièrement l'abandon des champs (Tscharntke et al., 2011). Selon Blaser et al. (2017) et Asare et al. (2019), un ombrage de 30% pourrait permettre d'atteindre des rendements similaires à ceux des monocultures, tout en motivant la séquestration du carbone et en améliorant la durabilité de la production. En 2017, le label UTZ (désormais rattaché à *Rainforest Alliance*) suggérait un nombre idéal de 12 à 144 arbres par hectare, soit une recommandation assez vague. De plus, les essences agroforestières associées au cacao doivent être prises en considération. Idéalement, les arbres d'ombrage doivent présenter un système racinaire profond pour éviter la compétition avec les racines du cacaoyer, et avoir un feuillage clairsemé, pour éviter le développement de pourritures (UTZ, 2017 cité par Heymans, 2020). A cet égard, certaines essences forestières telles que *Entandrophragma angolense*, *Trema orientalis*, *Albizia adianthifolia*, *Albizia zygia*, *Ceiba pentandra*, *Bombax buonopozense*, *Mansonia altissima*, *Milicia excelsa* et *Glyricidia sp.* sont considérées par les planteurs comme étant compatibles avec les cacaoyers (Isaac et al., 2007; Yao et al., 2016; Kougbo et al., 2020, 2023; Asitoakor et al., 2022). En outre, il convient d'éviter certaines espèces pouvant héberger des parasites : *Alstonia boonei*, *Pycnanthus angolensis* et *Ricinodendron heudelotii* (Kougbo et al., 2023).

Finalement, adopter et mettre en œuvre des technologies agroforestières permettrait d'améliorer la productivité des cultures vivrières en restaurant la fertilité des sols et en stimulant les fonctions agro-écosystémiques (Leakey, 2012). La domestication d'espèces indigènes utiles offrirait aux agriculteurs de nouvelles opportunités commerciales, améliorant ainsi leurs

conditions de vie. Ces mesures pourraient constituer un modèle pour une agriculture plus durable dans les régions tropicales (Asaah et al., 2013).

1.5. Services écosystémiques dans les champs agroforestiers

1.5.1. Contribution à la séquestration du carbone des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers

Plusieurs études ont crédité les arbres d'ombrage comme le principal réservoir de carbone dans les agroforêts à cacaoyers, stockant 75 à 90 % des stocks totaux. Le potentiel d'un système agroforestier à stocker des niveaux importants de carbone dépend principalement de la composition en espèces, de la densité des arbres et de l'âge de la plantation (Saj et al., 2019).

Pourtant, lorsqu'une plantation de cacaoyers est établie en forêt, c'est d'abord une importante libération de carbone qui se produit via l'abattage d'une partie des ligneux. Ensuite, tout au long de la croissance des cacaoyers et des arbres associés, le stockage de carbone augmente (Figure 4) jusqu'à atteindre, parfois, un niveau proche de celui d'un système forestier (Saj & Jagoret, 2017). Certaines études pointent tout de même une diminution du taux de carbone séquestré à mesure que les plantations vieillissent. Le faible taux de carbone séquestré dans les anciennes cacaoyères s'expliquerait par l'absence quasi totale d'arbres dans la plupart des champs en production (Assale et al., 2021).

Quoiqu'il en soit, la plupart des auteurs s'accordent à dire que ces stocks de carbone sont majoritairement influencés positivement par la présence de grands arbres, d'un diamètre supérieur à 30 cm, favorisés tout au long de la durée de vie de la plantation (Saj & Jagoret, 2017; Dimobe et al., 2023).

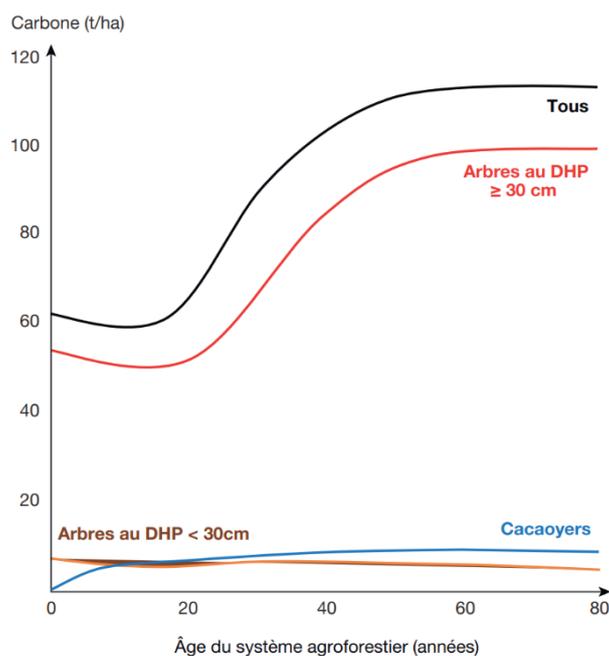


Figure 4 - Dynamique de stockage de carbone dans la biomasse ligneuse de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au centre-Cameroun (Saj et al., 2019).

Les taux moyens de carbone séquestré dans les cacaoyères sont assez variables selon les études et les régions, allant d'une dizaine de tC/ha à près de 70 tC/ha. Peu de travaux à ce sujet ont été effectués en Côte d'Ivoire, mais le Tableau 1 présente les résultats d'études réalisées ailleurs.

Tableau 1 – Stockage de carbone par hectare, en tonnes (tC/ha), correspondant à la somme des biomasses souterraines et aériennes des arbres d'ombrages et des cacaoyers pour différentes études réalisées dans d'importants pays producteurs.

| Auteurs | Région | Âge de la plantation | Stock de carbone |
|-----------------------------|---|----------------------|------------------|
| Assale et al. (2021) | Côte d'Ivoire (Forêt classée du Haut-Sassandra) | > 10 ans | 11,8 tC/ha |
| Asigbaase et al. (2021) | Sud-Est du Ghana | / | 49,1 tC/ha |
| Tane Fomekong et al. (2023) | Centre-Cameroun (localité de Makénééné) | / | 55,8 tC/ha |
| Saj et al. (2017) | Centre-Cameroun (Bokito, Ngomedzap, Talba) | Entre 11 et 20 ans | 64,8 tC/ha |
| Jadán et al. (2015) | Équateur (Sumaco) | / | 68 tC/ha |

1.5.2. Conservation de la biodiversité

Là où certaines études constatent une faible richesse spécifique des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers, d'autres classent ce type de culture comme un système agricole parmi les plus diversifiés.

Saj et al. (2019) voient en l'agroforesterie une opportunité de conservation de nombreuses espèces présentes dans les zones forestières. Par conséquent, ces systèmes peuvent servir de zones tampons efficaces et faire partie des priorités d'actions de conservation. Il a même été évoqué que les agroforêts auraient un potentiel de conservation, pour certaines espèces, supérieur à celui de forêts exploitées (Abada Mbololo et al., 2016).

Selon Assale et al. (2021), qui présentent les résultats d'un inventaire floristique (Diamètre à hauteur de poitrine, dhp, ≥ 5 cm) de 7 hectares au sein de la forêt classée du Haut Sassandra (centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), la richesse spécifique des plantations âgées de 5 à 10 ans s'élève à 129 espèces au total, réparties en 108 genres et 50 familles. Sur la même surface, les cacaoyères plus âgées enregistrent une richesse moindre, avec 39 espèces réparties en 36 genres et 27 familles. Dans cette région, bien que cette biodiversité ligneuse inventoriée soit intéressante, la densité moyenne d'arbres par hectare dans les champs de plus de 10 ans reste faible, avec 6 tiges seulement.

Au Cameroun, Saj et al. (2017) présentent des résultats plus élevés. Selon eux, dans le centre du pays, les densités varient de 30 à pas loin de 200 arbres (tout dhp confondu) par hectare. Les agroforêts centrées sur le cacao comprennent entre 10 et 30 espèces d'arbres

par hectare de tout diamètre. Pas moins de 20 % de ces espèces sont considérées comme ayant un intérêt pour la conservation, selon le statut établi par la liste rouge de l'UICN. Cette proportion est observée dans toutes les classes d'âge des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers. Tane Fomekong et al. (2023) démontrent eux une plus faible diversité ligneuse pour les systèmes agroforestiers à cacaoyers camerounais (centre du Cameroun également). La raison se trouve apparemment dans la décision des planteurs de ne conserver ou de n'introduire dans leurs cacaoyères que des espèces qui leur sont vraiment utiles, guidés par les opportunités commerciales des arbres. Ces derniers auteurs ont inventorié un total de 44 espèces différentes dans ce type de système ($d_{hp} \geq 5$ cm), pour une surface prospectée de 5 hectares et demi.

Les essences conservées après le défrichement des forêts finissent souvent abattues pour être utilisées comme bois de chauffage et pour la construction des habitations. Régulièrement, les grands arbres ne sont pas directement abattus mais écorcés et brûlés à la base du tronc, afin qu'ils continuent de fournir un ombrage jusqu'à leur mort progressive. Cela explique le faible nombre d'espèces dans les cacaoyères plus âgées (Assale et al., 2021).

1.6. Valorisation des services écosystémiques

La production sous couvert forestier dépend du niveau de compétition, tant entre les arbres associés et les cacaoyers qu'entre les cacaoyers eux-mêmes lorsque la densité de plantation est trop élevée. De manière générale, il est admis que la présence d'arbres concurrence les cacaoyers (Anglaaere et al., 2011; Ruf, 2011; Saj et al., 2019) bien que les rendements dépendent également de l'âge des cacaoyères (Saj et al., 2017).

Certains systèmes, plus prometteurs en termes de services de régulation, affichent des rendements potentiels compris entre 500 et 750 kg/ha de fèves de cacao. Ces parcelles abriteraient environ 10 espèces différentes et stockeraient entre 100 et 150 tC/ha dans la biomasse ligneuse (Saj et al., 2017)

Pour pallier cette productivité moindre, des espèces d'arbres fruitiers identifiées comme prioritaires telles que *Persea americana*, *Irvingia gabonensis*, *Dacryodes edulis*, *Ricinodendron heudelotii*, *Garcinia kola*, et les espèces de *Cola*, sont intentionnellement introduites dans les champs (Asaah et al., 2013; Kougbo et al., 2020).

Dans certains pays, l'incompatibilité perçue entre les objectifs agronomiques, économiques et écologiques des systèmes agroforestiers a conduit à l'émergence de mécanismes de paiement pour services environnementaux (PSE). Ces mécanismes visent à soutenir, au moins en partie, des systèmes moins intensifs en valorisant les externalités positives qui étaient auparavant ignorées (Rapidel et al., 2011). Un système de rémunération monétaire de la déforestation évitée, basé sur le crédit carbone, devrait encourager la mise en œuvre de systèmes agroforestiers. Ces systèmes contribueraient aux efforts de conservation et

d'atténuation des effets du changement climatique, tout en maintenant la production commerciale de cacao (Jadán et al., 2015).

À l'heure actuelle, réduire les émissions de gaz à effet de serre est crucial pour limiter le réchauffement global à 2°C, voire 1,5°C (Calvin et al., 2023). Afin d'atténuer les effets du changement climatique, les Nations Unies ont établi le mécanisme REDD+ en 2008. Avec la perspective d'intégrer le mécanisme REDD dans les accords post-Kyoto sur le climat, les Paiements pour Services Environnementaux (PSE) suscitent l'espoir dans la mise en œuvre de la « déforestation évitée » (Karsenty et al., 2009).

Le PSE est un mécanisme conçu pour promouvoir les externalités environnementales positives (Karsenty et al., 2009). Il fonctionne par le transfert de ressources financières des bénéficiaires de certains services écologiques aux fournisseurs de ces services. Ces PSE reposent donc sur des négociations bilatérales entre des « acheteurs » et des « fournisseurs » de services (Mayrand et al., 2004).

Toutefois, les PSE qui rémunèrent la fourniture de biens publics, tels que le maintien de la biodiversité ou la réduction des émissions de carbone, ne se prêtent pas à des engagements bilatéraux car les bénéficiaires sont l'ensemble des habitants de la planète. Ce type de PSE nécessite un ensemble de médiations institutionnelles entre le bénéficiaire abstrait : le monde, et les fournisseurs locaux du service.

Les projets de compensation carbone peuvent être de deux types : « séquestrants », comme la plantation d'arbres pour stocker les GES, ou « réducteurs », ceux qui évitent les émissions de GES par rapport à un scénario de référence via la mise en place d'actions à faible empreinte carbone (ICARE, 2022). Le mécanisme REDD+ a pour objectif d'inciter les pays en développement à conserver leurs forêts en échange de compensations financières provenant des crédits carbone (Angelsen et al., 2013).

Le crédit carbone est une unité de mesure équivalente à une tonne de CO₂ séquestrée par un puit de carbone, servant à être délivré aux entreprises qui visent à contrebalancer leurs émissions. Celles-ci cherchent de plus en plus à afficher une neutralité carbone de leurs activités, principalement pour répondre à une demande croissante du public pour des produits et services plus respectueux de l'environnement. Les crédits carbone permettent aux entreprises de compenser leurs émissions de GES en investissant dans des projets de réduction des émissions. Pour être efficaces, ces projets doivent respecter plusieurs principes : l'additionnalité (le projet ne se réaliserait pas sans la compensation), la pérennité (impact durable), et l'évitement des fuites (ne pas déplacer la pollution ailleurs) (Kant et al., 2014).

Les marchés du carbone, régulés et volontaires, jouent un rôle essentiel. L'Europe a instauré le Système d'Échange des Émissions de l'Union Européenne (EU ETS) en 2005, suivi par le Japon, la Nouvelle-Zélande et l'Australie. Un marché "volontaire" (*Voluntary Carbon Market*, VCM) s'est également développé grâce à des initiatives privées ou publiques, sans dépendre de

régulations internationales. Les caractéristiques de ces deux types de marchés diffèrent. Sur les marchés régulés, les analystes prévoient une augmentation continue du prix du crédit carbone d'ici 2030, avec des estimations indiquant que les prix pourraient dépasser 100 €/tCO₂ (Marché européen du carbone, 2022). Les prix sur les VCM sont généralement plus bas, avec un prix moyen de 11,21 USD/tCO₂ en 2023 pour les projets de type forestiers (Donofrio et al., 2023).

La compensation carbone pourrait ainsi être un mécanisme réaliste dans cette lutte contre la déforestation. Malgré cela, la plupart des prix du carbone réellement existants sont bien inférieurs aux niveaux recommandés par les analystes de la politique climatique, que ce soit sur la base du critère d'efficacité de l'économie ou du critère de sécurité, inscrit dans l'Accord de Paris (Boyce, 2018).

1.7. Contexte et Objectifs de l'étude

Ce travail de fin d'étude s'insère dans un partenariat entre le laboratoire de Foresterie Tropicale de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège), la chocolaterie indépendante Galler®, la coopérative agricole YEYASSO COOP-CA et la Fondation Roi-Baudouin. Ensemble, ces partenaires collaborent pour le projet de « Production d'un cacao bio, équitable et neutre en carbone ». Ce projet inclut une étude spécifique sur l'agroforesterie, axée sur la captation de carbone par les arbres d'ombrage dans les plantations de cacao de la coopérative partenaire. Seuls les producteurs de cacao affiliés à Yeyasso et associés à la chocolaterie Galler® sont impliqués dans cette étude. Ceci comprend 1218 planteurs opérant sur une superficie totale de 1994 hectares. Le siège de la coopérative se trouve à Man, chef-lieu du district des Montagnes, région la plus à l'Ouest de la Côte d'Ivoire.

L'objectif de ce mémoire est d'installer un réseau de parcelles permanentes, représentatif de la cacao-culture pratiquée par Yeyasso, en vue de quantifier et d'assurer le suivi dans le temps de la biodiversité ligneuse et des stocks de carbone.

Pour ce faire, une mission de terrain de trois mois a été effectuée par l'étudiant auteur de ce mémoire, Clément Cerny, du 14 février 2024 au 14 mai 2024.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Présentation de la zone d'étude

La présente étude s'est déroulée en Afrique de l'Ouest, dans la région montagneuse la plus occidentale de Côte d'Ivoire. A environ 500 kilomètres d'Abidjan, la ville de Man, chef-lieu de la région du Tonkpi (district des Montagnes), accueille le siège de la coopérative agricole partenaire du projet : YEYASSO COOP- CA. C'est dans les villages environnant que la production de fèves de cacao s'opère. Six grandes sections (villages), séparées spatialement, interviennent ainsi dans les activités de YEYASSO : Bogouine, Douele, Yapleu, Melapleu (Man), Gbombelo et Gan. Les trois premiers villages sont situés au sud de Man, et le relief y est peu prononcé. Les autres villages, au nord de Man, sont logés dans la chaîne montagneuse locale (Figure 5). Au sein de cette zone d'étude, le champ de cacao échantillonné le plus au sud a pour coordonnées : 07°01'36.07"N 07°42'53.91"W et celui le plus au nord : 07°45'01.14"N 07°32'54.32"W. Ils sont espacés, à vol d'oiseau, d'environ 83 kilomètres.

La région du Tonkpi présente un relief très accidenté, avec des sommets atteignant 1200 mètres d'altitude (Mont Tonkouï). Les roches métamorphiques de la région, principalement du gneiss (Traore et al., 2021), sont parcourues par deux grands cours d'eau : le N'Zo et le Kô, deux affluents du Sassandra. Le climat est tropical humide, avec des précipitations totales annuelles de 1569 millimètres (Climat Côte d'Ivoire). Celles-ci sont concentrées de mars à octobre, au cours d'une longue saison des pluies de huit mois. La saison sèche se manifeste de novembre à février, mois au cours desquels il n'y a en moyenne que trois jours pluvieux (WMO). La température moyenne annuelle est de 24,6°C (Climat Côte d'Ivoire).

Cette zone géographique s'insère dans la transition entre deux grandes bio-régions : la zone régionale guinéo-congolaise au sud et guinéo-soudanienne au nord. La végétation rencontrée comprend d'une part des lambeaux de forêts denses dominés notamment par les Fabaceae, Moraceae, Meliaceae, Sapotaceae, Irvingiaceae, Chrysobalanaceae, Clusiaceae. D'autre part, une flore plus savanicole caractéristique du centre régional d'endémisme soudanien, modelée par les activités agricoles.

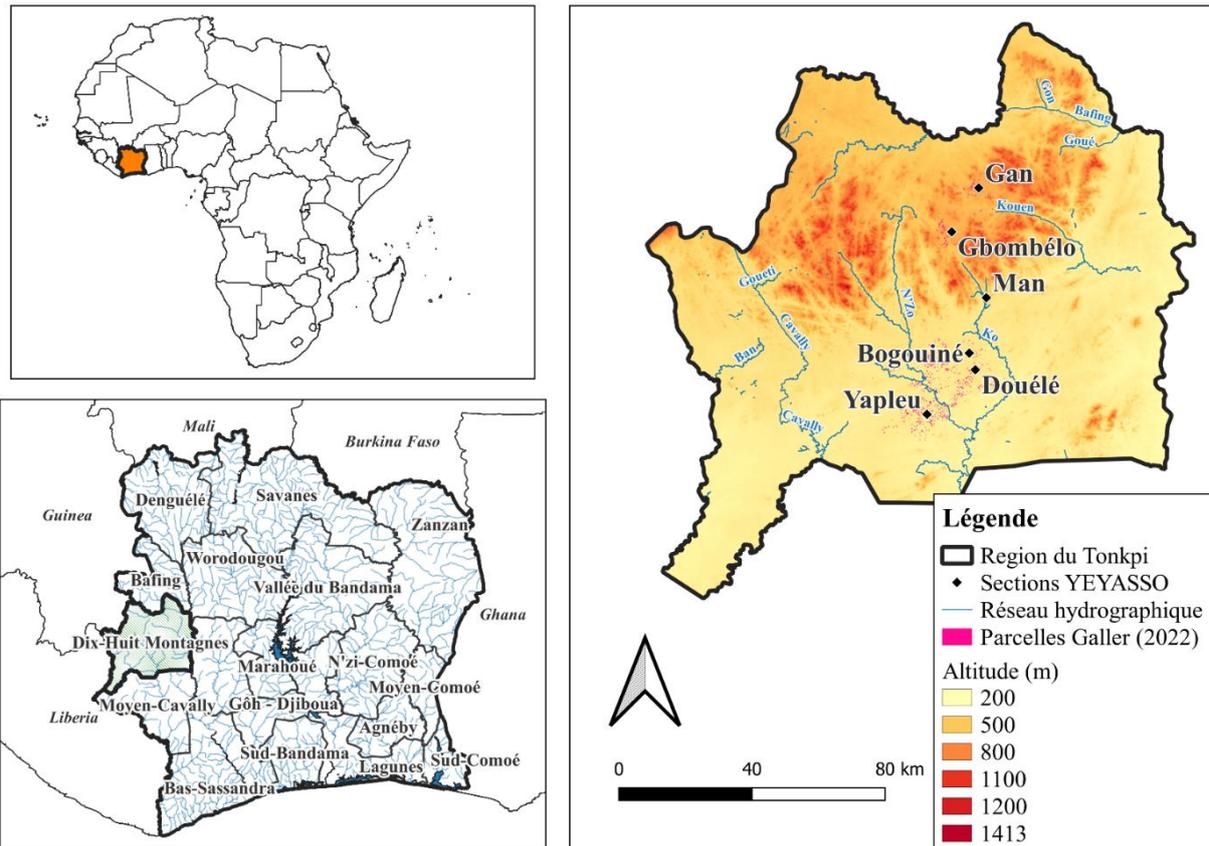


Figure 5 - Cartographie de la zone d'étude.

2.2. Échantillonnage des parcelles

Les zones de production de la coopérative se répartissent en six grandes sections, coordonnées par des intervenants assignés, qualifiés de Producteurs Relais (PR). Les six sections sont : Melapleu (Man), Yapleu, Douele, Gbombelo, Gan et Bogouine. Ces dernières sont subdivisées en 16 sous-zones, gérées par 16 PR, dans le même ordre : Melapleu, Yapleu 1, Yapleu 2, Yapleu 3, Yapleu 4, Yapleu 5, Douele, Douele 1, Douele 2, Douele 3, Gbombelo, Gan, Bogouine 1, Bogouine 2, Bogouine 3, Bogouine 4 (Figure 6). Ces 16 sous-régions sont considérées lors de l'échantillonnage comme des strates car elles reflètent le gradient d'altitude (Figure 5).

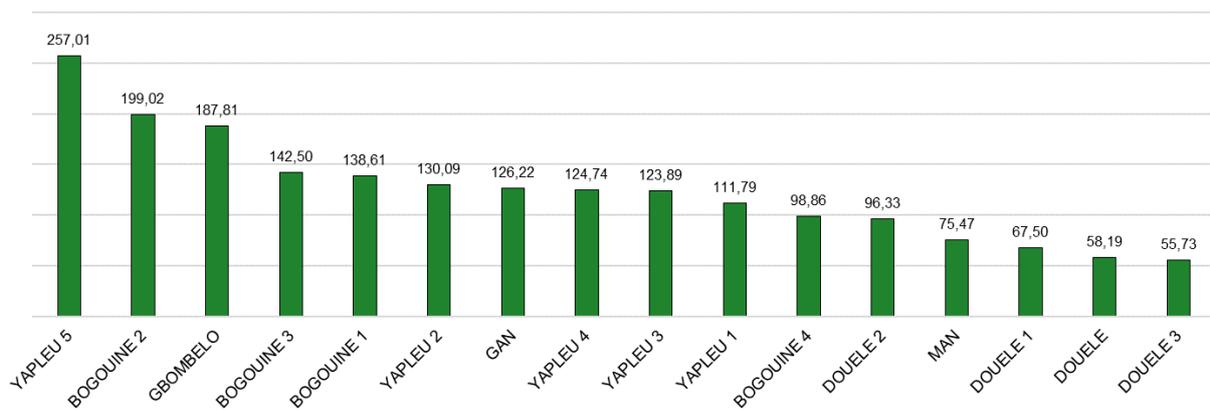


Figure 6 - Superficie totale [ha] des champs de la coopérative affiliés à Galler® pour chaque sous-région (strates).

Avec pour intention de considérer ce gradient environnemental, un échantillonnage stratifié à fractions sondées constantes a été élaboré avant la mission de terrain. L'objectif était d'échantillonner, en termes de surface, cinq pourcents (5%) des champs Galler®. La somme des surfaces de l'ensemble des parcelles Galler® sous la tutelle de Yeyasso s'élève à 1994 hectares, répartie en 1218 producteurs. Un échantillonnage de 5% correspond dès lors à une somme de 99,7 hectares de parcelles, répartie de façon proportionnelle et constante selon les différentes sections (5% de chaque surface). Au sein de chacune des strates, les parcelles ont été sélectionnées aléatoirement (Annexe 1) jusqu'à atteindre la surface cible (Figure 7). L'échantillonnage est basé sur les superficies des parcelles mentionnées dans le registre 2022 de la chocolaterie.

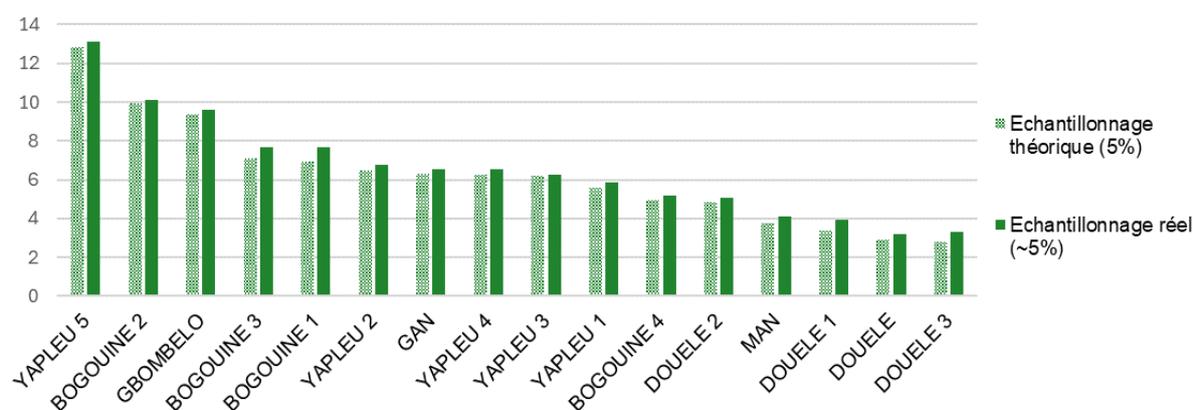


Figure 7 - Surfaces échantillonnées (axe Y, en ha) par section selon l'objectif initial de 5%. Il a été préféré que l'échantillonnage réel de 5% soit systématiquement légèrement supérieur, plutôt qu'inférieur.

2.3. Dispositif permanent

Un dispositif permanent a été instauré au sein des cacaoyères échantillonnées, visant à pouvoir assurer le suivi dans le temps de l'évolution de la biomasse et de la biodiversité ligneuse des champs. Ce système de monitoring, représentatif de la caco-culture effectuée par la coopérative Yeyasso, consiste spécifiquement à pouvoir suivre l'accroissement du diamètre des arbres d'ombrages et leur maintien par les producteurs. En outre, un dispositif de placettes permanentes a également été installé pour les cacaoyers afin d'en déterminer la densité de plantation et la biomasse associée.

2.3.1. Arbres d'ombrages

Les arbres d'ombrages ont été inventoriés à partir d'un diamètre à hauteur de poitrine, conventionnellement mesuré à 1 mètre 30 du sol, de 10 centimètres (dhp \geq 10 cm). Tous les arbres dépassant ce seuil, sans exception et en comprenant les palmiers, ont été géolocalisés, identifiés, mesurés et numérotés. Afin d'éviter les oublis, les parcelles ont été parcourues par allers-retours successifs. La présence du propriétaire de chaque champ s'est avérée indispensable afin de délimiter clairement les parcelles étudiées.

2.3.1.1. Diamètre

Le diamètre (dhp) a été relevé au mm près à l'aide d'un mètre-ruban forestier dont l'exactitude des graduations a été régulièrement contrôlée. Dans le cas où l'arbre présentait une déformation (contrefort, épaissement, etc.) importante au niveau de la mesure ; le diamètre a été pris un mètre au-dessus de la déformation, où le tronc était cylindrique (Figure 8). Une échelle a donc été nécessaire sur le terrain. Lorsque l'arbre était fourchu en-deçà de la hauteur conventionnelle, des mesures séparées des tiges de la fourche ont été effectuées. Dans ce cas, les tiges ont été numérotées avec une virgule (si l'arbre X se divise en deux tiges : numérotation = X,1 et X,2). Lorsque la fourche de l'arbre apparaissait au-delà du dhp, la tige était mesurée de façon individuelle. Pour les essences dont le tronc présentait des aspérités (par exemple des épines chez les Rutaceae ou *Ceiba pentandra*) ou des lianes susceptibles de fausser la mesure du diamètre, ces éléments ont été éliminés à la machette afin de relever une mesure correcte (Figure 9). L'Annexe 2 propose une aide schématique à la mesure du dhp.

Après avoir débarrassé la zone de mesure des différents éléments pouvant fausser les mesures (mousses, écailles, etc.), un ruban adhésif a été apposé autour du tronc, à l'endroit précis de la prise de mesure, et ensuite recouvert de peinture avant d'être enlevé. L'endroit précis qu'il convient d'utiliser pour les relevés dendrométriques futurs, dans le cadre d'un suivi rigoureux de la croissance des arbres, est dès lors situé entre le double-trait (Figure 10).



Figure 8 - Mesure du dhp au-delà des contreforts (déformation) [à gauche] ; Mesures distinctes du dhp et numérotation spécifique pour un arbre fourchu avant 1m30 [à droite].



Figure 9 - Nettoyage du tronc (épiphytes) à la machette pour mesurer le dhp [à gauche] ; Mesure du dhp après avoir éliminé les épines sur un fromager (*Ceiba pentandra* L.) [à droite].

2.3.1.2. Hauteur

La hauteur totale de chaque arbre a été mesurée, au dm près, à l'aide du Vertex V (*Haglof Sweden*[®]). Le transpondeur, étalonné à 1 mètre 30 dans l'appareil, a été placé à cette même hauteur (dhp) à la base des arbres. Pour définir la hauteur de chaque arbre, l'opérateur s'est placé à une distance du tronc à peu près égale à la hauteur de l'arbre, et a enregistré la mesure depuis la mire jusqu'à l'apex. Il était primordial d'avoir une vue suffisamment dégagée afin de pouvoir viser précisément le sommet des arbres.

2.3.1.3. Déterminations botaniques

Lorsque cela était possible, l'identification des espèces botaniques des ligneux s'est faite directement sur le terrain. En cas de doute, des photos représentatives (feuilles, fruits, tranche, port de l'arbre, écorce, etc.) ont été collectées et annotées (couleur, odeur, usage, ...). Ces photos sont disponibles sur le lien cliquable suivant : [B données terrain¹](#). De plus, des échantillons ont été prélevés afin de constituer un herbier de terrain (Annexe 3), pour faciliter les déterminations au laboratoire. Ce travail à posteriori d'identification a été effectué avec le professeur J.L. Doucet et à l'aide de plusieurs ouvrages : La Flore Forestière de Côte d'Ivoire (Aubréville, 1959), Woody Plants of Western African Forests (Hawthorne & Jongkind, 2006), Photoguide for the forest trees of Ghana (Hawthorne & Gyakari, 2006), Les arbres utiles du Gabon (Meunier et al., 2015) ainsi que les ressources en ligne : West African Plants- A Photo

¹ https://drive.google.com/drive/folders/1WmJfLMbkIP67KxRTPraC32JvxH1wEj3B?usp=drive_link

Guide, African Plant Database et GBIF. Nos travaux de détermination ont permis de faire une correspondance entre les noms locaux et les noms scientifiques (Annexe 7).

2.3.1.4. Encodages

Les informations relatives aux producteurs et aux PR (nom, prénom, identifiant) ainsi que les mesures dendrométriques (hauteur totale de l'arbre, mesure du diamètre, hauteur de mesure du diamètre) et générales (géolocalisation, identification de l'essence) ont été encodées ([B données terrain](#)) via un questionnaire sur l'application *FarmForce*. Ce questionnaire (Annexe 4) reprend également d'autres informations telles que l'altitude, l'appellation locale de l'arbre, l'éventuelle plantation de l'arbre dans le cadre du projet agroforestier, et l'état d'écorcement.

Pour être efficace, l'équipe doit idéalement être composée, en plus du producteur, de 5 opérateurs qui se suivent :

- Un releveur du diamètre et un releveur de la hauteur
- Un encodeur
- Un peintre
- Une dernière personne pour enlever les rubans adhésifs et apporter le matériel



Figure 10 - Encodage des informations sur le questionnaire FarmForce et marquage de l'arbre [à gauche] ; Double-trait pour assurer le suivi de la croissance des arbres et numérotation de l'arbre [à droite].

2.3.2. Cacaoyers

Le protocole suivi pour mesurer les cacaoyers et leur biomasse est basé sur la méthode proposée par Andrade et al. (2008). Afin d'obtenir une estimation fiable de la biomasse des cacaoyers, un système de placettes permanentes a été instauré.

Un point GPS par demi-hectare a été généré aléatoirement dans chaque champ de plus de 0,5 ha, à l'aide du générateur de points aléatoires de QGIS. Sur le terrain, le cacaoyer le plus proche de ces coordonnées a été défini comme le point central de chaque placette d'échantillonnage. Ces cacaoyers centraux ont été marqués d'un « C » à la peinture (Figure 13).

Depuis le centre de la placette, un cercle d'un rayon de six mètres a systématiquement été tracé dans la litière afin d'identifier les cacaoyers inclus dans la placette d'échantillonnage (Figure 11). Le vertex a été utilisé pour mesurer le rayon (Figure 11). La surface échantillonnée est ainsi de 113 m² par demi-hectare de plantation. Ceci donne un taux de sondage compris entre 1,13 et 2,26% en fonction de la taille de chaque parcelle (Tableau 2).

Dans chacune de ces placettes, tous les plants de cacao ont été recensés, et leur diamètre relevé au mm près à l'aide du ruban forestier, à 30 centimètres du sol (Figure 12). Lors de la mesure, les cabosses ont été évitées pour ne mesurer que le tronc. Lorsque les plants de cacao étaient trop fins, un pied à coulisse a été employé pour mesurer les diamètres (Annexe 5). Dans le cas où le cacaoyer se divisait en plusieurs tiges dès la base, celles-ci ont été mesurées individuellement, en ne considérant toutefois qu'un pied de cacao pour la densité. La biomasse de ces cacaoyers fourchus sera donc la somme des biomasses de chaque tige. La hauteur n'a pas été considérée, car le tarif proposé par Andrade et al. (2008) n'intègre pas cette variable. Un trait a également été peint à l'endroit de la mesure sur chaque cacaoyer inclus au sondage, ce qui permet de retrouver aisément les placettes au sein des champs (Figure 13). Ensuite, l'âge de la plantation a été relevé pour chaque placette. Toutes les informations relatives aux cacaoyers ont été encodées dans un carnet manuscrit (Annexe 6) avant d'être retranscrites sur Excel ([B données terrain](#)).



Figure 11 - Cercle tracé dans la litière correspondant à la limite de la placette d'échantillonnage (EXT = extérieur à la placette, INT = intérieur de la placette) [à gauche] ; Disposition du Vertex au pied du cacaoyer proche du point GPS généré aléatoirement, le centre de la placette d'un rayon de 6 mètres [à droite].



Figure 12 - Mesure du diamètre des cacaoyers à 30 centimètres du sol, suivie directement du marquage à la peinture pour ne pas les relever deux fois.



Figure 13 - Une placette d'échantillonnage de cacao : le cacaoyer central [à gauche] et les cacaoyers inventoriés [à droite]

Tableau 2 - Effort d'échantillonnage des cacaoyers par surface de plantation.

| Superficie de la plantation [ha] | Nombre de placettes | Taux de sondage |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| [0,5 ; 1 [| 1 | Entre 1,13 et 2,26 % |
| [1 ; 1,5 [| 2 | Entre 1,5 et 2,26 % |
| [1,5 ; 2 [| 3 | Entre 1,695 et 2,26 % |
| [2 ; 2,5 [| 4 | Entre 1,8 et 2,26 % |
| [2,5 ; 3 [| 5 | Entre 1,883 et 2,26 % |
| [3 ; 3,5 [| 6 | Entre 1,937 et 2,26 % |
| [3,5 ; 4 [| 7 | Entre 1,97 et 2,26 % |

2.4. Cartographie

L'intégralité des données collectées sur le terrain a été projetée dans un système d'informations géographiques (SIG) afin de cartographier l'information, sous forme de fichiers *Shapefile* ([B données terrain](#)). Le logiciel QGIS 3.22.11-Białowieża a été utilisé à cet effet.

2.5. Evaluation de la biodiversité ligneuse

2.5.1. Paramètres structuraux

Afin de quantifier la représentativité des différentes espèces ligneuses au sein de l'échantillonnage, plusieurs paramètres ont été calculés. L'abondance relative d'une espèce a été calculée comme le nombre de tiges de cette espèce par rapport au nombre total de tiges. La dominance relative a été définie comme la surface terrière à l'hectare d'une espèce par rapport à la surface terrière totale des arbres d'ombrage. La densité (NHA) et la surface terrière (GHA) de chaque espèce (Tableau 3) ont été calculées sur la surface totale échantillonnée. Le diamètre et la hauteur totale ont été calculés en moyenne par essence.

Tableau 3 - Formules du nombre de tiges par hectare (NHA) et de la surface terrière (GHA).

| | Formule | Variabes |
|---|---|---|
| Densité (NHA) [tiges/ha] | $\frac{N}{A}$ | N = nombre total d'arbres dans la parcelle A = surface totale [ha] |
| Surface terrière (GHA) [m ² /ha] | $\frac{\sum_{i=1}^n (\frac{\pi * di^2}{4})}{A}$ | di = diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre i [m] (arbre d'ombrage) et à 30 cm du sol (cacaoyers) A = surface totale [ha] |

2.5.2. Indices et estimateurs de diversité

Pour estimer la diversité des ligneux, il a été décidé d'étudier la coopérative dans son ensemble, puis d'analyser les différentes strates (les sections). Ce choix a été fait en raison des potentiels gradients d'hétérogénéité au sein de la zone d'étude (relief, bio-régions, contexte social, nature du sol, etc.). De ce fait, les strates ont été comparées entre elles via différents indices et estimateurs.

2.5.2.1. Ressemblance entre les strates (composition floristique)

La première étape de cette étude dans l'analyse des strates est l'observation des similarités entre elles. Pour ce faire, une ordination non-métrique multidimensionnelle (NMDS) a été choisie. Basée sur la composition en espèces, elle permet d'analyser les similarités écologiques entre les différents sites (sections). Dans une ordination, les sites semblables écologiquement occupent des espaces proches dans l'espace. Cette NMDS a été effectuée sur le logiciel Rstudio, via le package 'vegan' version 2.6-4. Les fonctions utilisées incluent *metaMDS* pour l'ordination, *ordiellipse* et *ordispider* pour visualiser les regroupements des sites avec des ellipses et des toiles.

En complément, l'indice de Jaccard, un coefficient de similarité, a également été calculé entre les sections. Cet indice est borné entre 0 et 1 ; une valeur maximale signifiant deux milieux identiques. Le logiciel Rstudio, via la fonction *vegdist (method = "jaccard")* du package 'vegan' version 2.6-4 a été utilisé pour cette analyse.

Afin d'expliquer les (dis)similarités entre les strates, leurs compositions en espèces ont été examinées. A cette fin, les 10 espèces les plus abondantes ont été considérées.

2.5.2.2. Biodiversité des sections (richesse floristique)

La richesse spécifique a été calculée pour l'ensemble de la coopérative et pour chaque strate. Pour ce faire, le nombre d'espèces observées a été calculé et des courbes d'accumulation en espèces ont été créés. Pour chaque courbe d'accumulation, le nombre d'espèces a été calculé en fonction d'un effort d'échantillonnage croissant : la superficie inventoriée dans le cas de cette étude. Ceci a permis d'identifier les sections les plus riches en espèces et d'évaluer l'exhaustivité de l'échantillonnage (pertinence des taux de sondage adoptés). Les courbes ont été générées via la fonction *specaccum* du package 'vegan' version 2.6-4 de Rstudio.

Ensuite, afin d'estimer le nombre réel d'espèces dans chaque section, l'indice de Chao1 (et son erreur standard), basé sur le nombre d'espèces rares : celles observées une seule fois (singletons) et deux fois (doubletons) a été calculé. En cas d'absence de doubletons, l'indice de Chao2 a été utilisé. La fonction *specpool* du package 'vegan' version 2.6-4 de Rstudio a été utilisée. Elle fournit également une estimation du nombre d'espèces via les estimateurs Jackknife de premier et de second ordre. Le Jackknife1 utilise seulement le nombre d'espèces uniques, le Jackknife2 est basé à la fois sur les espèces uniques et observées deux fois.

Finalement, l'analyse de la richesse spécifique de chaque section a été complétée via le calcul de différents indices de biodiversité. Parmi eux, les indices de Shannon-Weaver (H) et de Simpson (D) ont été déterminés. L'indice de Shannon, qui prend en compte à la fois le nombre total d'espèces et la distribution des individus entre les espèces, permet d'évaluer la diversité d'un milieu. Plus l'indice H est élevé, plus le milieu peut être qualifié de riche. L'indice de Simpson, qui prend en compte le nombre d'espèces et leur abondance relative, permet également d'évaluer la diversité. Il varie entre 0 et 1, une valeur proche de 1 indiquant une haute diversité (indice inversé ; $1 - D$). Ces deux indices ont été calculés via la fonction *diversity* du package 'vegan' version 2.6-4 de Rstudio.

Finalement, l'équitabilité de Pielou (E), soit le rapport entre l'indice de Shannon de la section et le logarithme du nombre total d'espèces dans l'échantillon (S) a été défini. L'indice E est en réalité une mesure de la distribution relative des espèces dans un milieu, qui permet de rendre compte de la répartition des individus entre les différentes espèces. Il varie entre 0 ; une seule espèce domine la communauté et 1 ; toutes les espèces contiennent le même nombre d'individus.

2.6. Biomasse et stocks de carbone

2.6.1. Quantification

La biomasse totale (BT), exprimée en kilogrammes ou en tonnes, correspond à la masse totale d'une plante ou d'un animal. Dans le cas des arbres, on distingue la biomasse aérienne (AGB ; *aboveground biomass* = le tronc et le houppier) qui peut être mesurée ou estimée directement, de la biomasse souterraine (BGB ; *belowground biomass* = le système racinaire), dont l'estimation se base généralement sur la biomasse aérienne. La biomasse ligneuse est calculée via l'application d'équations allométriques, adaptées au contexte de l'étude (Panzou et al., 2016).

Les relations allométriques utilisent principalement le diamètre du tronc, la densité du bois et la hauteur totale comme prédicteurs importants de la biomasse (Chave et al., 2005). Ce sont ces trois paramètres qui ont été utilisés dans le cadre de cette étude. L'infra-densité (*basic density*) correspond à la masse d'un échantillon de bois anhydre par unité de volume de bois vert (Rondeux, 2021). Ce paramètre est spécifique à chaque espèce, et la *Global Wood Density Database* (Chave et al., 2009), a été utilisée. Le Tableau 4 présente les équations allométriques utilisées dans le cadre de ce travail.

Tableau 4 - Equations allométriques utilisées pour définir la biomasse des arbres d'ombrage, des palmiers et des cacaoyers.

| Type de biomasse | Paramètre | Auteurs de l'équation | Équation allométrique | Explications |
|------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| Arbres d'ombrage | Biomasse aérienne (AGB) [kg] | Chave et al. (2014) | $0,0673 * (de * D^2 * H)^{0,976}$ | de = infradensité* [g/cm ³] D = diamètre à 1m30 [cm] H = hauteur totale de l'arbre [m] |
| | Biomasse souterraine (BGB) [kg] | GIEC : Mokany et al. (2006) | $0,2 * AGB$ | Si zone écologique = Forêt Tropicale Humide avec AGB < 125 t/ha |
| | Biomasse totale (BT) [kg] | | AGB + BGB | |
| Palmiers | Biomasse aérienne (AGB) [kg] | Mignolet et al. (2020) R ² = 0,94 | $Exp(-2,335 + 0,832 * \ln(D^2 * H))$ | D = diamètre à 1m30 [cm] H = hauteur totale du palmier [m] |
| | Biomasse souterraine (BGB) [kg] | GIEC : Mokany et al. (2006) | $0,2 * AGB$ | Si zone écologique = Forêt Tropicale Humide avec AGB < 125 t/ha |
| | Biomasse totale (BT) [kg] | | AGB + BGB | |
| Cacaoyers | Biomasse aérienne (AGB) [kg] | Andrade et al. (2008) R ² = 0,98 | $10^{(-1,625 + 2,63 * \log(D30))}$ | D30 = diamètre à 30 cm du sol [cm] |
| | Biomasse souterraine (BGB) [kg] | GIEC : Mokany et al. (2006) | $0,2 * AGB$ | Si zone écologique = Forêt Tropicale Humide avec AGB < 125 t/ha |
| | Biomasse totale (BT) [kg] | | AGB + BGB | |

**La densité du bois de chaque espèce a été définie comme la moyenne des différentes valeurs de densité fournies pour l'espèce par la Global Wood Density Database, indépendamment de la région. Lorsque les données relatives à l'espèce n'étaient pas disponibles, la moyenne du genre a été considérée, et celle de la famille en cas de genre manquant (toutes régions confondues). Pour les arbres dont l'identification n'a pas été possible, la valeur moyenne, pondérée par l'abondance de chaque espèce rencontrée dans cet inventaire, a été considérée : 0,514 g/cm³.*

La biomasse totale peut être convertie aisément en quantité de carbone équivalente. Conventionnellement, il est admis qu'un kilogramme de biomasse ligneuse est composé à 50% de carbone (C) (Eggleston, 2006) ;

$$C = 0,5 * BT$$

Selon les mêmes conventions, la quantité de carbone peut être convertie en CO₂ sur base du rapport des poids moléculaires (44/12) ;

$$CO_2 = 3,67 * C$$

La biomasse aérienne, la biomasse totale, ainsi que les conversions en carbone et en CO₂ ont été calculées pour tous les arbres individuellement, sur Excel. Ensuite, afin d'obtenir des stockages de carbone par surface, les résultats ont été compilés par champ.

Pour être exact, il est indispensable de prendre en compte également la teneur en carbone du sol. Toutefois, la mesure du stock de carbone organique présent dans le sol requiert des analyses poussées en laboratoire. Dans cette étude, les données proviennent de la littérature scientifique, notamment des études de Silatsa et al. (2017) et de Asigbaase et al. (2021). Ces articles évoquent, respectivement, un stock moyen de 39,1 tC/ha et 59,7 tC/ha pour des cacaoyères agroforestières au Cameroun et au Ghana. La valeur moyenne de 49,4 tC/ha (ou 181,3 tCO₂/ha) a été utilisée ici.

2.6.2. Facteurs d'analyse

Pour chaque section, le stock de carbone par hectare a été défini comme la moyenne du stockage par hectare des champs de la section. La surface terrière et la densité de chaque section ont également été définies comme les moyennes des données de chaque champ.

Deux facteurs ont été choisis pour observer les différences dans le stock de carbone. Le premier est le facteur « section » ; l'objectif étant d'observer si la zone a un effet sur la quantité de carbone stocké, pouvant s'expliquer par diverses hétérogénéités. Le deuxième facteur sélectionné est l'âge des plantations. Sur base des champs prospectés, deux classes d'âge de plantation ont pu être définies : moins de 15 ans (« Jeune », n = 26) et plus de 15 ans (« Mature », n = 20). Le stock de carbone par hectare pour chaque classe d'âge a été défini comme la moyenne des champs appartenant à chaque classe d'âge.

Les stocks ont été comparés selon ces deux facteurs via des tests de Kruskal-Wallis, en raison du non-respect des conditions d'application de l'Anova. En cas de p-valeurs significatives (significatif* < 0,05 ; hautement significatif** < 0,01 ; très hautement significatif*** < 0,001),

les différences entre les moyennes ont été observées via un test post-hoc de Dunnett. Ces analyses statistiques ont été réalisées, respectivement, via les fonctions *kruskal.test* du package 'stats' version 4.1.2 et *dunnTest* du package 'dunn.test' version 1.3.6 de Rstudio.

2.6.3. Modélisation

Finalement, il a également été entrepris d'établir un outil concret à destination de la coopérative. En effet, il est difficilement envisageable de mesurer la hauteur des arbres sur le terrain, tant cet exercice demande un matériel de précision, coûteux et complexe. De plus, le travail de terrain est extrêmement demandeur en temps, et se passer de la mesure de la hauteur permettrait d'appliquer le protocole à davantage de champs de cacao. Ainsi, cette étude fournit deux équations allométriques basées sur les relevés de terrain, adaptées au contexte agroforestier local.

La première relation allométrique permet de prédire la hauteur des arbres d'ombrage sur base de la mesure du dhp. La relation est construite sur un modèle puissance :

$$H \sim a * DHP^b$$

Le modèle puissance a été retenu car il présentait une erreur standard résiduelle minimale (RSE = *Residual Standrad Error*), pour un coefficient de détermination (R^2) maximal sans nécessiter de transformation de variable. L'ajustement de ce modèle non linéaire a été établi sur Rstudio via la fonction *nls* du package 'stats' version 4.1.2.

La seconde équation allométrique permet de prédire le diamètre moyen (d) des cacaoyers d'un champ sur base de l'âge de la plantation. La relation est basée sur un modèle linéaire :

$$d \sim a * \hat{\text{Age}} + b$$

Au vu de la répartition des données, ce modèle était le seul éventuellement envisageable. L'ajustement de ce modèle linéaire a été réalisé sur Rstudio via la fonction *lm* du package 'stats' version 4.1.2.

III. RÉSULTATS

3.1. Rendement d'inventaire

Sur le terrain, le protocole d'échantillonnage a été suivi de la manière la plus fidèle possible. Toutefois, les contraintes de temps face à ces activités chronophages ont demandé une certaine adaptation. Afin de s'assurer de pouvoir parcourir, avec le temps disponible, l'ensemble des sections, l'échantillonnage de 5% n'a pas été atteint partout. Ainsi, c'est finalement un échantillonnage stratifié à fractions sondées non constantes qui a été effectué.

Au bout de 49 journées passées sur le terrain, les efforts d'échantillonnage sont les suivants : 46 champs de cacao ont été sondés, ce qui représente 70,42 hectares de plantation. Le taux de sondage total est de 3,53% des champs Galler® (les parcelles concernées par cette étude) de la coopérative, divisés comme suit ;

- 13,65 hectares à Bogouine (Taux de Sondage : 2,36%), soit 11 champs ;
- 10,13 hectares à Douele (Taux de Sondage : 3,65%), soit 7 champs ;
- 34,38 hectares à Yapleu (Taux de Sondage : 4,6%), soit 17 champs ;
- 6,55 hectares à Gan (Taux de Sondage : 5,19%), soit 5 champs ;
- 3,93 hectares à Gbombelo (Taux de Sondage : 2,09%), soit 3 champs ;
- 4,09 hectares à Melapleu (Man) (Taux de Sondage : 5,42%), soit 3 champs.

La superficie moyenne des champs prospectés est de 1,53 ha ; le plus petit couvrant 0,57 ha et le plus grand 3,96 ha. En raison du faible nombre de parcelles prospectées dans les sections de Melapleu (Man) et Gbombelo et de leur proximité (Figure 14), il a été décidé de les rassembler pour ne considérer qu'une seule section ; « Man – Gbombelo ». Le taux de sondage pour la section Man- Gbombelo est alors de 3,05%.

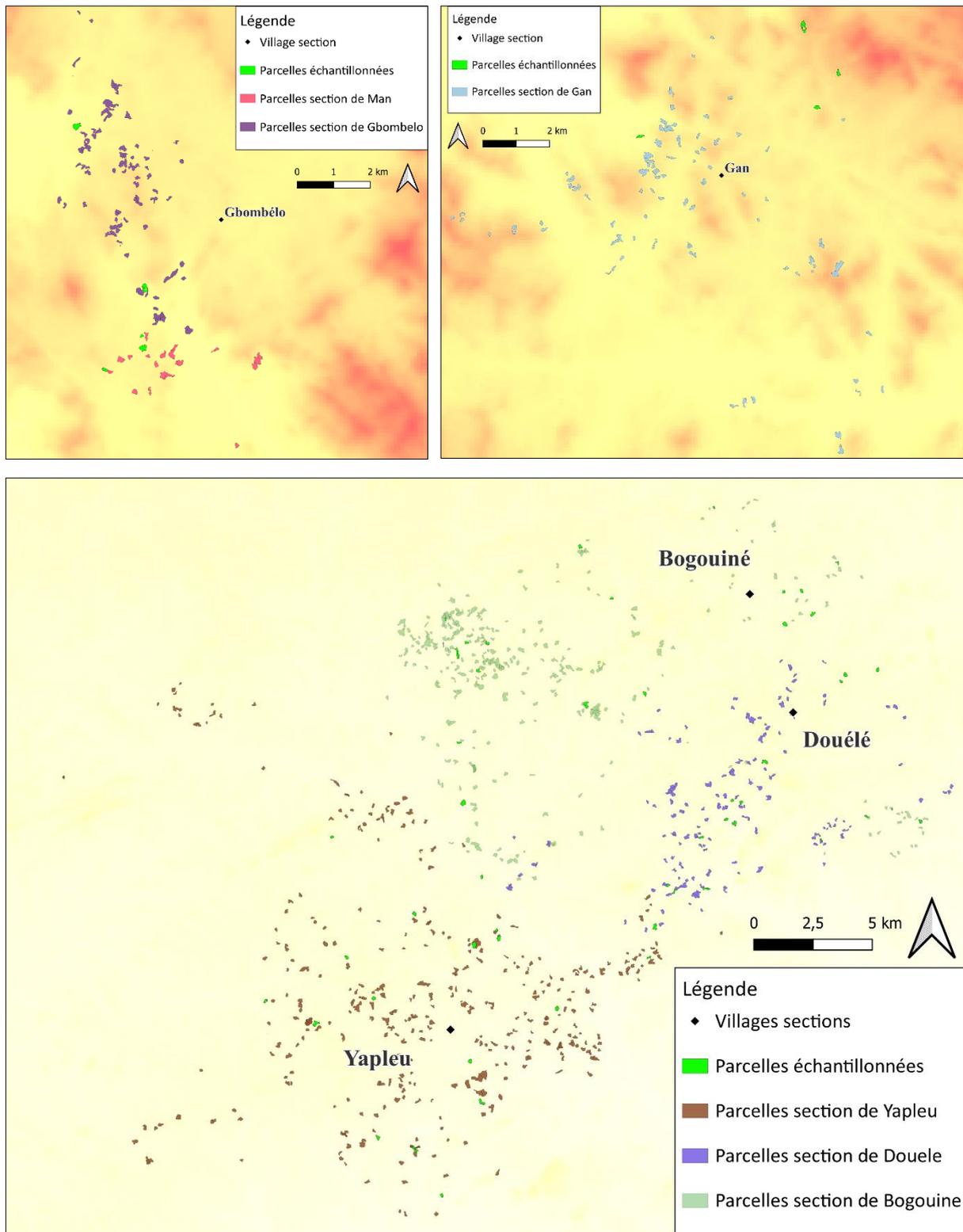


Figure 14 – Cartographie des parcelles rattachées aux différentes sections de la coopérative (Yeyasso) et parcelles faisant partie de l'échantillonnage de chaque section. La couleur de fond illustre le relief local (cf. Figure 5).

3.2. Cartographie de la zone d'étude

L'ensemble des données récoltées au cours de l'inventaire a été projeté dans un SIG, grâce à la géolocalisation systématique des arbres inventoriés. Ainsi, le dispositif permanent sur le terrain est cartographié, rendant visuelle la répartition des arbres d'ombrages au sein des champs de cacao (Figure 15). Les placettes d'échantillonnage de cacaoyers sont également projetées. Ceci permettra d'assurer aisément le suivi de la croissance des arbres. Le *GeoPackage* associé à cette projection cartographique est disponible sur le lien cliquable suivant : [B données terrain](#).

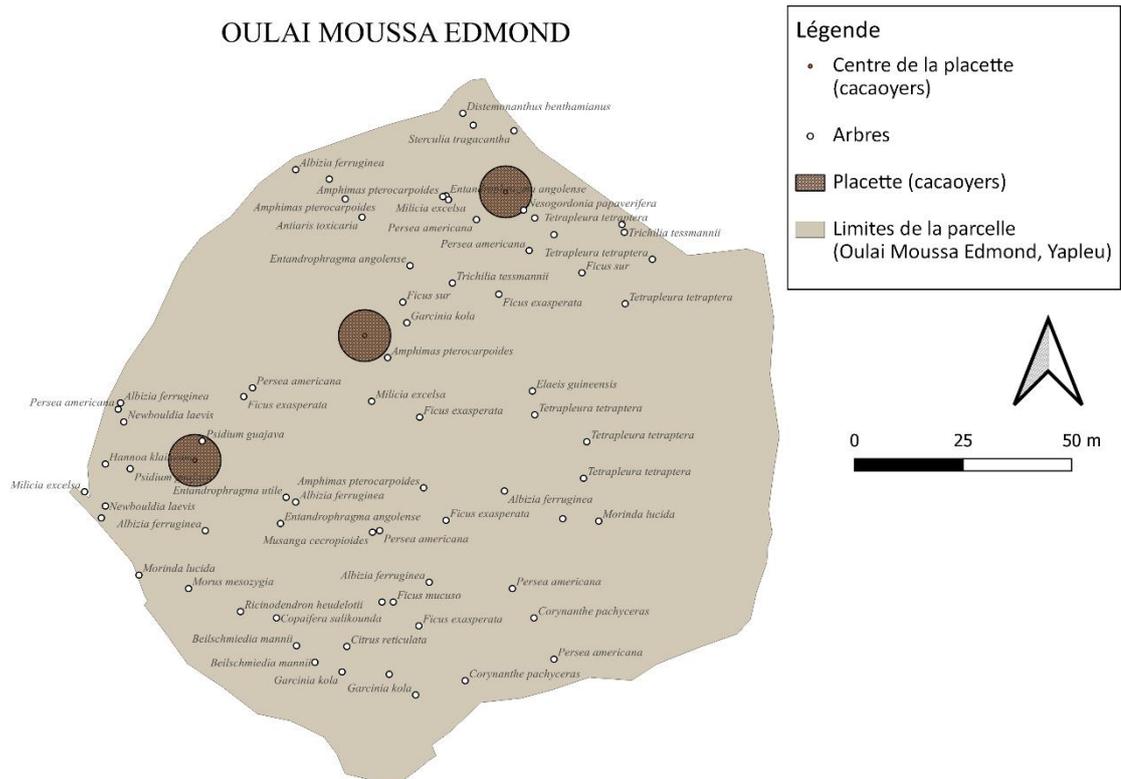


Figure 15 - Projection cartographique du dispositif permanent installé dans un champ agroforestier (producteur : Oulai Moussa Edmond, section de Yapleu).

3.3. Biodiversité

3.3.1. Structure et composition globale du peuplement ligneux

Parmi les 70,42 hectares de plantations prospectées, 2867 arbres ont été inventoriés. Ceux-ci se répartissent en 124 espèces différentes, 94 genres et 33 familles (Annexe 7). 36 arbres n'ont pas pu être identifiés jusqu'à l'espèce (1,25%), dont 5 ont pu être identifiés jusqu'à la famille et 31 n'ont pas pu être déterminés. Les diamètres varient du seuil d'inventaire fixé à 10 cm jusque 250 cm, valeur maximale atteinte à deux reprises par *Ceiba pentandra*, alors que le dhp moyen est de 27,2 cm (sd = 21,8 ; se = 0,4)². La structure diamétrique en « J » inversé témoigne de la prédominance d'arbres de petits diamètres dans les plantations de cacao (Figure 16).

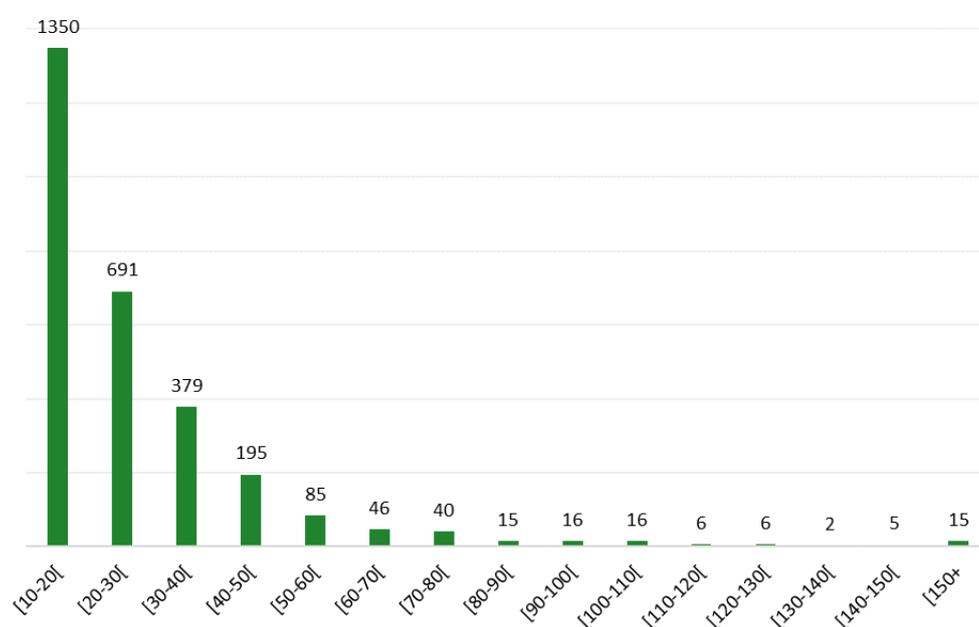


Figure 16 - Distribution de l'abondance des arbres d'ombrages par classes diamétriques. L'écrasante majorité des ligneux présente de petits diamètres.

La hauteur maximale, atteinte par *Triplochiton scleroxylon*, est de 52,6 m, mais la hauteur moyenne est de 13,0 m (sd = 7,2 ; se = 0,1). La surface terrière moyenne à l'hectare (GHA) des arbres d'ombrage est de 4,0 m²/ha (sd = 3,0 ; se = 0,4). La densité d'arbres au sein des parcelles est, en moyenne, égal à 43,4 tiges par hectare (sd = 26,6 ; se = 3,9).

En termes de nombre de pieds, les 5 essences les plus abondantes sont, dans l'ordre ; *Cola nitida* (n = 327), *Elaeis guineensis* (n = 203), *Persea americana* (n = 159), *Ficus sur* (n = 151) et *Ficus exasperata* (n = 133). Ces cinq espèces représentent 34% du nombre total d'arbres, et les

² Pour les paramètres descriptifs de l'échantillon ; sd (standard deviation) donne l'écart-type de la moyenne, c'est-à-dire la variabilité des données autour de celle-ci alors que se (standard error) donne l'erreur-standard de la moyenne, c'est-à-dire une mesure de la précision de la moyenne de l'échantillon comme moyenne de la population (dépendant de la taille de l'échantillon). Pour l'analyse des stocks de carbone, l'erreur-standard (se, notée $\pm x$) sera analysée afin de juger de la précision des estimations.

10 espèces les plus abondantes comptent pour 50% de l'effectif total (Tableau 5). Au regard de la surface terrière par hectare, les 5 espèces les plus dominantes sont *Ceiba pentandra* (GHA = 0,548 m²/ha), *Elaeis guineensis* (GHA = 0,343 m²/ha), *Triplochiton scleroxylon* (GHA = 0,221 m²/ha), *Milicia excelsa* (GHA = 0,177 m²/ha) et *Cola nitida* (GHA = 0,174 m²/ha).

Tableau 5 - Classement des 15 essences les plus abondantes dans les champs. L'abondance relative a été définie comme le nombre de tiges de l'espèce par rapport au nombre total de tiges. La dominance relative a été définie comme la surface terrière (GHA) de l'espèce par rapport à la surface terrière globale des arbres d'ombrage.

| Espèce | DBH moyen [cm] | Hauteur moyenne [m] | Nombre de tiges (N) | Abondance relative [%] | Densité (NHA) [tiges/ha] | Surface terrière (GHA) [m ² /ha] | Dominance relative [%] |
|--|------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|---|--------------------------|
| <i>Cola nitida</i> (Vent.) Schott & Endl. | 20,56 | 9,40 | 327 | 11,41 | 4,64 | 0,17 | 4,48 |
| <i>Elaeis guineensis</i> Jacq. | 38,33 | 14,99 | 203 | 7,08 | 2,88 | 0,34 | 8,82 |
| <i>Persea americana</i> Mill. | 21,98 | 10,96 | 159 | 5,55 | 2,26 | 0,10 | 2,60 |
| <i>Ficus sur</i> Forssk. | 15,91 | 7,43 | 151 | 5,27 | 2,14 | 0,05 | 1,28 |
| <i>Ficus exasperata</i> Vahl | 18,25 | 10,33 | 133 | 4,64 | 1,89 | 0,07 | 1,79 |
| <i>Morinda lucida</i> Benth. | 23,36 | 13,65 | 104 | 3,63 | 1,48 | 0,08 | 2,02 |
| <i>Albizia zygia</i> (DC.) J.F.Macbr. | 26,40 | 14,91 | 89 | 3,10 | 1,26 | 0,09 | 2,33 |
| <i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C.Berg | 35,11 | 17,93 | 88 | 3,07 | 1,25 | 0,18 | 4,55 |
| <i>Mangifera indica</i> L. | 28,33 | 10,85 | 86 | 3,00 | 1,22 | 0,10 | 2,44 |
| <i>Amphimas pterocarpoides</i> Harms | 27,01 | 16,75 | 76 | 2,65 | 1,08 | 0,10 | 2,57 |
| <i>Antiaris toxicaria</i> Lesch. | 25,63 | 12,68 | 74 | 2,58 | 1,05 | 0,08 | 2,05 |
| <i>Myrianthus arboreus</i> P.Beauv. | 17,68 | 9,14 | 72 | 2,51 | 1,02 | 0,03 | 0,72 |
| <i>Myrianthus libericus</i> Rendle | 14,61 | 6,73 | 58 | 2,02 | 0,82 | 0,01 | 0,38 |
| <i>Sterculia tragacantha</i> Lindl. | 28,81 | 13,22 | 58 | 2,02 | 0,82 | 0,07 | 1,88 |
| <i>Albizia adianthifolia</i> (Schumach.) W.Wight | 27,14 | 15,11 | 54 | 1,88 | 0,77 | 0,06 | 1,63 |

Les trois familles les plus abondantes sont, dans l'ordre, les Moraceae (représentées par 13 espèces), les Malvaceae (représentées par 13 espèces) et les Fabaceae (représentées par 22 espèces) cumulant 55% du total des tiges de l'échantillonnage (Figure 17).

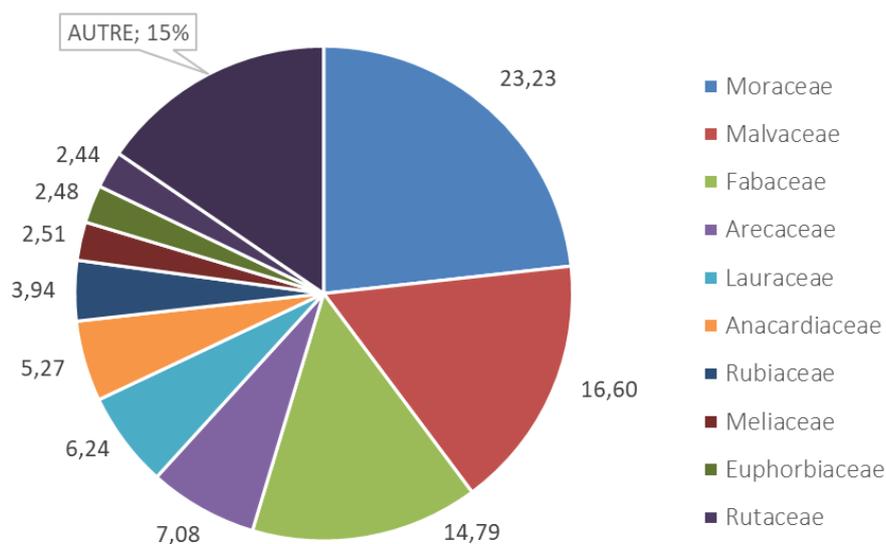


Figure 17 - Abondances relatives (%) des familles botaniques à travers l'ensemble de la coopérative (70,42 ha).

3.3.2. Comparaison des communautés entre sections

Les résultats présentés dans la section précédente reflètent l'ensemble de la coopérative, sans prise en compte de ses différentes zones géographiques. Ces dernières pourraient révéler des différences en termes de richesse et/ou de composition spécifique. L'analyse de la biodiversité a donc été affinée par section. L'ordination par NMDS (*Non-metric Multidimensional Scaling*) permet d'explorer les similarités entre les différentes sections prospectées sur base de leur composition en espèce (Figure 18). Les ellipses les plus proches sont celles des sections de Bogouine, Douele et Yapleu. Les sections de Gan et Man – Gbombelo se singularisent des autres.

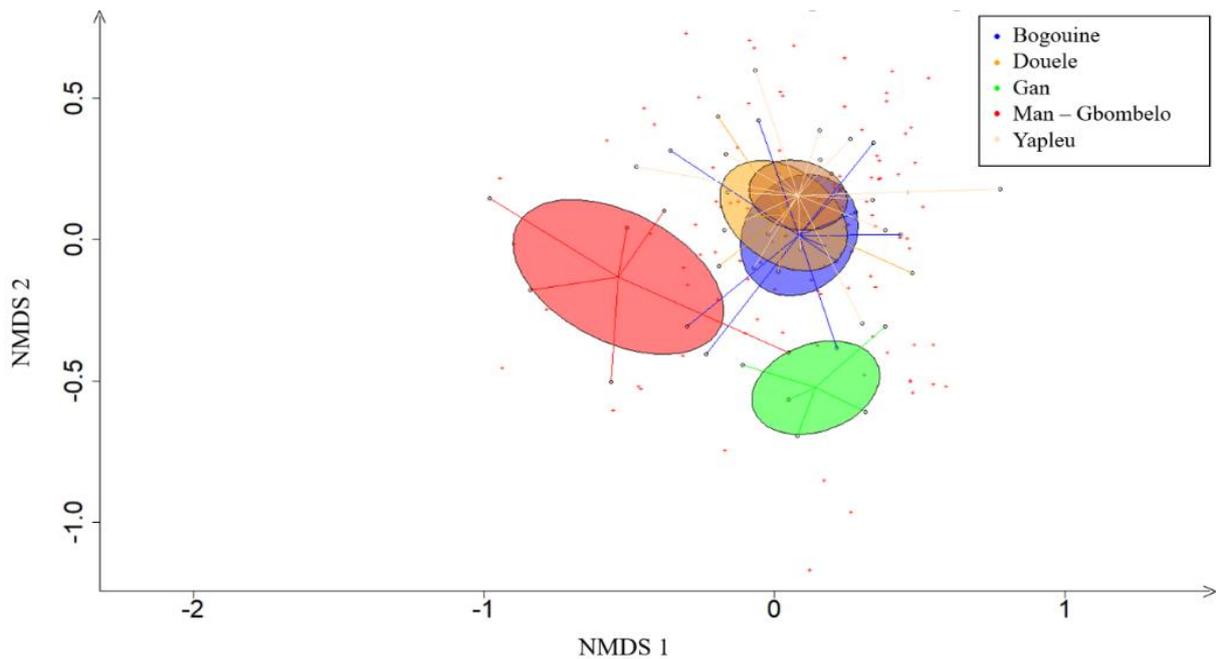


Figure 18 - Ordination NMDS des sections sur base de leur composition en espèce. Les ellipses rapprochées traduisent une similarité entre les milieux.

Ces résultats sont confirmés par l'indice de Jaccard, calculé pour chaque section deux à deux (Tableau 6). Les valeurs diffèrent assez remarquablement en fonction des sections comparées. La section de Man – Gbombelo semble être la plus différente des autres (notamment de Yapleu et Douele). A contrario, les sections de Bogouine, Douele et Yapleu seraient les plus ressemblantes.

Tableau 6 - Indice de Jaccard pour chaque section prises deux à deux. Une valeur proche de 1 signifie des milieux similaires.

| Section | Bogouine | Douele | Gan | Man- Gbombelo | Yapleu |
|----------------|----------|--------|-------|---------------|--------|
| Bogouine | 1 | | | | |
| Douele | 0,526 | 1 | | | |
| Gan | 0,396 | 0,337 | 1 | | |
| Man – Gbombelo | 0,305 | 0,284 | 0,321 | 1 | |
| Yapleu | 0,604 | 0,523 | 0,381 | 0,25 | 1 |

Le Tableau 7 peut expliquer ces différences observées entre les sections. Elle reprend le classement des 10 espèces les plus abondantes dans chaque section. Les cases colorées mettent en évidence l'originalité de la section, c'est-à-dire les espèces qui se retrouvent dans le top 10 de cette section uniquement. Cela ne veut pas dire que l'espèce n'est pas présente dans les autres sections, mais elle n'y fait pas partie des 10 plus abondantes.

Les sections de Gan et Man-Gbombelo sont effectivement les plus « originales » puisqu'elles présentent chacune 5 espèces uniques dans leur classement. Les sections de Bogouine, Douele et Yapleu sont moins « originales », ne contenant que 3 espèces uniques dans leur classement au maximum. Autrement dit, ces sections présentent un top 10 assez semblable des espèces les plus abondantes.

Tableau 7 - Classement des 10 espèces les plus abondantes par section (A. rel = Abondance relative, en %). Les cases colorées mettent en évidence les essences présentes uniquement dans le top 10 de la section lui conférant son « originalité ». Les sections de Man-Gbombelo et Gan contiennent d'avantage d'espèces uniques.

| Ranking | BOGOUINE | A. rel | DOUELE | A. rel |
|---------|-----------------------|--------|---------------------|--------|
| 1 | Cola nitida | 16,6 | Elaeis guineensis | 10,8 |
| 2 | Ficus exasperata | 8,0 | Morinda lucida | 8,9 |
| 3 | Elaeis guineensis | 4,8 | Albizia zygia | 7,0 |
| 4 | Milicia excelsa | 3,3 | Cola nitida | 5,4 |
| 5 | Ficus sur | 3,0 | Myrianthus arboreus | 5,0 |
| 6 | Albizia adianthifolia | 2,9 | Ficus sur | 4,6 |
| 7 | Musanga cecropioides | 2,8 | Persea americana | 4,6 |
| 8 | Myrianthus libericus | 2,8 | Milicia excelsa | 4,4 |
| 9 | Sterculia tragacantha | 2,7 | Mangifera indica | 4,1 |
| 10 | Antiaris toxicaria | 2,6 | Antiaris toxicaria | 3,9 |

| YAPLEU | A. rel | GAN | A. rel | MAN-GBOMBELO | A. rel |
|-------------------------|--------|-----------------------------|--------|------------------------|--------|
| Cola nitida | 8,6 | Cola nitida | 23,2 | Elaeis guineensis | 21,2 |
| Persea americana | 8,5 | Elaeis guineensis | 17,8 | Mangifera indica | 13,6 |
| Ficus sur | 7,6 | Persea americana | 5,9 | Ficus sur | 12,7 |
| Amphimas pterocarpoides | 4,5 | Celtis mildbraedii | 4,3 | Persea americana | 11,9 |
| Elaeis guineensis | 4,0 | Albizia zygia | 3,8 | Carica papaya | 5,1 |
| Ficus exasperata | 3,5 | Sterculia tragacantha | 2,7 | Citrus xsinensis | 4,2 |
| Mangifera indica | 3,4 | Triplochiton scleroxylon | 2,7 | Albizia zygia | 3,4 |
| Morinda lucida | 3,2 | Hannoa klaineana | 2,2 | Margaritaria discoidea | 3,4 |
| Milicia excelsa | 2,7 | Khaya ivorensis | 2,2 | Spondias mombin | 3,4 |
| Newbouldia laevis | 2,7 | Trilepisium madagascariense | 2,2 | Citrus reticulata | 2,5 |

3.3.3. Richesse spécifique

3.3.3.1. Courbes d'accumulation en espèces

La réalisation de courbes d'accumulation en espèces permet de visualiser si l'effort d'échantillonnage a été suffisant pour rencontrer toutes les espèces du milieu. Lorsque l'effort est suffisant, la courbe atteint un plateau traduisant l'exhaustivité des relevés. De plus, ces courbes prennent différentes allures en fonction de la rapidité à rencontrer plus ou moins d'espèces par unité d'échantillonnage.

La Figure 20 illustre la courbe d'accumulation en espèces pour l'ensemble de la coopérative. Les 70,42 hectares de plantations inventoriées permettent d'atteindre un certain plateau, ce qui signifie qu'une bonne partie des espèces (124 essences) a été rencontrée. Il faudrait considérablement augmenter l'effort d'échantillonnage afin de tendre vers l'estimation du nombre réel d'espèces, estimé entre 142 et 180 espèces, selon Chao (Tableau 8).

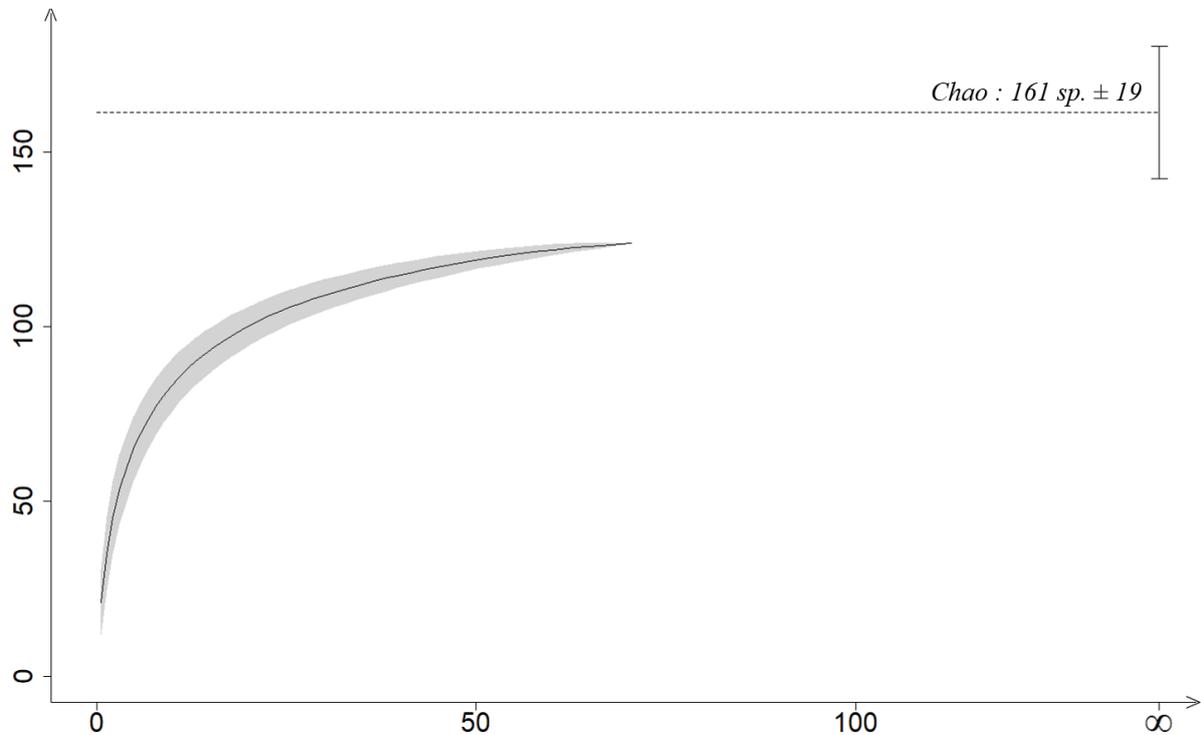


Figure 19 - Courbe d'accumulation en espèces pour l'ensemble de la coopérative (sans distinction par section). L'effort d'échantillonnage (axe X, en ha) est de 70,42 hectares, permettant d'observer 124 espèces (axe Y, en nombre d'espèces). La courbe atteint un plateau, synonyme d'un échantillonnage suffisant et que l'estimation du nombre réel d'espèces dans la zone sera robuste.

La Figure 21 illustre les courbes d'accumulation en espèces par section. L'allure des courbes permet de dire qu'il faut échantillonner moins de surface à Bogouine qu'ailleurs pour découvrir autant d'espèces. Les courbes des sections de Yapleu, Bogouine et Douele commencent à stagner, synonyme que l'échantillonnage est suffisant. A contrario, pour la section de Gan, le palier n'est pas encore visible, synonyme d'un échantillonnage trop faible. La section Man-Gbombelo est visiblement nettement moins riche en espèces, car bien que l'effort d'échantillonnage soit faible, un palier apparaît déjà.

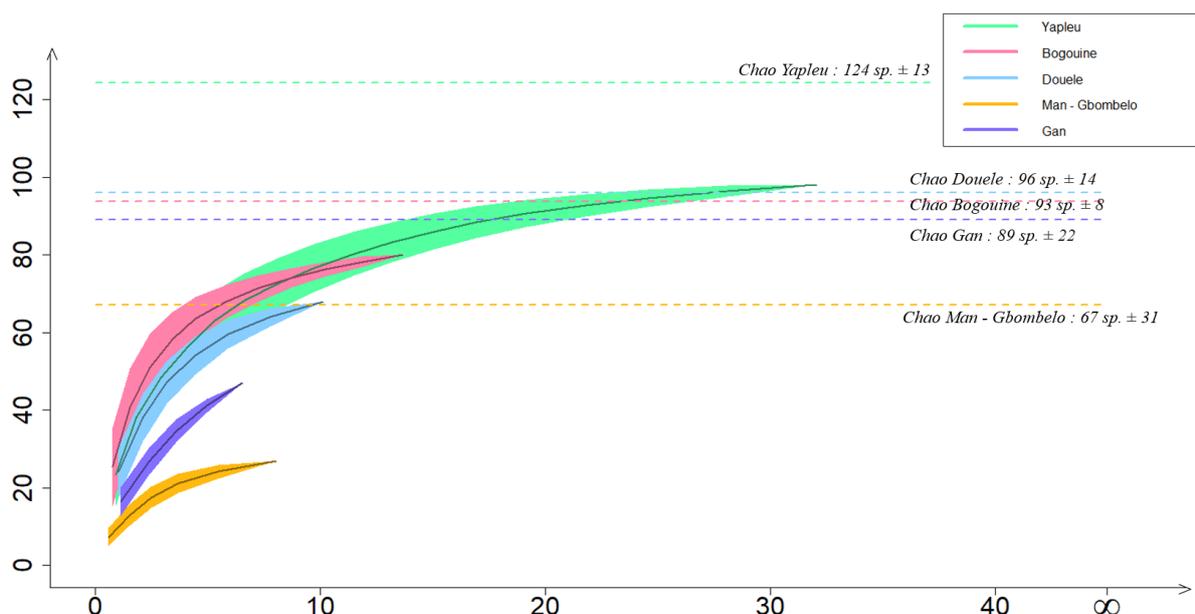


Figure 20 - Courbe d'accumulation en espèces par section. L'effort d'échantillonnage (axe X, en ha) diffère selon la section, et le nombre d'espèces observées (axe Y, en nombre d'espèces) aussi (Tableau 8).

3.3.3.2. Nombre d'espèces

Le Tableau 8 présente les différents estimateurs de richesse spécifique, permettant d'estimer le nombre total d'espèces ligneuses. Observer ces estimateurs de richesse de façon simultanée permet d'assurer plus de robustesse aux estimations. L'erreur standard associée à chaque estimation renseigne sur la confiance qui peut être placée en cette dernière.

La coopérative, sans distinction par section, dénombre 124 espèces mais pourrait en contenir 161 (± 19) selon l'indice de Chao. Le nombre d'espèces ligneuses observées varie selon les sections de la coopérative, la section de Yapleu étant la plus riche ($S = 98$), suivie de Bogouine ($S = 80$) et Douele ($S = 68$). Selon l'indice de Chao, le classement des sections les plus riches en termes d'espèces serait, dans l'ordre : Yapleu (124 sp. ± 13), Douele (96 sp. ± 14), Bogouine (94 sp. ± 8), Gan (89 sp. ± 22) et Man – Gbombelo (67 sp. ± 31). L'estimateur Jackknife 1 inverse les positions de Bogouine et Douele. Les erreurs standards associées aux indices de Chao des sections de Man – Gbombelo et Gan sont particulièrement élevées et ne permettent pas d'assumer une pleine confiance en ces nombres d'espèces.

Tableau 8 - Richesse spécifique observée et estimée selon Chao, Jackknife 1 et Jackknife 2 et leurs écart-types (se).

| Section | Nombre d'espèces observées (S) | Chao | Chao se | Jackknife 1 | Jackk1 se | Jackknife 2 |
|----------------|--------------------------------|------|---------|-------------|-----------|-------------|
| Yeyasso | 124 | 161 | 19 | 152 | 7 | 170 |
| Yapleu | 98 | 124 | 13 | 124 | 9 | 137 |
| Bogouine | 80 | 94 | 8 | 97 | 7 | 104 |
| Douele | 68 | 96 | 14 | 92 | 11 | 105 |
| Man - Gbombelo | 27 | 67 | 31 | 41 | 7 | 51 |
| Gan | 47 | 89 | 22 | 70 | 12 | 84 |

3.3.3.3. Indices de richesse spécifique

Le Tableau 9 présente le calcul des différents indices de diversité pour chaque section. L'indice de Shannon est assez semblable entre les sections, indiquant une diversité notable partout. Toutefois, la zone de Man-Gbombelo présente un indice inférieur aux autres sections, elle est donc moins diversifiée en espèces. L'indice de Simpson indique également une diversité relativement élevée, qui ne semble pas trop divergente selon les sections, bien que la section de Yapleu présente la plus grande valeur. Finalement, l'équitabilité de Piélu indique que les espèces sont plutôt bien réparties, les valeurs étant proches de 1 (autour de 0,8).

Tableau 9 - Indice de Shannon, Simpson et Equitabilité de Piélu par section.

| Section | Nombre d'espèces (S) | Shannon (H) | Simpson (1 - D) | Piélu (E) |
|----------------|----------------------|-------------|-----------------|-----------|
| Bogouine | 80 | 3,689 | 0,952 | 0,842 |
| Douele | 68 | 3,543 | 0,956 | 0,84 |
| Gan | 47 | 3,035 | 0,901 | 0,788 |
| Man - Gbombelo | 27 | 2,664 | 0,896 | 0,808 |
| Yapleu | 98 | 3,841 | 0,965 | 0,838 |

3.4. Biomasse et Carbone

3.4.1. Résultats globaux

Le Tableau 10 présente le stockage total de carbone des champs agroforestiers, calculé sur base de l'échantillonnage présenté précédemment. Les valeurs calculées sont pondérées par la surface totale de chaque section, et associées au stockage par hectare de chacune d'entre-elle. Le carbone contenu dans le sol est fixé à une valeur de 49,4 t/ha, peut-importe la section. A travers le sol, les arbres d'ombrages et les cacaoyers, le stockage de carbone moyen par champ dans la zone d'étude est de 77,6 tC/ha.

Tableau 10 - Stockage de carbone total (biomasse souterraine et aérienne des arbres d'ombrages et des cacaoyers + carbone organique du sol) associé aux champs agroforestiers de Yeyasso. Les résultats sont pondérés par la superficie de chaque section ainsi que par le stockage par hectare propre à chacune d'elle. L'équivalent CO₂ est également exprimé en t/ha.

| Section | Surface Totale [ha] | Stockage C Arbres d'ombrage [t/ha] | Stockage C Cacaoyers [t/ha] | Stockage C biomasse (Arbres d'ombrage et cacaoyers) [t/ha] |
|--|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| Bogouine | 579,0 | 17,9 ± 3,9 | 9,9 ± 1,6 | 27,7 ± 4,2 |
| Douele | 277,7 | 16,1 ± 7,2 | 13,2 ± 3,1 | 29,3 ± 7,8 |
| Gan | 126,2 | 45,7 ± 12,2 | 10,1 ± 4,3 | 56,6 ± 13,0 |
| Man - Gbombelo | 263,3 | 5,0 ± 2,1 | 13,3 ± 0,7 | 18,4 ± 2,3 |
| Yapleu | 747,5 | 12,8 ± 1,8 | 14,0 ± 1,0 | 26,8 ± 2,1 |
| Moyenne pondérée par la surface : | | 15,8 ± 1,9 | 12,4 ± 0,8 | 28,2 ± 2,0 |
| Total avec le carbone organique du sol (49,4tC/ha) ; | | | | 77,6 ± 2,0 |
| Équivalent CO ₂ : | | | | 284,8 ± 7,34 |

Parmi les arbres contribuant au stockage de carbone, certains sont écorcés par les producteurs en vue de les éliminer. Cette donnée devait être encodée via le questionnaire *FarmForce*, mais certains oublis d'encodage ont été détectés. La quantité de carbone séquestrée par ces ligneux, s'élève à 17,5 tonnes. Etant donné que certains arbres écorcés n'ont pas été enregistrés, ce chiffre est une valeur minimale. Néanmoins, les arbres tropicaux survivent très souvent à cette pratique et il est donc difficile de savoir si cela engendrera à terme une perte de carbone stocké. Seul un suivi des parcelles permettra de se prononcer.

3.4.2. Contribution des espèces agroforestières

3.4.2.1. Contribution absolue

Le Tableau 11 présente un classement des 10 essences les plus participatives au stockage de carbone dans la région étudiée. Cette contribution au stockage est dite absolue, car elle est calculée comme la somme du stockage de tous les individus de l'espèce. Il en ressort que les 5 essences qui participent le plus au stockage total de carbone dans la région sont : *Ceiba pentandra*, *Milicia excelsa*, *Triplochiton scleroxylon*, *Amphimas pterocarpoides* et *Elaeis guineensis*. Les essences les plus contributives sont, logiquement, plutôt abondantes.

Tableau 11 - Classement des 10 essences les plus participatives au stockage de carbone, dans l'absolu.

| Espèce | Carbone total stocké [tonnes] | Contribution relative au stock total de carbone [%] | Carbone stocké en moyenne par individu [tonnes] | Nombre d'individus | Densité [g/cm ³] | H moy [m] | Dhp moy [cm] |
|----------------------------------|-------------------------------|---|---|--------------------|------------------------------|-----------|--------------|
| <i>Ceiba pentandra</i> | 170,3 | 14,8 | 4,2 | 41 | 0,305 | 25,3 | 88,5 |
| <i>Milicia excelsa</i> | 81,5 | 7,1 | 0,9 | 88 | 0,574 | 17,9 | 35,1 |
| <i>Triplochiton scleroxylon</i> | 75,1 | 6,5 | 3,8 | 20 | 0,335 | 31,0 | 86,4 |
| <i>Amphimas pterocarpoides</i> | 51,2 | 4,5 | 0,7 | 76 | 0,617 | 16,7 | 27,0 |
| <i>Elaeis guineensis</i> | 48,9 | 4,2 | 0,2 | 203 | - | 15,0 | 38,3 |
| <i>Pterygota macrocarpa</i> | 36,7 | 3,2 | 7,3 | 5 | 0,493 | 32,1 | 101,7 |
| <i>Cola nitida</i> | 33,3 | 2,9 | 0,1 | 327 | 0,601 | 9,4 | 20,6 |
| <i>Terminalia superba</i> | 29,5 | 2,6 | 1,5 | 20 | 0,459 | 21,3 | 44,6 |
| <i>Petersianthus macrocarpus</i> | 29,1 | 2,5 | 2,1 | 14 | 0,677 | 22,9 | 52,2 |
| <i>Pycnanthus angolensis</i> | 25,0 | 2,2 | 0,8 | 30 | 0,409 | 16,6 | 46,1 |

3.4.2.2. Contribution spécifique

Le Tableau 12 présente un classement des 10 essences qui stockent le plus de carbone par individu. Les cinq premières espèces sont : *Pouteria altissima*, *Ficus ovata*, *Pterygota macrocarpa*, *Ceiba pentandra* et *Cola gigantea*. Les essences les plus contributives, bien que souvent peu nombreuses sur le site (à l'exception de *Ceiba pentandra* et *Triplochiton scleroxylon*), présentent visiblement en moyenne des dimensions (diamètre et hauteur) importantes.

Tableau 12 - Classement des 10 essences les plus participatives au stockage de carbone (contribution spécifique)

| Espèce | Carbone stocké en moyenne par individu [tonnes] | Nombre d'individus | Contribution relative au stock total de carbone [%] | Carbone total stocké [tonnes] | Densité [g/cm ³] | H moy [m] | Dhp moy [cm] |
|--------------------------|---|--------------------|---|-------------------------------|------------------------------|-----------|--------------|
| Pouteria altissima | 11,9 | 1 | 1,0 | 11,9 | 0,441 | 40,6 | 150,0 |
| Ficus ovata | 9,0 | 2 | 1,6 | 18,1 | 0,412 | 32,9 | 140,8 |
| Pterygota macrocarpa | 7,3 | 5 | 3,2 | 36,7 | 0,493 | 32,1 | 101,7 |
| Ceiba pentandra | 4,2 | 41 | 14,8 | 170,3 | 0,305 | 25,3 | 88,5 |
| Cola gigantea | 4,1 | 2 | 0,7 | 8,1 | 0,48 | 28,1 | 99,9 |
| Triplochiton scleroxylon | 3,8 | 20 | 6,5 | 75,1 | 0,335 | 31,0 | 86,4 |
| Eribroma oblongum | 3,1 | 3 | 0,8 | 9,2 | 0,638 | 29,1 | 72,1 |
| Mammea africana | 2,9 | 2 | 0,5 | 5,8 | 0,627 | 20,0 | 56,5 |
| Octoknema borealis | 2,4 | 7 | 1,4 | 16,6 | 0,688 | 11,6 | 39,0 |
| Parkia filicoidea | 2,4 | 4 | 0,8 | 9,5 | 0,457 | 15,8 | 56,6 |

3.4.2.3. Contribution par classe diamétrique

Le Tableau 13 présente la contribution de chaque classe diamétrique au stockage total de carbone des arbres d'ombrage. Il en ressort que les gros diamètres contribuent massivement au stockage du carbone, puisque 32,1% du carbone total est séquestré par les diamètres de plus de 110 cm, ne représentant pourtant que peine 1,2 % des arbres de l'échantillonnage. La contribution des gros diamètres est remarquable dès 60 cm ; les arbres d'un dhp \geq 60 cm (5,8% des tiges) comptent pour 62,8% du stock de carbone total. La majorité des diamètres rencontrés (94,2% des tiges), soit inférieurs à 60 cm, ne stocke que 37,1% du carbone total.

Tableau 13 - Contribution de chaque classe de diamètre au stockage de carbone total. Les chiffres de carbone découlent de la biomasse totale des arbres (AGB + BGB).

| Classe diamétrique | Carbone total stocké [tonnes] | Nombre de tiges | % du carbone total stocké | % du nombre de tiges total |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|
| [10-20[| 48,1 | 1350 | 4,2 | 47,1 |
| [20-30[| 90,0 | 691 | 7,8 | 24,1 |
| [30-40[| 108,2 | 379 | 9,4 | 13,2 |
| [40-50[| 90,8 | 195 | 7,9 | 6,8 |
| [50-60[| 89,9 | 85 | 7,8 | 3,0 |
| [60-70[| 71,6 | 46 | 6,2 | 1,6 |
| [70-80[| 100,5 | 40 | 8,7 | 1,4 |
| [80-90[| 41,8 | 15 | 3,6 | 0,5 |
| [90-100[| 65,6 | 16 | 5,7 | 0,6 |
| [100-110[| 74,0 | 16 | 6,4 | 0,6 |
| [110-120[| 30,6 | 6 | 2,7 | 0,2 |
| [120-130[| 47,9 | 6 | 4,2 | 0,2 |
| [130-140[| 17,1 | 2 | 1,5 | 0,1 |
| [140-150[| 49,6 | 5 | 4,3 | 0,2 |
| [150+ | 224,1 | 15 | 19,5 | 0,5 |

3.4.3. Effet des facteurs « section » et « classe d'âge »

3.4.3.1. Facteur « section »

3.4.3.1.1. Arbres d'ombrages

La Figure 21 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque section et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

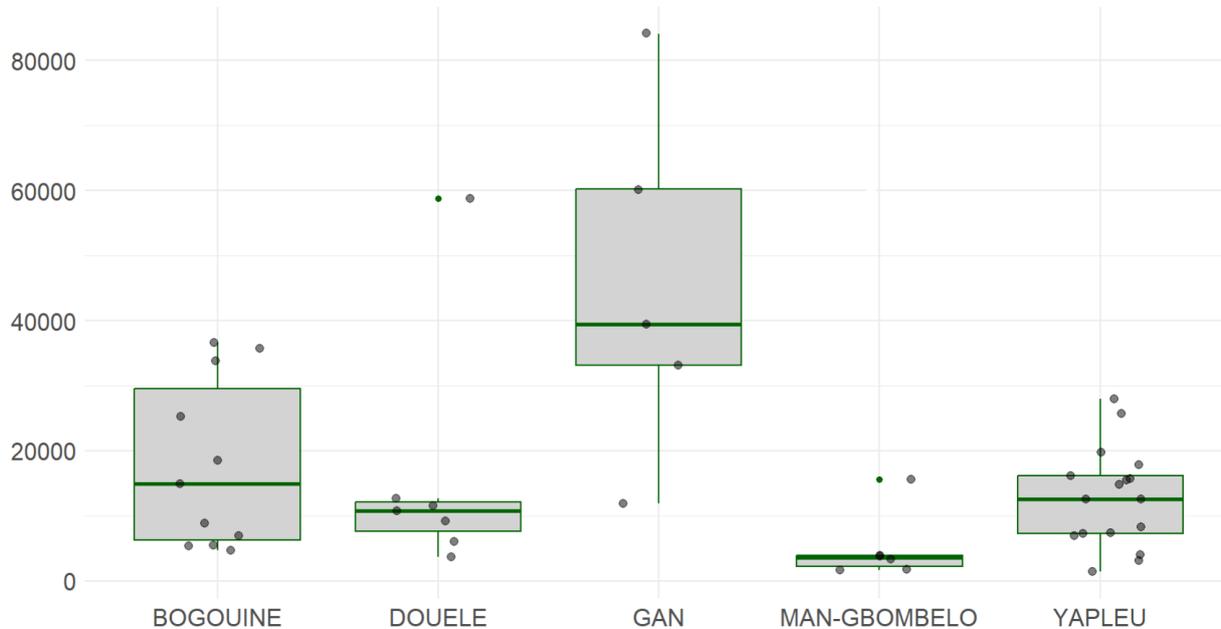


Figure 21 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages uniquement, par section.

Le Tableau 14 reprend les données moyennes de biomasse (et les conversions), surfaces terrières (GHA) et densité (NHA) propres aux arbres d'ombrage des champs. La section de Gan semble stocker davantage de carbone que les autres sections, au sein des arbres d'ombrage.

Tableau 14 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare contenue dans les arbres d'ombrages, surfaces terrières et densités moyennes associées. La section de Gan stocke significativement plus de carbone par hectare que la section de Man-Gbombelo.

| Section | BT/ha [kg] | Se BT/ha | C/ha [kg] | Se C/ha | GHA | Se GHA | NHA | Se NHA |
|--------------|------------|----------|-----------------------|---------|-------------------|--------|--------------------|--------|
| Bogouine | 35724,4 | 7794,1 | 17862,2 ^{ab} | 3897,0 | 4,5 ^a | 0,8 | 69,3 ^a | 7,5 |
| Douele | 32226,9 | 14410,0 | 16113,4 ^{ab} | 7205,0 | 4,4 ^{ab} | 1,3 | 55,6 ^{ab} | 12,0 |
| Gan | 91506,4 | 24594,5 | 45753,2 ^a | 12297,2 | 8,4 ^a | 1,8 | 28,6 ^{bc} | 4,2 |
| Man-Gbombelo | 10099,1 | 4313,2 | 5049,5 ^b | 2156,6 | 1,4 ^b | 0,4 | 15,9 ^c | 4,0 |
| Yapleu | 25564,7 | 3678,6 | 12782,3 ^{ab} | 1839,3 | 3,2 ^{ab} | 0,4 | 35,7 ^{bc} | 3,7 |
| Global | 34158,3 | 5058,4 | 17079,2 | 2529,2 | 4,0 | 0,4 | 43,4 | 3,9 |

BT/ha = Biomasse Totale (AGB + BGB) en kg/ha ; C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; GHA = surface terrière par hectare (m²/ha) ; NHA = densité (tiges/ha) ; Se = erreur standard associée à chaque valeur moyenne.

Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.

Le test de Kruskal-Wallis (KW) démontre un effet significatif de la section sur le stockage de carbone (p-valeur = 0,00647**). Le test post-hoc de Dunnett (DunnT) révèle une différence significative (p-valeur = 0,0011**) de stockage de carbone au sein des arbres d'ombrage entre les sections de Gan et Man-Gbombelo. La plus grande biomasse observée à Gan s'explique non pas par un nombre d'arbres plus élevé mais par des arbres plus gros (GHA Gan = 8,4). Le test de K-W révèle en effet un effet significatif (p-valeur = 0,00259**) de la section sur la surface terrière. La comparaison par paires (DunnT) relève des différences significatives entre les sections de Gan et Bogouine avec Man-Gbombelo (p-valeurs = 0,0005*** et 0,0237*, respectivement). En termes de densité, il y a également un effet significatif de la section (p-valeur KW = 0,0000619***). La section de Bogouine a un NHA significativement plus élevé que Gan (p-valeur = 0,0175*), Man-Gbombelo (p-valeur = 0,0000***) et Yapleu (p-valeur = 0,0115*). La section de Douele est également plus dense que Man-Gbombelo (p-valeur = 0,0067**).

3.4.3.1.2. Cacaoyers

La Figure 22 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque section et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

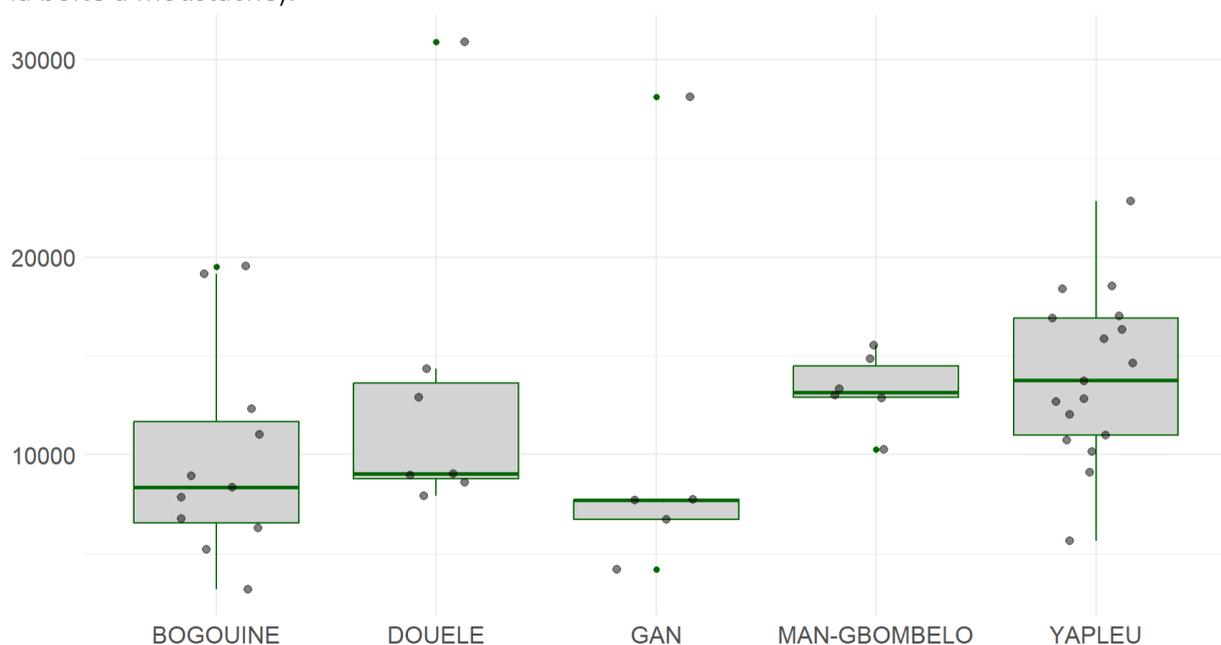


Figure 22 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux cacaoyers uniquement, par section.

Le Tableau 15 reprend les données de biomasse (et les conversions), surfaces terrières (GHA) et densité de plantation (NHA) propres aux cacaoyers. Le stock moyen de carbone pour Gan semble ne pas correspondre à la Figure 22, mais ceci est dû à la présence d'une valeur extrême. Les trois sections voisines (Douele, Yapleu, Bogouine) présentent une densité de plantation plus élevée. Les surfaces terrières ne varient toutefois que légèrement, tout comme les stocks de carbone associés aux cacaoyers : de 9,876 tC/ha dans la section de Bogouine à 14,029 tC/ha dans la section de Yapleu.

Tableau 15 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare contenue dans les cacaoyers, surfaces terrières, densités moyennes et erreurs standards associées. Douele est significativement plus dense que Gan mais cela n'a pas d'influence sur les stocks de carbone.

| Section | BT/ha [kg] | Se BT/ha | C/ha [kg] | Se C/ha | GHA | Se GHA | NHA | Se NHA |
|---------------|------------|----------|----------------------|---------|-------------------|--------|----------------------|--------|
| Bogouine | 19752,9 | 3205,8 | 9876,5 ^a | 1602,9 | 10,4 ^a | 1,3 | 1709,4 ^{ab} | 102,8 |
| Douele | 26480,2 | 6163,4 | 13240,1 ^a | 3081,7 | 12,4 ^a | 1,0 | 2128,4 ^a | 89,2 |
| Gan | 21793,6 | 8713,0 | 10896,8 ^a | 4356,5 | 9,5 ^a | 3,1 | 1293,9 ^b | 42,0 |
| Man- Gbombelo | 26623,5 | 1499,1 | 13311,7 ^a | 749,5 | 13,6 ^a | 0,8 | 1489,4 ^{ab} | 207,4 |
| Yapleu | 28058,8 | 2031,5 | 14029,4 ^a | 1015,7 | 14,0 ^a | 0,9 | 1809,5 ^{ab} | 104,1 |
| Global | 24964,1 | 1699,5 | 12482,1 | 849,7 | 12,4 | 0,6 | 1736,3 | 63,3 |

BT/ha = Biomasse Totale (AGB + BGB) en kg/ha ; C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; GHA = surface terrière par hectare (m²/ha) ; NHA = densité (tiges/ha) ; Se = erreur standard associée à chaque valeur moyenne.

Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.

KW indique des relations non significatives entre le facteur section et les variables de stockage de carbone et de GHA (p-valeur = 0,0551 et 0,0692, respectivement). En revanche, la densité de plantation est significativement plus élevée à Douele qu'à Gan (p-valeur KW = 0,00405**, p-valeur DunnT = 0,0011**).

3.4.3.1.3. Global (arbres d'ombrage + cacaoyers)

La Figure 23 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque section et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

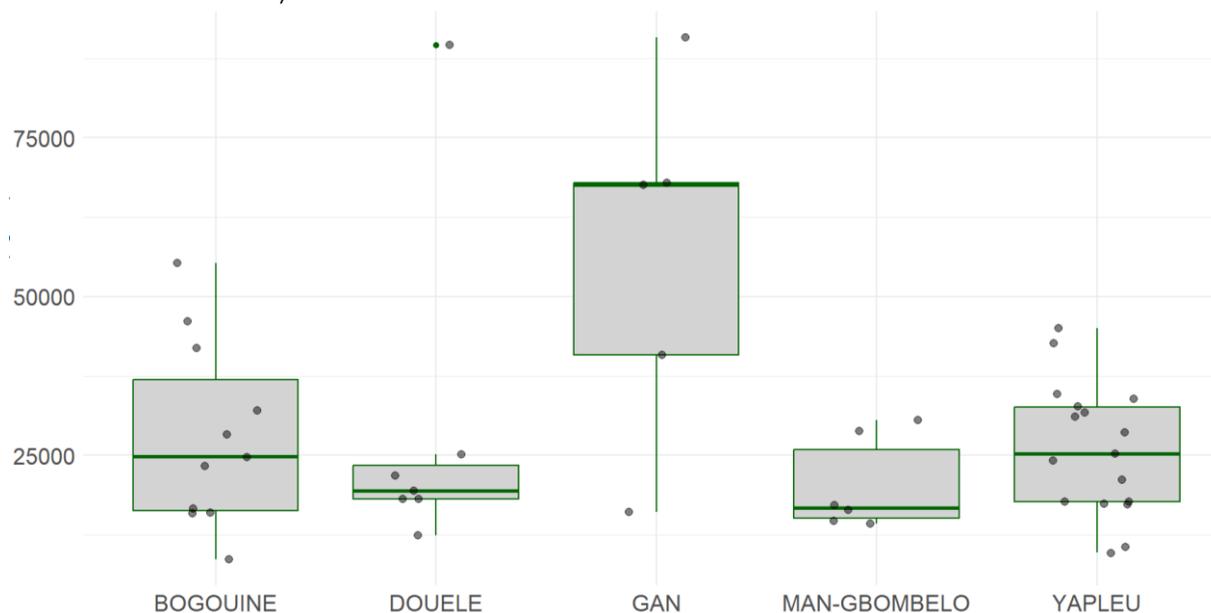


Figure 23 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages et aux cacaoyers, par section.

Le Tableau 16 reprend les données de biomasse (et les conversions) et la surface terrière totale (GHA). La section de Gan semble stocker davantage de carbone que les autres sections, lorsqu'on considère à la fois les arbres d'ombrage et les cacaoyers. Toutefois, la section n'a plus d'effet significatif (p-valeur KW = 0,156) lorsque le carbone total associé à la biomasse est considéré.

Tableau 16 - Quantité de biomasse et de carbone par hectare au total (arbres d'ombrages + cacaoyers), et surfaces terrières moyennes associées.

| Section | BT/ha [kg] | Se BT/ha | C/ha [kg] | Se C/ha | GHA | Se GHA |
|---------------|------------|----------|----------------------|---------|------|--------|
| Bogouine | 56150,0 | 8764,6 | 28075,0 ^a | 4382,3 | 15,2 | 1,7 |
| Douele | 58457,8 | 20351,6 | 29228,9 ^a | 10175,8 | 16,4 | 2,1 |
| Gan | 113300,0 | 25730,6 | 56650,0 ^a | 12865,2 | 17,9 | 3,4 |
| Man- Gbombelo | 40602,5 | 6019,2 | 20301,2 ^a | 3009,6 | 14,4 | 0,5 |
| Yapleu | 51921,5 | 5018,1 | 25960,8 ^a | 2509,1 | 17,4 | 1,2 |
| Global | 59122,5 | 5592,4 | 29561,2 | 2796,2 | 16,4 | 0,8 |

*BT/ha = Biomasse Totale (AGB + BGB) en kg/ha ; C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; GHA = surface terrière par hectare (arbres + cacaoyers, en m²/ha) ; NHA = densité (tiges/ha) ; Se = erreur standard associée à chaque valeur moyenne. Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.*

3.4.3.2. Facteur « classe d'âge »

3.4.3.2.1. Arbres d'ombrages

La Figure 24 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque classe d'âge et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

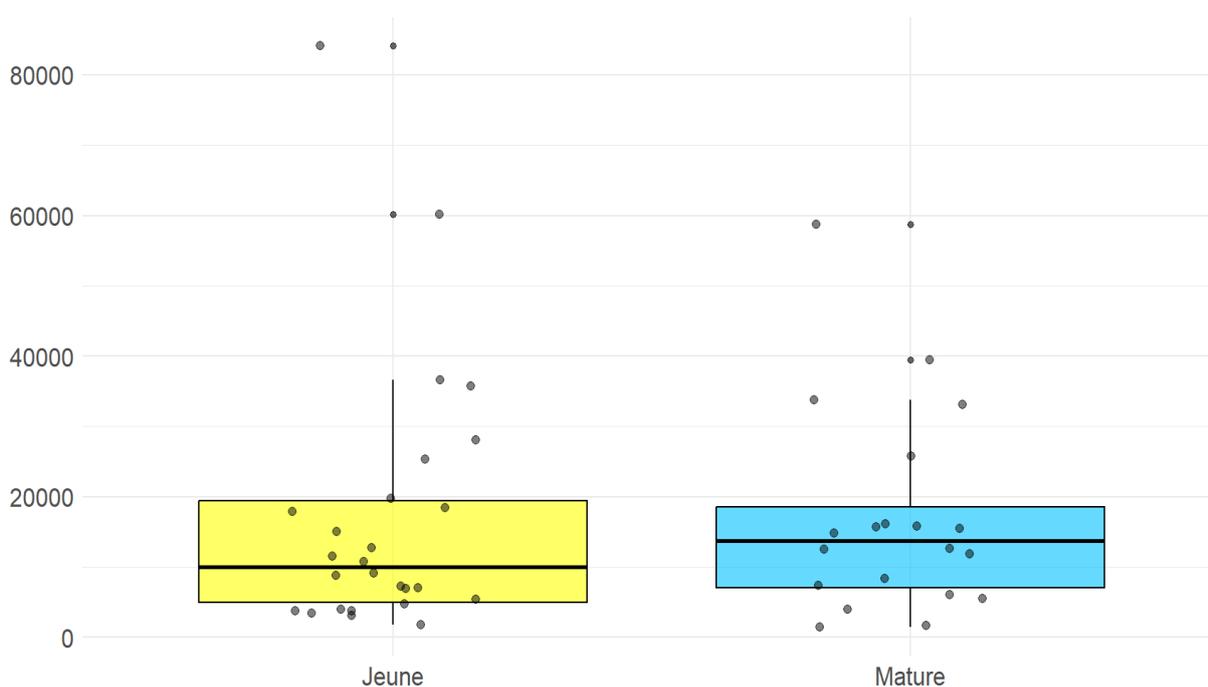


Figure 24 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages uniquement, par classe d'âge de plantation (Jeune ≤ 15 ans ; Mature > 15 ans).

Le Tableau 17 reprend le stockage de carbone au sein des arbres d'ombrage, par hectare et par classe d'âge. Le KW ne relève pas de différence significative (p-valeur = 0,58), traduisant l'absence d'effet de la classe d'âge du champ sur le stockage de carbone au sein des arbres d'ombrages. La densité d'arbres est différente entre les deux classes, mais pas significativement (p-valeur KW = 0,0512). Il n'y a pas de différence significative de GHA (p-valeur KW = 0,74).

Tableau 17 – Quantité moyenne de carbone stockée par hectare dans les arbres d'ombrages pour chaque classe d'âge, surfaces terrières et densités moyennes, erreurs standards associées. La classe d'âge n'a pas d'effet significatif sur le stockage de carbone par les arbres d'ombrages. Bien que la densité diffère, il n'y a pas de différence significative. La GHA n'est pas significativement différente non plus.

| Classe d'âge | C/ha [kg] | Se C/ha | NHA [tiges/ha] | Se NHA | GHA [m ² /ha] | Se GHA | n |
|------------------|-----------------------|---------|-------------------|--------|--------------------------|--------|----|
| Jeune (≤ 15 ans) | 17134,5 ^a | 3768,6 | 51,2 ^a | 5,7 | 4,1 ^a | 0,6 | 26 |
| Mature (>15 ans) | 17007,23 ^a | 3248,5 | 33,2 ^a | 4,3 | 3,9 ^a | 0,6 | 20 |

*C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; NHA = densité (tiges/ha) ; GHA = surface terrière par hectare (m²/ha) ; n = nombre de champs dans la classe ; Se = erreur standard associée à chaque valeur moyenne.
Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.*

3.4.3.2.2. Cacaoyers

La Figure 25 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque classe d'âge et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

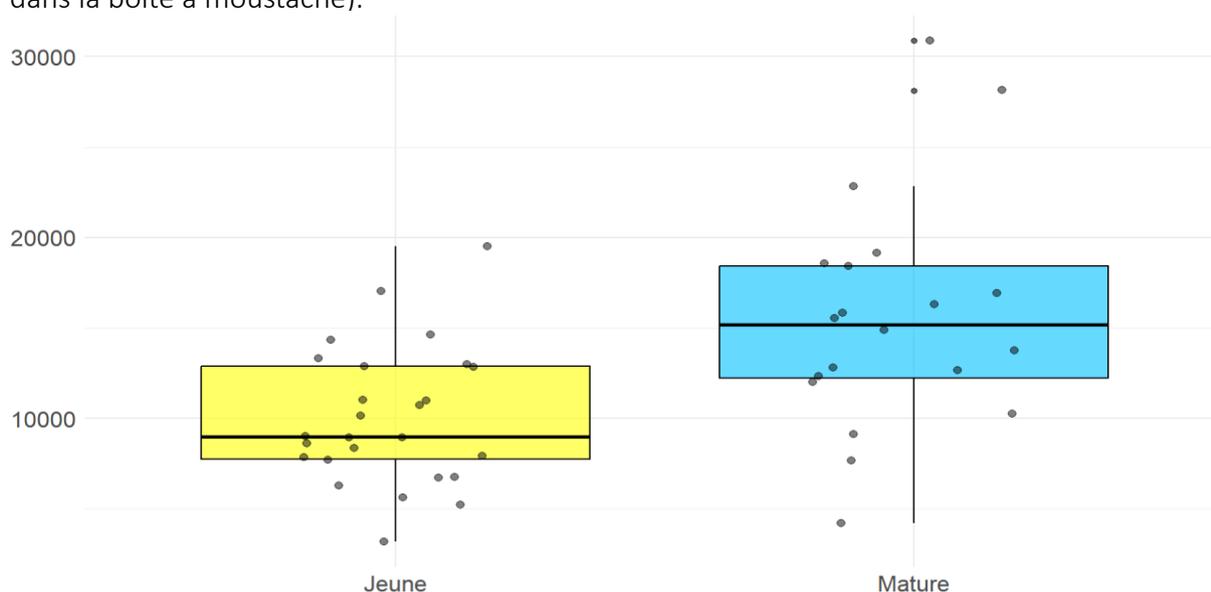


Figure 25 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux cacaoyers uniquement, par classe d'âge de plantation (Jeune ≤ 15 ans ; Mature > 15 ans).

Le Tableau 18 reprend le stockage de carbone au sein des cacaoyers, par hectare et par classe d'âge. Les jeunes cacaoyers stockent significativement moins de carbone que les cacaoyers matures (p-valeur KW = 0,00153**).

Tableau 18 - Quantité de carbone stockée par hectare dans les cacaoyers pour chaque classe d'âge et erreur standard associée. La classe d'âge a un effet significatif sur le stockage de carbone par les cacaoyers.

| Classe d'âge | C/ha [kg] | Se C/ha | n |
|------------------|----------------------|---------|----|
| Jeune (≤ 15 ans) | 10069,0 ^a | 749,4 | 26 |
| Mature (>15 ans) | 15619,1 ^b | 1434,0 | 20 |

*C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; n = nombre de champs dans la classe ; Se = erreur standard associée à la valeur moyenne.
Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.*

3.4.3.2.3. Global (arbres d'ombrage + cacaoyers)

La Figure 26 permet de visualiser les stocks de carbone par hectare de chaque classe d'âge et de se rendre compte de la variabilité des données autour de chaque valeur médiane (trait dans la boîte à moustache).

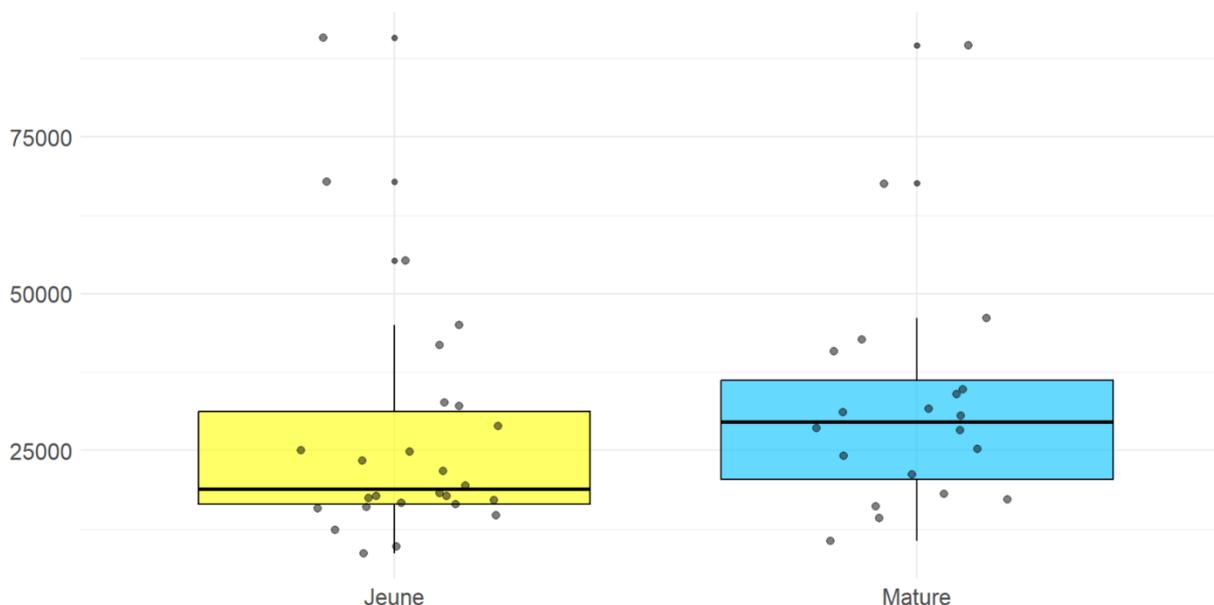


Figure 26 - Stockage de carbone par hectare (axe Y, en kilogrammes) associé aux arbres d'ombrages et aux cacaoyers, par classe d'âge de plantation (Jeune ≤ 15 ans ; Mature > 15 ans).

Le Tableau 19 reprend le stockage de carbone total, par hectare et par classe d'âge. Le stockage de carbone total est croissant à mesure que les champs vieillissent, mais les erreurs standards associées aussi. Le test de KW ne relève pas de différence significative (p-valeur = 0,121), traduisant l'absence d'effet de la classe d'âge du champ sur le stockage de carbone, lorsqu'on considère à la fois les arbres d'ombrages et les cacaoyers.

Tableau 19 - Quantité de carbone stocké par hectare au total (arbres d'ombrages + cacaoyers) pour chaque classe d'âge et erreur standard associée. La classe d'âge n'a pas d'effet significatif sur le stockage de carbone total.

| Classe d'âge | C/ha [kg] | Se C/ha | n |
|------------------------|----------------------|---------|----|
| Jeune (≤ 15 ans) | 27203,5 ^a | 3756,9 | 26 |
| Mature (>15 ans) | 32626,3 ^a | 4192,1 | 20 |

*C/ha = Stock de carbone (BT*0,5) par hectare (en kg) ; n = nombre de champs dans la classe ; Se = erreur standard associée à la valeur moyenne. Les coefficients (a, b, c, ...) attribuent les mêmes lettres aux moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles et combine les lettres.*

3.4.4. Relations allométriques

3.4.4.1. Diamètre – hauteur (arbres d’ombrage)

La Figure 27 présente le modèle allométrique établi pour les arbres d’ombrage, permettant de prédire la hauteur sur base du diamètre. Le nuage de points correspond aux relevés de terrain, base de l’équation, fondée sur des diamètres allant de 10 cm à 250 cm et indépendante de l’espèce. Cette relation allométrique n’est adaptée qu’à la zone agroforestière prospectée. Les hauteurs (H) sont prédites selon $1,699 \times \text{DHP}^{0,631}$, avec une précision de $\pm 4,4$ m, sans nécessiter de transformation de variable. Le coefficient de détermination (non directement défini pour un modèle puissance) de 0,63 est correct. Il a été calculé manuellement comme 1 moins le rapport entre la somme des carrés des résidus et la somme totale des carrés.

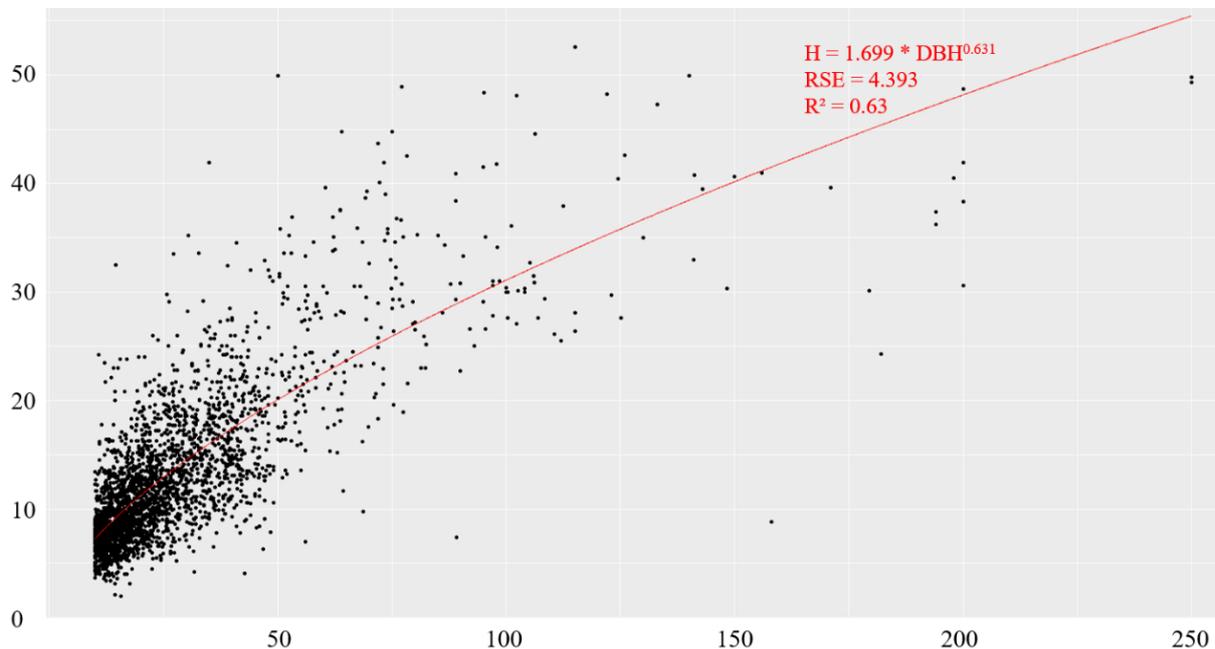


Figure 27 - Nuage de points correspondant aux données d’inventaires ; Axe X = dhp (en cm), Axe Y = hauteur (en m). Le modèle allométrique DHP - Hauteur établi est représenté par la courbe rouge. Les autres modèles testés sont disponibles en Annexe 8.

La distribution des résidus du modèle puissance est illustrée à la Figure 28. Il y a peu d’hétéroscédasticité, ce qui conforte la robustesse du modèle.

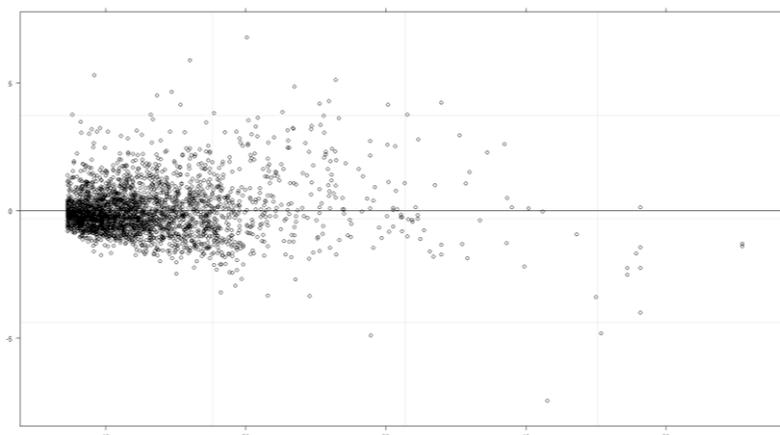


Figure 28 - Distribution des résidus du modèle allométrique DHP - Hauteur.

3.4.4.2. Diamètre moyen – âge de la plantation (cacaoyers)

La Figure 29 présente le modèle allométrique établi pour les cacaoyers, permettant de prédire le diamètre moyen des cacaoyers d'un champ selon son âge. Les relevés sont très hétérogènes et ne permettent pas réellement de construire une relation allométrique robuste. Toutefois, le diamètre moyen des cacaoyers (D) d'un champ peut être prédit selon $5,942 + 0,215 \times \text{Âge de la plantation}$. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0934$), censé se rapprocher de 1, démontre que la relation ne prédit pas fidèlement les diamètres.

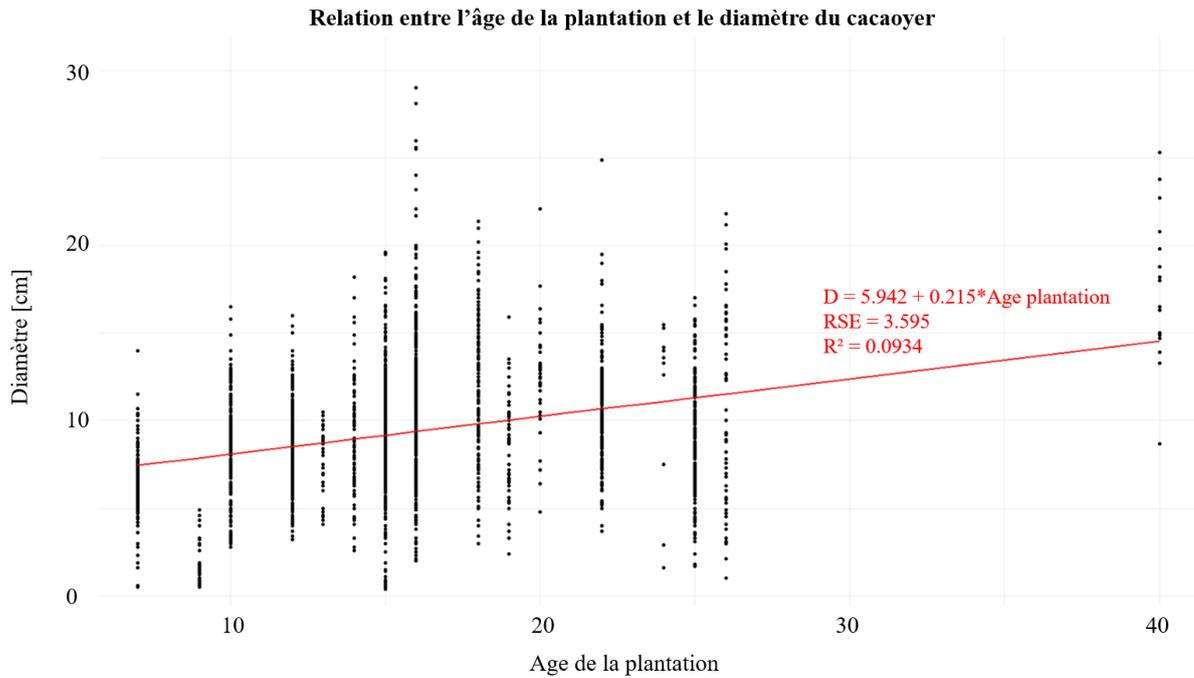


Figure 29 - Nuage de points correspondant aux données d'inventaires et modèle allométrique Age de la plantation – diamètre moyen établi (droite rouge) sur base des relevés de terrain.

La distribution des résidus (Figure 30) démontre l'hétérogénéité des valeurs.

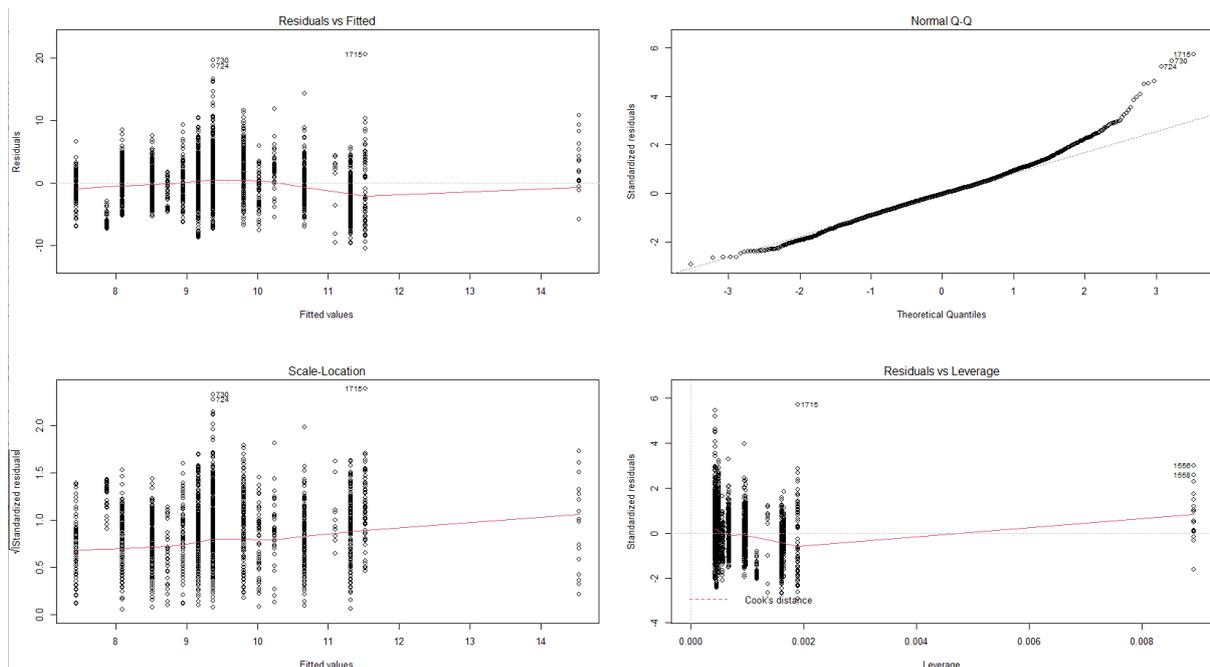


Figure 30 - Distribution des résidus du modèle âge de la plantation – diamètre moyen.

IV. DISCUSSION

4.1. Biodiversité ligneuse des champs agroforestiers

Un des objectifs de cette étude était de dresser un état des lieux de la biodiversité ligneuse des champs agroforestiers situés à l'extrême ouest de la Côte d'Ivoire. L'analyse de 70,42 hectares de plantations a révélé que la culture du cacao pratiquée par Yeyasso abrite 124 essences forestières, réparties en 94 genres et 33 familles botaniques. En extrapolant ces données, la richesse réelle de ce paysage agroforestier est estimée à 161 (± 19) espèces d'arbre. La densité moyenne d'arbres d'ombrage dans les champs est de 43 (± 4) tiges par hectare. En termes de couvert forestier (Figure 31), cela devrait représenter environ 9 % du couvert forestier originel, selon la caractérisation faite par Yao et al. (2005) ; Bertin et al. (2016) de la forêt du parc national de Taï, rare vestige de forêt tropicale dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire.



Figure 31 – Vue aérienne d'un champ agroforestier prospecté lors de la mission de terrain (Section de Bogouine). Photo prise au drone par ©Edouard Coenraets.

En Côte d'Ivoire, la biodiversité ligneuse qui a été observée au cours de ce travail est plutôt élevée, surpassant celle rapportée par Konan et al. (2011) dans le centre-ouest du pays. En effet, ces auteurs n'ont identifié que 4 espèces dans des plantations de 6 à 10 ans et 26 espèces dans des champs âgés de 21 à 40 ans, bien que l'échantillonnage ait porté sur un peu plus de 2 hectares seulement. Néanmoins, lors d'un inventaire floristique de 7 hectares au cœur de la forêt classée du Haut-Sassandra, Assale et al. (2021) ont recensé 129 espèces dans des cacaoyères de 5 à 10 ans sous couvert forestier, ce qui dépasse la diversité observée dans les champs agroforestiers étudiés ici.

À l'échelle mondiale, une étude similaire menée au Ghana, un autre grand producteur de cacao, a révélé une biodiversité plus faible, avec 90 espèces recensées sur 127 hectares (Richard et al., 2016). En Équateur, premier producteur de cacao en Amérique du Sud, Allen et al. (2024) ont obtenu des résultats comparables aux nôtres sur base de nos courbes d'accumulations (Figure 20) puisqu'ils ont observés 58 essences sur 6,5 hectares de champs.

Toutefois, il semble que les agroforêts à cacao du Cameroun soient plus riches en espèces. Saj et al. (2019) y ont dénombré 192 espèces sur un inventaire couvrant seulement 11,4 hectares. De même, Abada Mbolo et al. (2016) ont recensé 57 espèces sur un échantillon de moins de 2 hectares (20 sites de 900 m² chacun). Bien que les courbes d'accumulation en espèces pour les sections de Bogouine, Douele, et Yapleu (Figure 20) soient comparables aux résultats de Tane Fomekong et al. (2023), qui ont identifié 44 espèces sur 5,5 hectares de champs agroforestiers au Cameroun, ce n'est pas le cas pour les sites de Gan et Man-Gbombelo.

Les différences en termes de richesses sont liées à l'intensivité des pratiques. Dans certaines régions du Cameroun, notamment à l'Est, les plants de cacao sont souvent plantés dans des forêts peu éclaircies (Saj et al., 2019). Les cacaoculteurs entretiennent plus ou moins leurs champs en fonction du cours du cacao et des contraintes liées aux filières de commercialisation (Lescuyer et al., 2020).

Les espèces les plus fréquemment rencontrées dans notre inventaire, telles que *Elaeis guineensis*, *Cola nitida*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, et *Ficus sur*, se retrouvent également en abondance dans plusieurs autres études, comme celles de Tane Fomekong et al. (2023) ; Asigbaase et al. (2021) ; Kougbo et al. (2020). Cette présence récurrente pourrait s'expliquer par les préférences des producteurs, qui valorisent particulièrement ces espèces. En effet, les graines du palmier à huile (*Elaeis guineensis*) sont commercialisables et utilisées dans l'alimentation (sauce, huile rouge), tandis que les feuilles servent à la construction d'abris. De même, la noix de cola (*Cola nitida*), l'avocat (*Persea americana*) et la mangue (*Mangifera indica*) sont non seulement consommés et vendus, mais leur bois est également utilisé comme combustible. Ces espèces sont donc naturellement privilégiées par les producteurs, car elles leur permettent de diversifier leurs sources de revenus.

En ce qui concerne les essences forestières, les résultats concordent avec ces études antérieures (Tane Fomekong et al., 2023 ; Asigbaase et al., 2021 ; Kougbo et al., 2020), notamment par l'abondance de *Ceiba pentandra*, *Sterculia tragacantha*, *Morinda lucida*, *Milicia excelsa*, *Albizia adianthifolia*, *Triplochiton scleroxylon*, et *Entandrophragma angolense*. Parmi les espèces identifiées, 13 figurent sur la liste rouge de l'UICN (Annexe 9). Il est donc légitime de considérer que 10 % des essences agroforestières présentent un intérêt prioritaire pour la conservation. Cette observation, également partagée par Saj et al. (2019) et Abada Mbolo et al. (2016), souligne l'importance des cacaoyères dans la conservation de certaines espèces ligneuses.

Cette diversité ligneuse n'a cependant pas été observée de manière homogène à travers les différentes sections étudiées. Il a été remarqué que les sections voisines de Bogouine, Douele, et Yapleu présentaient une plus grande richesse en espèces. Bien que cette tendance ait été confirmée par les divers indices de biodiversité calculés, il est important de noter que les régions de Gan et Man-Gbombelo ont bénéficié d'un taux de sondage plus faible. Ces différences dans l'effort d'échantillonnage pourraient, en partie, expliquer les disparités apparentes entre les sections analysées. Néanmoins, il semble que la zone située au sud de Man, un centre majeur de la production de cacao pour Yeyasso, ait évolué de manière similaire, contribuant à la formation d'un paysage agroforestier relativement uniforme.

4.2. Stock de carbone des champs agroforestiers à cacaoyers

4.2.1. Stockage global

Les résultats de cette étude estiment un stockage moyen de 77,6 tonnes de carbone par hectare dans les parcelles étudiées. Ce chiffre inclut le carbone organique du sol, défini à 49,4 t/ha pour l'ensemble des parcelles, ainsi que le carbone séquestré par les plants de cacao ($12,4 \pm 0,8$ tC/ha) et les arbres d'ombrage ($15,8 \pm 1,9$ tC/ha). Cela indique que la biomasse associée aux ligneux atteint en moyenne $28,2 \pm 2$ tC/ha. Ce stock est inférieur à celui calculé par Tane Fomekong et al. (2023) au Cameroun (55,81 tC/ha), mais dépasse celui estimé par Assale et al. (2021) à 11,77 tC/ha pour des plantations de plus de 10 ans, en Côte d'Ivoire. Notre estimation du stockage via la biomasse ligneuse est plus proche des champs dits « conventionnels » au Ghana (27,1 tC/ha) que de ceux qualifiés de « biologiques » (49,1 tC/ha) (Asigbaase et al., 2021).

Les divergences observées entre les différentes études peuvent être attribuées aux méthodes employées, qu'il s'agisse des techniques d'échantillonnage, des densités de bois utilisées ou des modèles allométriques choisis. Selon Molto et al. (2013), le choix de l'équation allométrique constitue la principale source d'erreur dans les estimations de biomasse. Par exemple, dans l'étude de Tane Fomekong et al. (2023), l'équation pantropicale de Chave et al. (2014) a été utilisée aussi bien pour les arbres d'ombrage que pour les cacaoyers, tandis qu'une équation différente (Pearson et al., 2005), basée uniquement sur la hauteur, a été appliquée pour les palmiers. En revanche, l'étude de Asigbaase et al. (2021) a opté pour le tarif de Andrade et al. (2008) pour les cacaoyers, mais a utilisé des équations distinctes pour la biomasse des palmiers (Brown, 1997) et des agrumes (Schroth et al., 2002). Enfin, l'étude d'Assale et al. (2021) repose sur une équation plus ancienne (Chave et al., 2005) pour estimer la biomasse des arbres d'ombrage, et sur une autre équation (Segura et al., 2006) pour les cacaoyers.

Bien qu'il ne soit pas légitime de parler d'erreur dans le choix des équations allométriques effectué par ces auteurs ou par cette étude, il est important de garder à l'esprit que ces décisions peuvent justifier les différences entre les stockages de carbone. Cependant, malgré ces biais qui trouvent une justification, il apparaît que les stocks de carbone calculés dans cette étude sont plus faibles qu'ailleurs, certainement expliqués par un nombre plus faible d'arbres de grandes dimensions maintenus dans les champs.

4.2.2. Contribution par essences

Au cours de cette étude, il a été constaté que les essences qui ont le plus contribué au stockage du carbone étaient celles qui étaient soit les plus abondantes (*Elaeis guineensis*, *Cola nitida*, *Milicia excelsa*), soit aux bois les plus denses (*Petersianthus macrocarpus*, *Amphimas pterocarpoides*), soit celles présentant les plus grandes dimensions (*Ceiba pentandra*, *Triplochiton scleroxylon*, *Pterygota macrocarpa*), ou qui combinaient ces trois caractéristiques. Il est également important de noter que des arbres tels que *Pouteria altissima*, *Ficus ovata*, et *Pterygota macrocarpa* ont joué un rôle majeur dans le stockage de carbone en tant qu'individu, certainement en raison de leurs diamètres impressionnants dans cette région (respectivement 150, 141, et 102 cm).

4.2.3. Contribution par classes de diamètre

L'étude a mis en évidence l'importance des arbres de gros diamètre dans le stockage du carbone. En effet, les arbres de diamètre ≥ 60 cm, bien que représentant seulement 5,8% des tiges inventoriées, contribuent à 62,8% du stockage total de carbone des arbres d'ombrage. Ce constat est en accord avec l'étude pantropicale de Slik et al. (2013), qui affirme que les arbres ayant un diamètre ≥ 70 cm expliquent 70 % de la biomasse aérienne. Cette observation est également corroborée par Chave et al. (2001) ainsi que par Anobla et al. (2016), qui ont montré que les grands arbres concentrent une part majeure du stock de carbone forestier dans leur biomasse aérienne. Enfin, Bastin et al. (2015) confirment cette tendance en démontrant que les gros arbres, représentant seulement 1,5 % des espèces recensées sur divers sites en Afrique centrale, détiennent 50 % de la biomasse aérienne. Il est donc crucial d'inclure la conservation de ces puits de carbone essentiels dans les stratégies de préservation, compte tenu des multiples fonctions écologiques qu'ils remplissent.

4.2.4. Différences entre les sections de la coopérative

Cette étude n'a pas révélé de différences significatives dans le stockage de carbone par les cacaoyers entre les différentes sections. Bien que le dispositif permanent de placettes ait mis en évidence quelques variations significatives dans les densités de plantation, ces différences n'ont pas eu d'impact sur la séquestration du carbone. En d'autres termes, il est probable que les pratiques culturales soient relativement homogènes à travers les différentes régions, malgré les variations de gradient montagneux, pédologique ou ethnique. Cependant, les densités de plantation observées sont élevées par rapport aux recommandations. En effet, un rapport sur le développement durable du cacao en Afrique de l'Ouest (Fare et al., 2023) suggère une densité idéale de 1333 pieds par hectare, tandis que les résultats indiquent des densités comprises entre 1293 (± 42) et 2128 (± 89) tiges/ha. Une densité de plantation trop élevée peut, en effet, avoir des effets négatifs sur la productivité des cacaoyères.

Concernant les arbres d'ombrage, la densité varie selon les sections : à Bogouine, elle atteint son maximum avec 69 (± 7) tiges par hectare, tandis qu'à Man-Gbombelo, elle est au minimum avec seulement 16 (± 4) tiges par hectare. Cependant, la densité seule n'est pas un

indicateur suffisant. La surface terrière totale des arbres d'ombrage est de 4,0 m²/ha, mais elle présente également des variations selon les sections. Par exemple, bien que la densité d'arbres à Gan ne soit pas la plus élevée, la surface terrière y est au moins deux fois supérieure à celle des autres sections, atteignant 8,4 (±1,8) m²/ha. Cela indique que les arbres dans cette section ont majoritairement de plus grands diamètres. De plus, Gan a montré des stocks de carbone particulièrement élevés dans les arbres d'ombrage, avec 45,7 (±12) tC/ha, un chiffre supérieur à celui des autres régions et significativement différent de Man-Gbombelo. Ainsi, il apparaît que les gros arbres, bien que moins nombreux, contribuent de manière significative au stockage du carbone par rapport à une grande quantité de petits arbres. Il est possible que la présence accrue de grands arbres soit liée au relief local particulièrement montagneux, ce qui rend l'abattage plus difficile.

4.2.5. Différences entre les classes d'âge des plantations

Nos résultats concernant la densité des arbres d'ombrage en fonction de l'âge des champs corroborent ceux d'Assale et al. (2021), qui observent une diminution de la densité avec le vieillissement des champs. En effet, la densité passe de 51 (±6) tiges par hectare pour les jeunes champs (≤ 15 ans) à 33 (±4) tiges pour les plus anciens (> 15 ans). Cette diminution peut être expliquée par plusieurs facteurs. D'une part, l'abondance d'arbres, notamment des espèces forestières, dans les jeunes cacaoyères est due à l'importance de l'ombrage pour la protection des jeunes plants de cacaoyers (Adou Yao, 2005). D'autre part, même si cela concerne moins une coopérative reconnue, le nombre élevé d'espèces forestières dans les jeunes cacaoyères peut aussi être attribué à la stratégie des agriculteurs visant à dissimuler leurs parcelles agricoles durant les premières années d'établissement des cacaoyères. Cette approche vise à tromper la surveillance de la SODEFOR en donnant l'impression d'une forêt en bon état vue du ciel, bien que la végétation soit dégradée dans le sous-bois (Kouakou et al., 2015).

Un autre constat important de ce mémoire est le rôle crucial des arbres d'ombrage dans le stockage total du carbone, contribuant à 56% du carbone stocké par la biomasse végétale (Tableau 10). De plus, malgré les variations d'âge des plantations, aucune différence significative n'a été observée dans le stockage total de carbone (arbres + cacaoyers). Cependant, les jeunes plantations présentent un stockage de carbone significativement inférieur dans la biomasse des cacaoyers par rapport aux plantations matures. Cela suggère que les arbres d'ombrage des champs plus jeunes compensent le déficit de stockage des jeunes cacaoyers, plus fins.

4.3. Allométrie

4.3.1. Relation Diamètre – Hauteur

Ce mémoire propose une équation allométrique spécifique au contexte local, qui pourra être utilisée pour poursuivre l'évaluation des stocks de carbone (Figure 27). Cette équation permet de prédire la hauteur des arbres uniquement à partir de la mesure de leur diamètre. Le modèle présente une robustesse notable, avec une précision d'estimation des hauteurs de l'ordre de 4 mètres. En conséquence, il constitue un outil fiable pour les futures évaluations et

analyses des stocks de carbone, offrant ainsi une base suffisamment solide pour le suivi de la croissance des arbres.

4.3.2. Relation âge de la plantation – diamètre moyen des cacaoyers

Cette étude a également développé une équation allométrique pour estimer le diamètre moyen des cacaoyers dans un champ, en fonction de l'âge de la plantation. Étant donné que l'installation d'un système de placettes aléatoires peut être complexe et chronophage, cette équation devait permettre de prédire les diamètres, facilitant ainsi les études sur le stockage du carbone. Toutefois, en raison de la grande hétérogénéité observée dans les données, nous déconseillons l'utilisation de ce modèle, car il s'avère peu fiable. Une approche alternative pourrait consister en l'estimation de la densité de plantation, combinée à la mesure de quelques diamètres échantillonnés, afin d'obtenir des résultats plus précis et fiables.

4.4. Limites de l'étude

Cette étude présente certaines limites qu'il convient de souligner avant de tirer des conclusions. Tout d'abord, l'objectif initial de réaliser un échantillonnage stratifié avec des fractions sondées constantes de 5% n'a pas été atteint. Il s'est révélé trop ambitieux en raison du temps nécessaire pour mettre en place un dispositif permanent. Par conséquent, les sections ne sont pas représentées de manière équitable en termes de surface, et les résultats reposent sur des taux de sondage inégaux.

Une autre faiblesse de cette étude réside dans la capacité des opérateurs à identifier les espèces sur le terrain. Les identifications botaniques peuvent contenir des erreurs, notamment parce que les opérateurs n'étaient pas des botanistes qualifiés, ce qui pourrait entraîner des omissions ou des confusions entre espèces. Toutefois, ayant pris de nombreuses photos et constitué des herbiers, nous pouvons raisonnablement penser que les identifications sont globalement fiables.

En outre, le travail sur le terrain est inévitablement sujet à des erreurs de mesure. Il est irréaliste de croire qu'aucune erreur n'a été commise lors de la mesure des hauteurs et des diamètres ou lors de l'encodage des données. Bien que les données aient été soigneusement vérifiées pour éviter, par exemple, la confusion entre les mesures de diamètre et de hauteur, les erreurs de relevé sur le terrain sont difficilement contrôlables.

Enfin, comme mentionné précédemment, le choix des équations allométriques et la densité du bois sont des aspects controversés, ce qui peut également influencer les résultats de l'étude. Si l'équation pantropicale de (Chave et al., 2014) fait aujourd'hui l'unanimité quand le diamètre et la hauteur sont effectivement mesurés, les équations utilisées pour estimer la biomasse des cacaoyers ou du carbone du sol sont plus critiquables car elles proviennent de sites potentiellement différents des nôtres. Pour de meilleures estimations, il faudrait donc pouvoir estimer plus précisément ces deux compartiments.

4.5. Perspectives

La présente étude, réalisée au cœur de la cacao-culture pratiquée par Yeyasso, permet de dégager quelques priorités. Parmi celles-ci, il serait essentiel d'accorder une attention particulière à la zone de Man et Gbombelo, qui ont des valeurs plus faibles de diversité et de biomasse.

De manière plus générale, il est essentiel de poursuivre les efforts de plantation d'arbres dans les champs, comme cela a été entrepris par la coopérative et ses partenaires. Depuis 2020, 60 000 arbres ont été plantés dans les champs de la coopérative. La biomasse, augmentée par la croissance de ces arbres, pourrait permettre à la coopérative et à ses producteurs de participer à la dynamique de la créditation carbone. À ce jour, les résultats montrent une moyenne de 285 tCO₂ séquestrée par hectare, soit environ 3133 USD par hectare sur les marchés volontaires.

Cependant, la procédure de créditation carbone ne se base pas sur le capital sur pied, mais sur la comparaison entre un scénario de référence et un projet de séquestration carbone. La quantification de l'accroissement des arbres dans le temps, combinée à la plantation, la diversification et le suivi des nouveaux plants intégrés dans les champs, pourrait permettre à la coopérative de s'inscrire dans ce nouveau système de créditation. Cette nouvelle source de revenus pourrait également contribuer à la diversification des revenus des producteurs.

Toutefois, bien que la plantation d'arbres dans les champs soit une partie de la solution, elle n'en constitue pas l'entièreté. La plantation est en vogue et rassure le grand public, mais l'essentiel n'est pas là. L'objectif principal est de conserver les arbres déjà présents dans les parcelles et de changer le paradigme de la monoculture. Il est inutile d'intégrer de jeunes plants si les producteurs continuent à abattre les arbres matures. Pourtant, au cours de la mission sur le terrain, il a été constaté que certains producteurs souhaitent encore très régulièrement abattre des arbres sur pied, parfois pour en planter d'autres ailleurs, parfois pas. Dans certains champs, la situation est critique et mènera à une perte importante de biomasse ligneuse et des services écosystémiques associés. Il est essentiel d'intensifier la sensibilisation des producteurs sur les pratiques agroforestières, en démontrant les bénéfices agronomiques du couvert forestier.

Il a été démontré que les arbres de grande taille étaient les plus efficaces pour le stockage de carbone. Un effort particulier de conservation devrait donc être consacré à ces individus, car ils remplissent diverses autres fonctions écologiques en plus du stockage de carbone. Un problème majeur est que ces arbres attirent régulièrement les exploitants forestiers, qui passent des contrats d'accord plus ou moins commun entre scieur et planteur. L'objectif est donc de convaincre chaque producteur de conserver ses arbres, moyennant un retour financier nouveau et valable. Ainsi, à titre d'exemple, Jadán et al. (2015) avaient estimé que pour compenser la perte de revenus liée à la baisse de production du cacao ; chaque tonne de CO₂ stockée devrait être rémunérée à hauteur de 4,85 USD.

Idéalement, il serait bénéfique d'élargir notre perspective au-delà des simples limites des parcelles de cacao. En effet, il a été observé sur le terrain que les bordures des champs présentent très souvent une diversité ligneuse intéressante, offrant un potentiel de conservation et de séquestration du carbone bien plus important que les champs eux-mêmes (Figure 32). L'objectif ultime serait de préserver ces fragments de forêts ivoiriennes, devenus si rares, et, avec un peu d'espoir, de les voir s'étendre et prospérer en tant que réelles zones tampons.



Figure 32 - Une bordure de champ, réel vestige de forêt à préserver...

V. CONCLUSION

Cette étude a permis de dresser un bilan de la biodiversité ligneuse et du stockage de carbone dans les champs agroforestiers de cacao à Yeyasso, situé à l'extrême ouest de la Côte d'Ivoire. En analysant 70,42 hectares de plantations, 124 essences forestières réparties en 94 genres et 33 familles botaniques, ont pu être identifiées et une estimation de la richesse réelle à 161 (± 19) espèces a pu être établie. La densité des arbres d'ombrage est de 43 (± 4) tiges par hectare. Ceci démontre une biodiversité ligneuse encourageante, surpassant les résultats de certaines études antérieures en Côte d'Ivoire et dans d'autres pays producteurs de cacao, comme le Ghana et l'Équateur. Cependant, cette région ne reflète pas toute la Côte d'Ivoire et les champs de cacao au Cameroun affichent une richesse en espèces encore plus élevée, soulignant les variations régionales.

Concernant le stockage de carbone, l'étude a révélé un stock moyen de 77,6 tonnes de carbone par hectare, incluant le carbone organique du sol, la biomasse (AGB + BGB) des arbres et celles des plants de cacao. Cette valeur, plutôt faible, car demeurant inférieur à celle observée au Cameroun est toutefois supérieur aux champs déjà analysés en Côte d'Ivoire. Les arbres de gros diamètre (≥ 60 cm) se révèlent essentiels pour le stockage de carbone, contribuant à 63 % du total, ce qui corrobore les observations de plusieurs études sur la biomasse aérienne des grands arbres. Ainsi, la densité des arbres d'ombrage devrait systématiquement être observée parallèlement à leur surface terrière.

L'analyse par sections révèle des variations dans le stockage de carbone et la biodiversité, avec des zones comme Gan montrant des stocks de carbone élevés grâce à des arbres de plus grands diamètres. En revanche, des sections telles que Man et Gbombelo montrent une richesse spécifique et un stockage de carbone plus faibles, ce qui pourrait en partie s'expliquer par un taux de sondage plus faible.

En ce qui concerne les équations allométriques développées, celle pour estimer la hauteur des arbres à partir du diamètre s'avère robuste, tandis que l'autre pour prédire le diamètre moyen des cacaoyers selon l'âge de la plantation montre des résultats peu fiables en raison de la grande hétérogénéité des données.

Pour l'avenir, il est crucial de focaliser les efforts sur l'enrichissement des sections de Man et de Gbombelo, d'accroître les plantations d'arbres pour augmenter la biomasse et d'explorer les opportunités de crédit carbone. La conservation des arbres matures, particulièrement ceux de grande taille, est essentielle en raison de leur contribution significative au stockage du carbone et à la biodiversité. Il est également recommandé de sensibiliser davantage les producteurs aux pratiques agroforestières durables et de préserver les bordures des champs, qui offrent un potentiel de conservation important. Enfin, en vue d'améliorer les estimations, les prochains travaux scientifiques devraient se focaliser sur l'estimation du carbone stocké dans les plants de cacao et dans le sol.

VI. CONTRIBUTION PERSONNELLE DE L'ÉTUDIANT

J'ai commencé mon implication dans ce mémoire via la rencontre du personnel de Galler, afin de fixer les bases du projet. Par la suite, j'ai réalisé l'échantillonnage des parcelles inventoriées. Sur base de la littérature et des recommandations faites par M. Coenraets et Doucet, j'ai également rédigé un protocole de terrain décrivant l'installation des dispositifs permanents. De mi-février à mi-mai, je suis parti en Côte d'Ivoire afin d'installer les dispositifs et collecter mes données de terrain. J'y ai alors vécu une expérience immersive, en plein cœur des villages et de la culture locale. En compagnie des dirigeants de la coopérative, lors des assemblées avec les employés et les producteurs, j'ai également eu l'opportunité de prendre la parole sur les sujets attachant à la durabilité. De retour en Belgique, je me suis chargé de l'analyse complète des données (identifications botaniques avec le Pr. Doucet, tri des données, analyses Rstudio et Excel). La rédaction du présent document a également été effectuée par moi-même, tout comme la défense orale.

VII. BIBLIOGRAPHIE

Abada Mbolo M.M., Zekeng J.C., Mala W.A., Fobane J.L., Djomo Chimi C., Tangboulou Ngavounsia, Nyako C.M., Menyene L.F.E. & Tamanjong Y.V., 2016. The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agrofor. Syst.* **90**(4), 577–590, DOI:10.1007/s10457-016-9945-8.

Adou Yao C.Y., 2005. Pratiques paysannes et dynamique de la biodiversité dans la Forêt Classée de Monogaga (Côte d'Ivoire).

African Plant Database, July-29-2024. . <https://africanplantdatabase.ch/>, (29/07/2024).

Aleman J.C., Jarzyna M.A. & Staver A.C., 2017. Forest extent and deforestation in tropical Africa since 1900. *Nat. Ecol. Evol.* **2**(1), 26–33, DOI:10.1038/s41559-017-0406-1.

Allen S.L., Robayo L.A., Martin C.D. & Ganem J.L., 2024. Productivity, Soil Health, and Tree Diversity in Dynamic Cacao Agroforestry Systems in Ecuador. *Land* **13**(7), 959, DOI:10.3390/land13070959.

Andrade H.J., Segura M., Somarriba E. & Villalobos M., 2008. Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica.

Andres C., Comoé H., Beerli A., Schneider M., Rist S. & Jacobi J., 2016. Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry. In: Lichtfouse, E. ed. *Sustainable Agriculture Reviews*, Sustainable Agriculture Reviews. Cham: Springer International Publishing, 121–153.

Angelsen A., Brockhaus M., Sunderlin W.D. & Verchot L.V., 2013. *Analyse de la REDD+ : Les enjeux et les choix*, Indonésie.

Anglaaere L.C.N., Cobbina J., Sinclair F.L. & McDonald M.A., 2011. The effect of land use systems on tree diversity: farmer preference and species composition of cocoa-based agroecosystems in Ghana. *Agrofor. Syst.* **81**(3), 249–265, DOI:10.1007/s10457-010-9366-z.

Anobla A.O.M.M. & N'Dja J.K., 2016. Dynamique de la végétation de Bamo et stocks de carbone dans la mosaïque de végétation. *Eur. Sci. J.* **12**(18).

Asaah E., Degrande A., Tchoundjeu Z., Biloso A., Habonimana B., Hicintuka C. & Kaboneka S., 2013. Agroforesterie et domestication des arbres en Afrique centrale. *For. Bassin Congo État For. 2013 Chapitre 7*, 185–195.

Asare R., Markussen B., Asare R.A., Anim-Kwapong G. & Ræbild A., 2019. On-farm cocoa yields increase with canopy cover of shade trees in two agro-ecological zones in Ghana. *Clim. Dev.* **11**(5), 435–445, DOI:10.1080/17565529.2018.1442805.

Asigbaase M., Dawoe E., Lomax B.H. & Sjoersten S., 2021. Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests, Ghana. *Agric. Ecosyst. Environ.* **306**, 107192, DOI:10.1016/j.agee.2020.107192.

Asitoakor B.K., Vaast P., Ræbild A., Ravn H.P., Eziah V.Y., Owusu K., Mensah E.O. & Asare R., 2022. Selected shade tree species improved cocoa yields in low-input agroforestry systems in Ghana. *Agric. Syst.* **202**, 103476, DOI:10.1016/j.agry.2022.103476.

Assale A.A.Y., Kouakou K.A., Kouakou A.T.M., Kpangui K.B. & Barima Y.S.S., 2021. Diversité végétale et potentiel de sequestration de carbone des espaces domaniaux anthropisés : cas de la forêt classée du Haut-Sassandra (centre-ouest de la Côte d'Ivoire).

Assiri A., René Y.G., Olivier D., Ismaël B., Jules K.Z. & Amoncho A., 2009. Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. . *Vol.* **2**(1).

Aubréville A., 1959. La flore forestière de la Côte d'Ivoire.

Barima Y.S.S., Kouakou A.T.M., Bamba I., Sangne Y.C., Godron M., Andrieu J. & Bogaert J., 2016. Cocoa crops are destroying the forest reserves of the classified forest of Haut-Sassandra (Ivory Coast). *Glob. Ecol. Conserv.* **8**, 85–98, DOI:10.1016/j.gecco.2016.08.009.

Bastin J.-F., Barbier N., Réjou-Méchain M., Fayolle A., Gourlet-Fleury S., Maniatis D., De Haulleville T., Baya F., Beeckman H., Beina D., Couteron P., Chuyong G., Dauby G., Doucet J.-L., Droissart V., Dufrene M., Ewango C., Gillet J.F., Gonmadje C.H., Hart T., Kavali T., Kenfack D., Libalah M., Malhi Y., Makana J.-R., Pélissier R., Ploton P., Serckx A., Sonké B., Stevart T., Thomas D.W., De Cannière C. & Bogaert J., 2015. Seeing Central African forests through their largest trees. *Sci. Rep.* **5**(1), 13156, DOI:10.1038/srep13156.

Bayala J., Sanou J., Bazié H.R., Coe R., Kalinganire A. & Sinclair F.L., 2020. Regenerated trees in farmers' fields increase soil carbon across the Sahel. *Agrofor. Syst.* **94**(2), 401–415, DOI:10.1007/s10457-019-00403-6.

Bertin G.B.Z., Aimé V.B.T., Djaha K., Bruno K.K. & Yves A.Y.C., 2016. Diversité floristique ligneuse et structure de la végétation des territoires des chimpanzés dans le Parc National de Taï, Sud-ouest Côte d'Ivoire [Woody species diversity and vegetation structure of chimpanzees' territories in Taï National Park, South-west Côte d'Ivoire]. *Int. J. Innov. Appl. Stud.* **18**(3), 749–759.

Blaser W.J., Opong J., Yeboah E. & Six J., 2017. Shade trees have limited benefits for soil fertility in cocoa agroforests. *Agric. Ecosyst. Environ.* **243**, 83–91, DOI:10.1016/j.agee.2017.04.007.

Boyce J.K., 2018. Carbon Pricing: Effectiveness and Equity. *Ecol. Econ.* **150**, 52–61, DOI:10.1016/j.ecolecon.2018.03.030.

Brou Y.T., Oszwald J., Bigot S. & Servat E., 2005. Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'état en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ces derniers massifs forestiers ? *Télédétection* **5**, 263–275.

Brown S., 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*, Food & Agriculture Org.

Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P.W., Trisos C., Romero J., Aldunce P., Barrett K., Blanco G., Cheung W.W.L., Connors S., Denton F., Diongue-Niang A., Dodman D., Garschagen M., Geden O., Hayward B., Jones C., Jotzo F., Krug T., Lasco R., Lee Y.-Y., Masson-Delmotte V., Meinshausen M., Mintenbeck K., Mokssit A., Otto F.E.L., Pathak M., Pirani A., Poloczanska E., Pörtner H.-O., Revi A., Roberts D.C., Roy J., Ruane A.C., Skea J., Shukla P.R., Slade R., Slangen A., Sokona Y., Sörensson A.A., Tignor M., Van Vuuren D., Wei Y.-M., Winkler H., Zhai P., Zommers Z., Hourcade J.-C., Johnson F.X., Pachauri S., Simpson N.P., Singh C., Thomas A., Totin E., Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez-Vallejo C., Pereira J.J., Pichs-Madruga R., Rose S.K., Saheb Y., Sánchez Rodríguez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., Yassaa N., Alegría A., Armour K., Bednar-Friedl B., Blok K., Cissé G., Dentener F., Eriksen S., Fischer E., Garner G., Guivarch C., Haasnoot M., Hansen G., Hauser M., Hawkins E., Hermans T., Kopp R., Leprince-Ringuet N., Lewis J., Ley D., Ludden C., Niamir L., Nicholls Z., Some S., Szopa S., Trewin B., Van Der Wijst K.-I., Winter G., Witting M., Birt A., Ha M., Romero J., Kim J., Haites E.F., Jung Y., Stavins R., Birt A., Ha M., Orendain D.J.A., Ignon L., Park S., Park Y., Reisinger A., Cammaramo D., Fischlin A., Fuglestvedt J.S., Hansen G., Ludden C., Masson-Delmotte V., Matthews J.B.R., Mintenbeck K., Pirani A., Poloczanska E., Leprince-Ringuet N. & Péan C., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Chauveau J.-P. & Léonard E., 1996. Côte d'Ivoire's Pioneer Fronts: Historical and Political Determinants of the Spread of Cocoa Cultivation. In: Clarence-Smith, W.G. ed. *Cocoa Pioneer Fronts since 1800*. London: Palgrave Macmillan UK, 176–194.

Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.-P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B. & Yamakura T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* **145**(1), 87–99, DOI:10.1007/s00442-005-0100-x.

Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S.L., Swenson N.G. & Zanne A.E., 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecol. Lett.* **12**(4), 351–366, DOI:10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.

Chave J., Réjou-Méchain M., Búrquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martínez-Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-

Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Péliissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G. & Vieilledent G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* **20**(10), 3177–3190, DOI:10.1111/gcb.12629.

Chave J., Riéra B. & Dubois M.-A., 2001. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *J. Trop. Ecol.* **17**(1), 79–96.

Climat Côte d'Ivoire : Pluviométrie, Température moyenne Côte d'Ivoire, diagramme ombrothermique pour Côte d'Ivoire, July-13-2024. . <https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire-134/>, (13/07/2024).

Dabalén A.L. & Paul S., 2014. Effect of Conflict on Dietary Diversity: Evidence from Côte d'Ivoire. *World Dev.* **58**, 143–158, DOI:10.1016/j.worlddev.2014.01.010.

de Lattre-Gasquet M., Despréaux D. & Barel M., 1998. Prospective de la filière du cacao. *Plant. Rech. Dév.* **5**(6), 423–434.

Deheuvels O., 2011. Compromis entre productivité et biodiversité sur un gradient d'intensité de gestion de systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de Talamanca, Costa Rica.

Dimobe K. & Bayala J., 2023. Séquestration du carbone et provision d'autres services écosystémiques des parcs agroforestiers à karité au Burkina Faso. *BOIS FORETS Trop.* **356**, 67–80, DOI:10.19182/bft2023.356.a36903.

Donofrio S. & Calderon C., 2023. Paying for Quality State of the Voluntary Carbon Markets 2023, Ecosystem marketplace insights report.

Eggleston H.S. (Ed.), 2006. *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

FAO, 2020. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020- Principaux résultats., Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753fr>

FAOSTAT, 2022. . *Food Agric. Data.* <https://www.fao.org/faostat/en/#home>, (14/07/2024).

Fare Y., Kuhn D. & Forgeois F., 2023. Projet PAPFor, 2023 : Vade-mecum Etat des lieux des initiatives et outils favorisant la coexistence de la conservation des forêts et le développement respectueux de l'environnement du cacao en Afrique de l'Ouest.

GBIF, July-29-2024. . <https://www.gbif.org/fr/>, (29/07/2024).

Gockowski J. & Sonwa D., 2011. Cocoa Intensification Scenarios and Their Predicted Impact on CO2 Emissions, Biodiversity Conservation, and Rural Livelihoods in the Guinea Rain Forest of West Africa. *Environ. Manage.* **48**(2), 307–321, DOI:10.1007/s00267-010-9602-3.

Hansen C.P. & Treue T., 2008. Assessing illegal logging in Ghana. *Int. For. Rev.* **10**(4), 573–590, DOI:10.1505/ifor.10.4.573.

Hawthorne W. & Gyakari N., 2006. *Photoguide for the forest trees of Ghana: a tree-spotter's field guide for identifying the largest trees*, Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences.

Hawthorne W.D. & Jongkind C.C., 2006. *Woody plants of Western African forests, A guide to the forest trees, shrubs and lianes from Senegal to Ghana*, Royal Botanic Gardens, Kew.

Heymans R., 2020. Travail de fin d'études : Caractérisation des cacaoyères de la région de Man (Côte d'Ivoire) et recommandations agroforestières.

ICARE, 2022. Etude comparée des standards de compensation existants.

Isaac M.E., Timmer V.R. & Quashie-Sam S.J., 2007. Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **78**(2), 155–165, DOI:10.1007/s10705-006-9081-3.

Jadán O., Cifuentes M., Torres B., Selesi D., Veintimilla D. & Günter S., 2015. Influence of tree cover on diversity, carbon sequestration and productivity of cocoa systems in the ecuadorian amazon. *BOIS FORETS Trop.* **325**(325), 35, DOI:10.19182/bft2015.325.a31271.

Kalischek N., Lang N., Renier C., Daudt R.C., Addoah T., Thompson W., Blaser-Hart W.J., Garrett R., Schindler K. & Wegner J.D., 2023. Cocoa plantations are associated with deforestation in Côte d'Ivoire and Ghana. *Nat. Food* **4**(5), 384–393, DOI:10.1038/s43016-023-00751-8.

Kant S. & R. Alavalapati J.R., 2014. *Handbook of Forest Resource Economics*, 576.

Karsenty A., Sembrés T. & Perrot-Maître D., 2009. Paiements pour services environnementaux et pays du Sud. La conservation de la nature rattrapée par le développement ?

Koko L.K., Snoeck D., Lekadou T.T. & Assiri A.A., 2013. Cacao-fruit tree intercropping effects on cocoa yield, plant vigour and light interception in Côte d'Ivoire. *Agrofor. Syst.* **87**(5), 1043–1052, DOI:10.1007/s10457-013-9619-8.

Konan D., Goetze D., Koulibaly A., Porembski S. & Traoré D., 2011. Etude comparative de la flore ligneuse des plantations de cacao en fonction de l'âge et des groupes ethniques dans le centre-ouest de la côte d'ivoire. *Ann. Bot. L'Afrique L'Ouest* **7**, 59–79.

Koné M., Kouadio Y.L., Neuba D.F.R., Malan D.F. & Coulibaly L., 2014. Évolution de la couverture forestière de la Côte d'Ivoire des années 1960 au début du 21e siècle **7**(2).

Kouadio K.I. & Singh R., 2021. Deforestation and threat to biodiversity in developing countries : case of Ivory Coast **14**(07).

Kouakou A.T.M., Barima Y.S.S., Kouassi Kouakou A., Bogaert J. & Yatty Kouadio J., 2015. Forest dynamics in the North of the classified forest of Haut-Sassandra during the period of armed conflicts in Ivory Coast. *Am. J. Life Sci.* **3**(5).

Kouassi J.-L., Gyau A., Diby L., Bene Y. & Kouamé C., 2021. Assessing Land Use and Land Cover Change and Farmers' Perceptions of Deforestation and Land Degradation in South-West Côte d'Ivoire, West Africa. *Land* **10**(4), 429, DOI:10.3390/land10040429.

Kougbo M.D., Djah F.M., Diop A.L., Amenan S.K. & Dogba M., 2023. Usages et impacts des espèces arborescentes dans les exploitations cacaoyères de l'Indénié-Djuablin, Côte d'Ivoire. *Vertigo* DOI:10.4000/vertigo.37570.

Kougbo M.D., Malan D.F., Dogba M. & Konan A.S., 2020. Pratiques culturelles et diversité des ligneux compagnes dans les exploitations cacaoyères et hévéicoles à l'est de la Côte d'Ivoire. *Afr. Crop Sci. J.* **28**(2), 177–194, DOI:10.4314/acsj.v28i2.4.

Kuyah S., Öborn I., Jonsson M., Dahlin A.S., Barrios E., Muthuri C., Malmer A., Nyaga J., Magaju C., Namirembe S., Nyberg Y. & Sinclair F.L., 2016. Trees in agricultural landscapes enhance provision of ecosystem services in Sub-Saharan Africa. *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manag.* 1–19, DOI:10.1080/21513732.2016.1214178.

Leakey R.R.B., 2012. The intensification of agroforestry by tree domestication for enhanced social and economic impact- Mini Review. *CABI Rev.* 1–3, DOI:10.1079/PAVSNNR20127035.

Lescuyer G., Boutinot L., Goglio P. & Bassanaga S., 2020. Analyse de la chaîne de valeur du cacao au Cameroun. Rapport pour l'Union Européenne, DG DEVCO. Value Chain Analysis for Development Project (VCA4D CTR 2016/375-804).

Marché européen du carbone : rapport sur l'état de l'EU ETS en 2022 | EcoAct, 2022. . <https://eco-act.com/fr/blog/marche-europeen-du-carbone-rapport-2022/>, (14/07/2024).

Mayrand K. & Paquin M., 2004. Le paiement pour les services environnementaux : Étude et évaluation des systèmes actuels.

Meunier Q., Moumbogou C. & Doucet J.-L., 2015. *Les arbres utiles du Gabon*, Presses agronomiques de Gembloux.

Molto Q., Rossi V. & Blanc L., 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods Ecol. Evol.* **4**(2), 175–183.

Ngom D., Charahabil M.M., Sarr O., Bakhoum A. & Akpo L.E., 2014. Perceptions communautaires sur les services écosystémiques d'approvisionnement fournis par le

peuplement ligneux de la Réserve de Biosphère du Ferlo (Sénégal). *VertigO* (Volume 14 Numéro 2), DOI:10.4000/vertigo.15188.

Norris K., Asase A., Collen B., Gockowksi J., Mason J., Phalan B. & Wade A., 2010. Biodiversity in a forest-agriculture mosaic – The changing face of West African rainforests. *Biol. Conserv.* **143**(10), 2341–2350, DOI:10.1016/j.biocon.2009.12.032.

Ofori-Frimpong K., Asase A., Mason J. & Danku L., 2007. Shaded versus un-shaded cocoa: implications on litter fall, decomposition, soil fertility and cocoa pod development.

Oomes N., Tieben B., Laven A., Ammerlaan T., Appelman R., Biesenbeek C. & Buunk E., 2016. Market Concentration and Price Formation in the Global Cocoa Value Chain. *SEO Amst. Econ.*

Panzou G.J.L., Doucet J.-L., Loumeto J.-J., Biwole A., Bauwens S. & Fayolle A., 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnol Agron Soc Env.*

Pearson T. & Brown S., 2005. Guide de Mesure et de Suivi du Carbone dans les Forêts et Prairies Herbeuses. *Winrock Int.*

Pendrill F., Gardner T.A., Meyfroidt P., Persson U.M., Adams J., Azevedo T., Bastos Lima M.G., Baumann M., Curtis P.G., De Sy V., Garrett R., Godar J., Goldman E.D., Hansen M.C., Heilmayr R., Herold M., Kuemmerle T., Lathuillière M.J., Ribeiro V., Tyukavina A., Weisse M.J. & West C., 2022. Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. *Science* **377**(6611), eabm9267, DOI:10.1126/science.abm9267.

Pouliot M., Treue T., Obiri B.D. & Ouedraogo B., 2012. Deforestation and the Limited Contribution of Forests to Rural Livelihoods in West Africa: Evidence from Burkina Faso and Ghana. *AMBIO* **41**(7), 738–750, DOI:10.1007/s13280-012-0292-3.

Rapidel B., Le Coq J.-F., DeClerck F.A.J. & Beer J., 2011. Measurement and Payment of Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry. In: *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry : Measurement and Payment*. 377–395.

Richard A. & Ræbild A., 2016. Tree diversity and canopy cover in cocoa systems in Ghana. *New For.* **47**(2), 287–302, DOI:10.1007/s11056-015-9515-3.

Rondeux J., 2021. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*, Presses Agronomiques Gembloux.

Ruf F. & Schroth G., 2004. Chocolate Forests and Monocultures: A Historical Review of Cocoa Growing and Its Conflicting Role in Tropical Deforestation and Forest Conservation. *Agrofor. Biodivers. Conserv. Trop. Landsc.* 107–134.

Ruf F., Schroth G. & Doffangui K., 2015. Climate change, cocoa migrations and deforestation in West Africa: What does the past tell us about the future? *Sustain. Sci.* **10**(1), 101–111, DOI:10.1007/s11625-014-0282-4.

Ruf F.O., 2011. The Myth of Complex Cocoa Agroforests: The Case of Ghana. *Hum. Ecol.* **39**(3), 373–388, DOI:10.1007/s10745-011-9392-0.

Ruf F.O., 2018. Crises politico-militaires et climatiques en Côte d'Ivoire. Du cacao à l'anacarde, de la rente forêt à la fumure animale. *Tropicultura* **36**(2), DOI:10.25518/2295-8010.828.

Saj S., Durot C., Mvondo Sakouma K., Tayo Gamo K. & Avana-Tientcheu M.-L., 2017. Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage and sustainability: a functional analysis of tree communities in cacao plantations of Central Cameroon. *Int. J. Agric. Sustain.* **15**(3), 282–302, DOI:10.1080/14735903.2017.1311764.

Saj S. & Jagoret P., 2017. Traditional cacao agroforestry in Central Africa can provide both respectable yields and levels of ecosystem services.

Saj S., Jagoret P., Etoa L.E., Eteckji Fonkeng E., Tarla J.N., Essobo Nieboukaho J.-D. & Mvondo Sakouma K., 2017. Lessons learned from the long-term analysis of cacao yield and stand structure in central Cameroonian agroforestry systems. *Agric. Syst.* **156**, 95–104, DOI:10.1016/j.agsy.2017.06.002.

Saj S., Jagoret P., Mvondo Sakouma K., Essobo J.-D., Bouambi E. & Todem-Ngogue H., 2019. Chapitre 6. Compromis entre séquestration de carbone, conservation et productivité dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au Centre-Cameroun. *In: Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale*. éditions Quae, 99–112.

Schaad N. & Fromm I., 2018. Sustainable Cocoa Production Program (SCPP): Analysis of cocoa beans processing and quality in post-harvest in South East Sulawesi in Indonesia. *Agric. Food Sci.* **6**(1), 1–6, DOI:10.36782/apjsafe.v6i1.1788.

Schroth G., D'Angelo S.A., Teixeira W.G., Haag D. & Lieberei R., 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *For. Ecol. Manag.* **163**(1–3), 131–150.

Schroth G., Faria D., Araujo M., Bede L., Van Bael S.A., Cassano C.R., Oliveira L.C. & Delabie J.H.C., 2011. Conservation in tropical landscape mosaics: the case of the cacao landscape of southern Bahia, Brazil. *Biodivers. Conserv.* **20**(8), 1635–1654, DOI:10.1007/s10531-011-0052-x.

Segura M., Kanninen M. & Suárez D., 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agrofor. Syst.* **68**, 143–150.

Silatsa F.B.T., Yemefack M., Ewane-Nonga N., Kemga A. & Hanna R., 2017. Modeling carbon stock dynamics under fallow and cocoa agroforest systems in the shifting agricultural landscape of Central Cameroon. *Agrofor. Syst.* **91**(5), 993–1006, DOI:10.1007/s10457-016-9973-4.

Situation Economique en Cote d'Ivoire (Vol. 2) : Situation Économique en Côte d'Ivoire- Au Pays du Cacao : Comment Transformer la Côte d'Ivoire, June-14-2024. . *World Bank*. [https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/277191561741906355/Cote-dIvoire-Economic-Update,\(14/06/2024\)](https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/277191561741906355/Cote-dIvoire-Economic-Update,(14/06/2024)).

Slik J.F., Paoli G., McGuire K., Amaral I., Barroso J., Bastian M., Blanc L., Bongers F., Boundja P. & Clark C., 2013. Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **22**(12), 1261–1271.

Snoeck D., Koko L.K., Joffre J., Bastide P. & Jagoret P., 2016. Chapter 4 Cacao Nutrition and Fertilization. *In: Sustainable Agriculture Reviews*. 155–202.

Sodhi N.S., Posa M.R.C., Lee T.M., Bickford D., Koh L.P. & Brook B.W., 2009. The state and conservation of Southeast Asian biodiversity. *In: Lane, D.J.W. ed. Tropical Islands Biodiversity Crisis, Topics in Biodiversity and Conservation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 5–16.

Tane Fomekong A.B., Solefack Momo M.C., Anjah Mendi G., Kenfack Feukeng S.S., Taffo Woukoue J.B., Feukeng Kenfack S.S., Etchike Dong B.A., Djeuni R.D. & Kengne O.C., 2023. Diversité ligneuse et stock de carbone des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers de la localité de Makénéné, Région du Centre Cameroun. *Cameroon J. Exp. Biol.* **17**(2), 32–39, DOI:10.4314/cajeb.v17i2.6.

Tano A.M., 2012. Crise cacaoyère et stratégies des producteurs de la sous-préfecture de Meadji au sud-ouest ivoirien.

Tano K.P., 2021. *La politique forestière de la Côte d'Ivoire à l'épreuve de l'économie de plantation - Protection ou exploitation des ressources ?*, L'Harmattan, 308.

Ter Steege H., Pitman N.C.A., Killeen T.J., Laurance W.F., Peres C.A., Guevara J.E., Salomão R.P., Castilho C.V., Amaral I.L., De Almeida Matos F.D., De Souza Coelho L., Magnusson W.E., Phillips O.L., De Andrade Lima Filho D., De Jesus Veiga Carim M., Irumé M.V., Martins M.P., Molino J.-F., Sabatier D., Wittmann F., López D.C., Da Silva Guimarães J.R., Mendoza A.M., Vargas P.N., Manzatto A.G., Reis N.F.C., Terborgh J., Casula K.R., Montero J.C., Feldpausch T.R., Honorio Coronado E.N., Montoya A.J.D., Zartman C.E., Mostacedo B., Vasquez R., Assis R.L., Medeiros M.B., Simon M.F., Andrade A., Camargo J.L., Laurance S.G.W., Nascimento H.E.M., Marimon B.S., Marimon B.-H., Costa F., Targhetta N., Vieira I.C.G., Brienen R., Castellanos H., Duivenvoorden J.F., Mogollón H.F., Piedade M.T.F., Aymard C. G.A., Comiskey J.A., Damasco G., Dávila N., García-Villacorta R., Diaz P.R.S., Vincentini A., Emilio T., Levis C., Schiatti J., Souza P., Alonso A., Dallmeier

F., Ferreira L.V., Neill D., Araujo-Murakami A., Arroyo L., Carvalho F.A., Souza F.C., Amaral D.D.D., Gribel R., Luize B.G., Pansonato M.P., Venticinque E., Fine P., Toledo M., Baraloto C., Cerón C., Engel J., Henkel T.W., Jimenez E.M., Maas P., Mora M.C.P., Petronelli P., Revilla J.D.C., Silveira M., Stropp J., Thomas-Caesar R., Baker T.R., Daly D., Paredes M.R., Da Silva N.F., Fuentes A., Jørgensen P.M., Schöngart J., Silman M.R., Arboleda N.C., Cintra B.B.L., Valverde F.C., Di Fiore A., Phillips J.F., Van Andel T.R., Von Hildebrand P., Barbosa E.M., De Matos Bonates L.C., De Castro D., De Sousa Farias E., Gonzales T., Guillaumet J.-L., Hoffman B., Malhi Y., De Andrade Miranda I.P., Prieto A., Rudas A., Ruschell A.R., Silva N., Vela C.I.A., Vos V.A., Zent E.L., Zent S., Cano A., Nascimento M.T., Oliveira A.A., Ramirez-Angulo H., Ramos J.F., Sierra R., Tirado M., Medina M.N.U., Van Der Heijden G., Torre E.V., Vriesendorp C., Wang O., Young K.R., Baider C., Balslev H., De Castro N., Farfan-Rios W., Ferreira C., Mendoza C., Mesones I., Torres-Lezama A., Giraldo L.E.U., Villarroel D., Zagt R., Alexiades M.N., Garcia-Cabrera K., Hernandez L., Huamantupa-Chuquimaco I., Milliken W., Cuenca W.P., Pansini S., Pauletto D., Arevalo F.R., Sampaio A.F., Valderrama Sandoval E.H. & Gamarra L.V., 2015. Estimating the global conservation status of more than 15,000 Amazonian tree species. *Sci. Adv.* **1**(10), e1500936, DOI:10.1126/sciadv.1500936.

Traore A., Dibi B. & Soro E.T.D., 2021. Impact de la variabilité du climat sur la recharge de la nappe des aquifères fracturés du département de Man : (Ouest de la Côte d’Ivoire). *Agron. Afr.*

Tscharntke T., Clough Y., Shonil A.B., Buchori D., Faust H., Dietrich H., Hölscher D., Juhrbandt J., Kessler M., Perfecto I., Scherber C., Schroth G., Veldkamp E. & Wanger T.C., 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes — a review. *J. Appl. Ecol.* **48**(3), 619–629.

Wessel M. & Quist-Wessel P.M.F., 2015. Cocoa production in West Africa, a review and analysis of recent developments. *NJAS Wagening. J. Life Sci.* **74–75**(1), 1–7, DOI:10.1016/j.njas.2015.09.001.

West African Plants - A Photo Guide - Home, July-29-2024. . <http://www.westafricanplants.senckenberg.de/root/index.php>, (29/07/2024).

WMO, July-13-2024. World Weather Information Service. *World Weather Inf. Serv.* <https://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=2880>, (13/07/2024).

Yao C.A., Blom E., Dengueadhé K., Van Rompaey R., N’guessan E., Wittebolle G. & Bongers F., 2005. Diversité floristique et végétation dans le Parc National de Taï, Côte d’Ivoire, Tropenbos International.

Yao C.Y.A., Kpangui K.B., Vroh B.T.A. & Ouattara D., 2016. Pratiques culturelles, valeurs d’usage et perception des paysans des espèces compagnes du cacaoyer dans des agroforêts traditionnelles au centre de la Côte d’Ivoire. *Rev. D’ethnoécologie* (9), DOI:10.4000/ethnoecologie.2474.

Yao Sadaïou Sabas B., Gislain Danmo K., Akoua Tamia Madeleine K. & Jan B., 2020. Cocoa Production and Forest Dynamics in Ivory Coast from 1985 to 2019. *Land* **9**(12), 524, DOI:10.3390/land9120524.

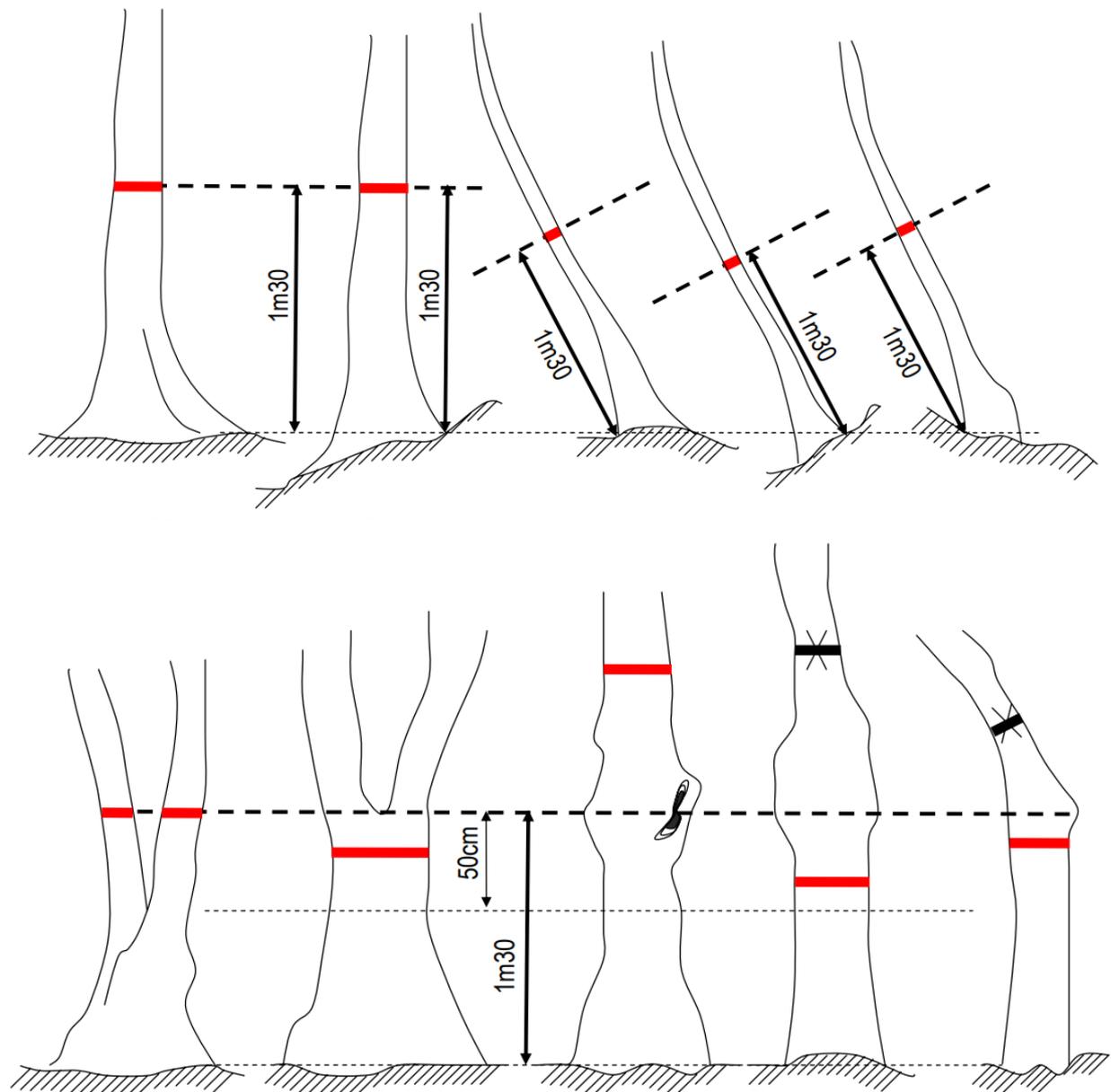
VIII. ANNEXES

Annexe 1 : Liste des producteurs issus de l'échantillonnage stratifié à fractions sondées constantes. La somme des surfaces pour chaque sous-section est légèrement supérieure à 5% de la surface totale de la sous-section. Les cases vertes correspondent aux parcelles prospectées, les rouges n'ont pas pu être visitées par manque de temps.

| Section | Sous-section | Producteur | Code Yeyasso | Surface du champ | Prospecté lors du TFE ? |
|----------|--------------|-------------------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| BOGOUINE | BOGOUINE 1 | DOUA BLEU PACOME | YEYAFT1411 | 0,88 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 1 | TIA GBA SIMONE | YEYAFT1447 | 1,35 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 1 | VAH MINSSIE THERESE | YEYAFT1451 | 1,05 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 1 | BLONDE GOH NORBERT | YEYAFT1394 | 3,48 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 1 | ISSOUF DIOMANDE | YEYAFT1401 | 0,9 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | BARRY MAMADOU | YEYAFT1458 | 1,5 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | ZRAN LOUA GHISLAIN | YEYAFT1469 | 0,5 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | SAWADOGO OUSMANE | YEYAFT1475 | 0,79 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | KOUASSI KOFFI LAZARE | YEYAFT1478 | 1,97 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | N'DRI KONAN MODESTE | YEYAFT1490 | 2,41 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | BLEU DROH PACOME | YEYAFT1537 | 1,4 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 2 | OULAI APPOLINAIRE | YEYAFT1582 | 1,55 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 3 | MAMADOU BAKAYOKO | YEYAFT1953 | 1,76 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 3 | SORY ALASSANE | YEYAFT1976 | 1 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 3 | OULAI BODE DESIRE | YEYAFT1981 | 3,25 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 3 | GUEU TIEMOKO | YEYAFT1494 | 1,65 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 4 | FLINDE JEAN VINCENT | YEYAFT2768 | 1,72 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 4 | GUEU HERVE SERGE | YEYAFT2801 | 1,12 | non |
| BOGOUINE | BOGOUINE 4 | TIEMOKO LAZARE | YEYAFT2540 | 1,62 | oui |
| BOGOUINE | BOGOUINE 4 | OULE MARTINE | YEYAFT2803 | 0,75 | oui |
| DOUELE | DOUELE | GOGNAN ERNEST | YEYAFT2067 | 1,89 | oui |
| DOUELE | DOUELE | GONO BAKAYOKO | YEYAFT2069 | 1,33 | non |
| DOUELE | DOUELE 1 | BLON PIERRE | YEYAFT1648 | 1,08 | oui |
| DOUELE | DOUELE 1 | DOH PATRICIA | YEYAFT1656 | 1,23 | oui |
| DOUELE | DOUELE 1 | GUEU DAN HUBERT | YEYAFT1667 | 1,63 | non |
| DOUELE | DOUELE 2 | DEBE KIGUI SIMEON | YEYAFT1698 | 1,02 | oui |
| DOUELE | DOUELE 2 | GONDO HUBERT | YEYAFT1709 | 1,02 | non |
| DOUELE | DOUELE 2 | KOUAKOU N'DRI ERIC | YEYAFT1723 | 1,47 | oui |
| DOUELE | DOUELE 2 | KOUAME YAO | YEYAFT1725 | 1,55 | non |
| DOUELE | DOUELE 3 | GLE KOUAYE BENJAMIN | YEYAFT1623 | 1,28 | non |
| DOUELE | DOUELE 3 | KESSE ROMUALD | YEYAFT1630 | 1,09 | oui |
| DOUELE | DOUELE 3 | GLAI KOUAYE GON SAMUEL | YEYAFT1621 | 0,92 | non |
| GAN | GAN | DROH FOUGBE BERNARD | YEYAFT1796 | 1,58 | oui |
| GAN | GAN | KONE TOKPA CINALI | YEYAFT1818 | 1,21 | oui |
| GAN | GAN | YARA GUELY BIRD | YEYAFT1828 | 1,15 | oui |
| GAN | GAN | GBATO MOUTY | YEYAFT1799 | 1,39 | oui |
| GAN | GAN | DIOMANDE FOBA MODES | YEYAFT2044 | 1,22 | oui |
| GBOMBELO | GBOMBELO | GON BLEU MIKAEL | YEYAFT1851 | 1,18 | oui |
| GBOMBELO | GBOMBELO | GUEU DELY TIEMOKO 2 | YEYAFT1855 | 0,95 | oui |
| GBOMBELO | GBOMBELO | MANE BASSIDA JEAN BAPTISTE P2 | YEYAFT1878 | 1,8 | oui |
| GBOMBELO | DOUELE | GBLIEU BIH MARCEL | YEYAFT2062 | 3,35 | non |
| GBOMBELO | DOUELE | MUNKEU MALEU JOSEPHINE | YEYAFT2091 | 2,35 | oui |
| MAN | MELAPLEU | SANKARA YASSIA | YEYAFT2024 | 0,98 | oui |
| MAN | MELAPLEU | LOUA SIMONE | YEYAFT2012 | 2,54 | oui |
| MAN | MELAPLEU | YODE ILERE | YEYAFT2032 | 0,57 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 1 | DEPLEU HENRI | YEYAFT2123 | 0,9 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 1 | MAKOUAMA LYDIE | YEYAFT2155 | 2,76 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 1 | TOMIN WI DEBORA | YEYAFT2187 | 2,2 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 2 | OULAI JOSEPH | YEYAFT2228 | 2,31 | non |
| YAPLEU | YAPLEU 2 | OULAI SAHI JUNIOR | YEYAFT2231 | 0,92 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 2 | TOU DRAMANE | YEYAFT2252 | 3,54 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 3 | FEH OUEU RUDOLPHE | YEYAFT2276 | 1,2 | oui |

| | | | | | |
|--------|----------|---------------------------|-----------|------|-----|
| YAPLEU | YAPLEU 3 | GONSAN GILBERT | YEYAF2287 | 1,01 | non |
| YAPLEU | YAPLEU 3 | KAH OULAI HONORE | YEYAF2293 | 1,35 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 3 | KOUI AMELIE | YEYAF2299 | 1,18 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 3 | MAHAN BLEU CASIMIR | YEYAF2306 | 1,54 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 4 | BAN GBEI BERTINE | YEYAF2341 | 1,89 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 4 | DELY PIERRE | YEYAF2349 | 1,84 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 4 | OULAI MOUSSA EDMOND | YEYAF2393 | 1,71 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 4 | TIEMOKO NOEL | YEYAF2407 | 1,11 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 5 | AHOUMOUAN KOUASSI LUDOVIC | YEYAF2417 | 2,65 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 5 | DION MADELEINE | YEYAF2436 | 3,96 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 5 | MAHA BLANDINE | YEYAF2486 | 1,6 | oui |
| YAPLEU | YAPLEU 5 | MAHAN MARCELIN | YEYAF2511 | 3,18 | non |
| YAPLEU | YAPLEU 5 | TOGBA SALIE | YEYAF2514 | 1,72 | oui |

Annexe 2 : Illustrations par Picard et al. (2008) indiquant comment relever correctement le diamètre des arbres selon plusieurs cas de figure. Le trait rouge correspond à l'endroit où doit être réalisée la mesure du diamètre, suivie du marquage à la peinture.



Annexe 3 : Exemple de confection d'un herbier de terrain, comme réalisé lors de cette mission. Sur le terrain : 2 cartons bien rigides renferment une pile de journaux, le tout étant maintenu par des sangles. Les journaux servent à interposer et faire sécher les échantillons prélevés. Utiliser une vue de journal par échantillon, en mentionnant le plus possible d'informations de collecte : date, lieux, numéro de l'arbre, nom du propriétaire de la parcelle, traits caractéristiques de l'arbre (odeur, tranche, port, etc.). Ces informations doivent impérativement être écrites au crayon à papier. Une fois revenu du terrain, les échantillons doivent passer sous un système de presse. 2 palettes comprimées par des sangles et/ou autres charges lourdes, peuvent être utilisées à cet effet. Faire usage d'une chaleur tournante pour sécher les échantillons uniformément. Au besoin, changer les journaux (en conservant les informations) pour éviter que les échantillons ne pourrissent.



Annexe 4 : Questionnaire FarmForce utilisé sur le terrain pour encoder les informations. La version électronique a permis de réaliser les encodages sur une tablette. De cette manière, un fichier Excel contenant les relevés est directement créé.



CARBONE arbres ombrage

Intrusions : Veuillez cocher dans la case à côté de la réponse de votre choix ou écrivez dans l'espace prévu à cet effet, selon le cas.

Info producteur

Q 1.1 - * Nom du producteur

Réponse:

Identification essence

Q 2.1 - * Essence

Choisir une réponse:

- ACAJOU
- ORANGER
- BETE
- AKPI
- CEDRELA
- POHE
- IRVINGIA
- MARKORE
- TETRAPLEURA
- PETIT COLA
- POIVRE
- NIANGON
- ILOMBA
- MOVINGUI
- BA
- BAHIA
- BEBANDI (KLI ?)
- BEUTI
- BIE
- BIELI
- BING
- BLANDIÉ
- BLÈ
- BLO
- BOKIN
- BON
- BOUBO
- CHIE
- DAN
- DEU
- DING
- DJANGO

- DO
- DODIÉ
- DRO
- FRAKÉ
- FRAMIRÉ
- GAN
- GBAN
- GBEGBAN
- GBEU
- GBIAN / BION
- GBIN
- GBLUNG
- GBO POU
- GBO TI
- GEU
- GLI
- GNIN
- GNO
- GO
- GOING
- GOU
- GUEDALI
- GUI
- KAN
- KLANGOBACA
- KLORBACA
- KPLÉ
- LOH
- MAN
- MBÉ
- NIA
- NIOUNE
- PA POU
- PA TI
- PADOUK
- PAIN
- PANTABLOR
- POBOLI
- SAMBA
- SOUE
- SRA
- SRAN
- SRON
- TEU
- TONGBUKULU
- TONGLA

- TOUH
- TRON
- TRONZWE
- VAN
- VON
- WAHA
- YAN / LEU
- YON
- ZAGBEDI
- ZAHA
- ZINKODOUARI
- ZOAGLU
- Non identife
- AUTRE

Remarques:

Q 2.2 - Ecrire le nom de l'arbre

Réponse:

Q 2.3 - Si arbre Non Identifié - Photo tronc

Réponse:

Q 2.4 - Si arbre Non Identifié - Photo branche

Réponse:

Q 2.5 - Si arbre Non Identifié - Photo feuille 1

Réponse:

Q 2.6 - Si arbre Non Identifié - Photo feuille 2

Réponse:

Q 2.7 - Si arbre Non Identifié - Photo tranche

Réponse:

Mesure

Q 3.1 - * Position - placez la tablette près de l'arbre d'ombrage

Réponse:

Q 3.2 - * Arbre planter par le projet ?

Choisir une réponse:

Oui

Non

Q 3.3 - * Etat sanitaire

Choisir une réponse:

BON

DEPERISSANT

MORT

Q 3.4 - * Arbre décorer ?

Choisir une réponse:

Oui

Non

Q 3.5 - Numéro de l'arbre dans la parcelle

Options de réponse:

Minimum: 1

Maximum: 140

Nombre de décimales: 1

Réponse:

Q 3.6 - * Hauteur de l'arbre (en mètre)

Options de réponse:

Minimum: 0

Maximum: 50

Nombre de décimales: 1

Réponse:

Q 3.7 - * Mesure Diamètre (en centimètre)

Options de réponse:

Minimum: 0

Maximum: 400

Nombre de décimales: 1

Réponse:

Q 3.8 - * Hauteur mesure diamètre (en centimètre)

Options de réponse:

Minimum: 0

Maximum: 500

Nombre de décimales: 1
Réponse:

Q 3.9 - * Trait de peinture sur diamètre

Choisir une réponse:

Oui

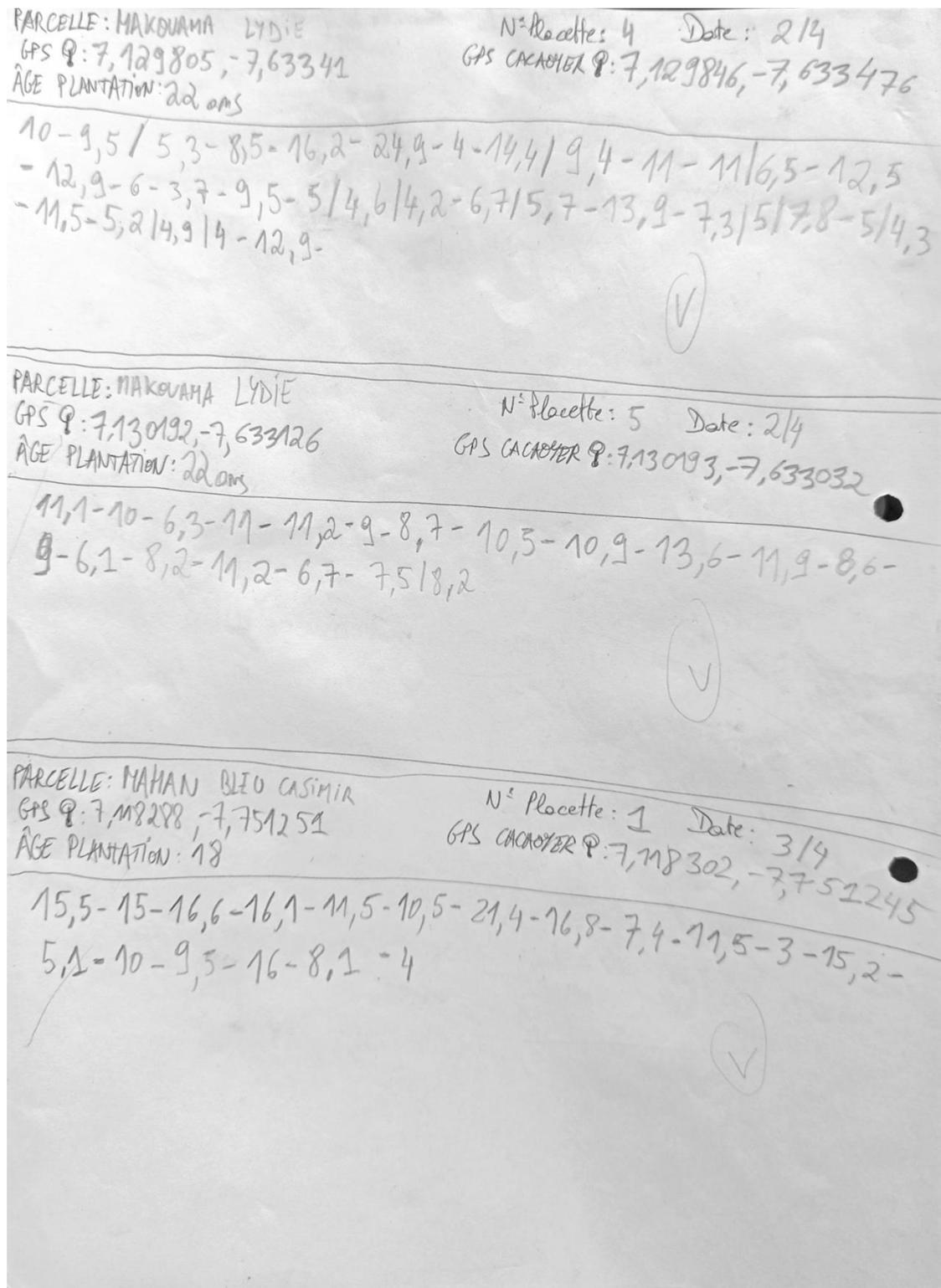
Non

page 5 of 5

Annexe 5 : Utilisation du pied à coulisse numérique pour mesurer les plants de cacao trop fins. La mesure est relevée à 30 centimètres du sol. Le bâton que tient l'opérateur dans sa main gauche mesure exactement 30 centimètres et permet de savoir rapidement où doit se situer la mesure.



Annexe 6 : Carnet utilisé pour récolter les informations relatives aux placettes d'estimation de la densité des cacaoyers. La mention « GPS » correspond aux coordonnées du point généré aléatoirement sur QGIS. La mention « GPS CACAOYER » correspond aux coordonnées du cacaoyer central de la placette, le plus proche du point généré aléatoirement. Chaque cacaoyer est inventorié via la mesure de son diamètre à 30 centimètres du sol, ils sont séparés par « - ». Lorsque qu'un cacaoyer se divise en plusieurs tiges à la base, les différentes tiges sont mesurées et séparées par « / ». Ensuite, chaque placette est encodée sur Excel (marquée d'un V lorsque cela a bien été fait).



Annexe 7 : Liste des 124 espèces inventoriées par l'échantillonnage des parcelles.

| Espèce | Famille | Nom pilote | Appellation locale (Yacouba) | Densité du bois [g/cm ³] | DBH moyen [cm] | Hauteur moyenne [m] | Nombre de tiges (N) | Abondance relative [%] | Densité (NHA) [tiges/ha] | Surface terrière (GHA) [m ² /ha] | Dominance relative [%] |
|---|----------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|---|------------------------|
| Aeglopsis chevalieri Swingle | Rutaceae | Prahanendi | / | 0,64 | 23,700 | 6,60 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,000626 | 0,02 |
| Afzelia bella Harms | Fabaceae | Azodau | / | 0,637 | 13,800 | 12,63 | 4 | 0,14 | 0,057 | 0,000872 | 0,02 |
| Albizia adianthifolia (Schumacher) W. Wright | Fabaceae | Bangbaye | Zaha | 0,508 | 27,139 | 15,11 | 54 | 1,88 | 0,767 | 0,063635 | 1,63 |
| Albizia dinklagei (Harms) Harms | Fabaceae | Ta | Zaha | 0,76 | 12,100 | 7,97 | 3 | 0,10 | 0,043 | 0,000512 | 0,01 |
| Albizia ferruginea (Guill. & Perr.) Benth. | Fabaceae | Iatandza | Tron | 0,494 | 30,797 | 16,62 | 33 | 1,15 | 0,469 | 0,054099 | 1,39 |
| Albizia zygia (DC.) J.F. Macbr. | Fabaceae | Ouochi | Leu/Yan | 0,494 | 26,398 | 14,91 | 89 | 3,10 | 1,264 | 0,090675 | 2,33 |
| Allophylus africanus P. Beauv. | Sapindaceae | Ouangran | Van | 0,45 | 22,686 | 16,89 | 7 | 0,24 | 0,099 | 0,005323 | 0,14 |
| Alstonia boonei De Wild. | Apocynaceae | Enien | Yon | 0,321 | 66,800 | 28,49 | 7 | 0,24 | 0,099 | 0,047125 | 1,21 |
| Amphimas pterocarpoides Harms | Fabaceae | Lati | Gbouè | 0,617 | 27,009 | 16,75 | 76 | 2,65 | 1,079 | 0,099971 | 2,57 |
| Anacardium occidentale L. | Anacardiaceae | Anacardier | Anacarde | 0,446 | 14,470 | 6,62 | 30 | 1,05 | 0,426 | 0,007281 | 0,19 |
| Annona muricata L. | Annonaceae | Corossolier | Corossolier | 0,36 | 11,000 | 5,60 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,000272 | 0,01 |
| Anthoedista nobilis G. Don | Gentianaceae | Brobro | Tongbukulu | 0,499 | 49,983 | 22,72 | 6 | 0,21 | 0,085 | 0,018354 | 0,47 |
| Anthoedista vogelii Planch. | Gentianaceae | / | Pantablou/Cefidi | 0,532 | 26,169 | 16,15 | 13 | 0,45 | 0,185 | 0,012139 | 0,31 |
| Anthoedista fragrans (Baker f.) Exell & Hillc. | Fabaceae | Adomoteu | / | 0,529 | 17,350 | 9,20 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,000678 | 0,02 |
| Anthoedista macrophylla P. Beauv. | Fabaceae | Réré à long fruit | Gbin | 0,842 | 15,230 | 7,60 | 20 | 0,70 | 0,284 | 0,005623 | 0,14 |
| Antriaris toxicaria Lesch. | Moraceae | Ako | Chio | 0,383 | 25,627 | 12,68 | 74 | 2,58 | 1,051 | 0,079817 | 2,05 |
| Artocarpus altilis (Parkinson) Fosberg | Moraceae | Arbre à pain | / | 0,433 | 26,100 | 21,20 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,001520 | 0,04 |
| Baphia nitida Lodd. | Fabaceae | Okoué | Dro pou | 0,559 | 15,463 | 9,16 | 8 | 0,28 | 0,114 | 0,002401 | 0,06 |
| Baphia pubescens Hook. f. | Fabaceae | Tuibesso | Dro ti | 0,701 | 14,604 | 9,32 | 23 | 0,80 | 0,327 | 0,005791 | 0,15 |
| Beilschmiedia mannii (Meisn.) Robyns & R. Wilczek | Lauraceae | Atiokouo | Sran | 0,569 | 17,310 | 8,75 | 20 | 0,70 | 0,284 | 0,008758 | 0,22 |
| Blighia welwitschii (Hiern) Radlk. | Sapindaceae | Kàkà | Going | 0,786 | 29,268 | 14,72 | 19 | 0,66 | 0,270 | 0,027398 | 0,70 |
| Bombax brevicuspis Sprague | Malvaceae | Kondroti | / | 0,408 | 58,000 | 28,10 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,003752 | 0,10 |
| Bombax buonopozense P. Beauv. | Malvaceae | Kapokier | Dogwè | 0,324 | 61,600 | 28,33 | 3 | 0,10 | 0,043 | 0,016067 | 0,41 |
| Bridelia micrantha (Hochst.) Baill. | Phyllanthaceae | Tokikoué | Von | 0,508 | 23,950 | 14,33 | 4 | 0,14 | 0,057 | 0,002631 | 0,07 |
| Canarium schweinfurthii Engl. | Burseraceae | Aiélé | Kpin | 0,409 | 39,669 | 20,25 | 13 | 0,45 | 0,185 | 0,030128 | 0,77 |
| Carica papaya L. | Caricaceae | Papayer | Papayer | 0,188 | 18,681 | 7,20 | 27 | 0,94 | 0,383 | 0,011414 | 0,29 |
| Cedrela odorata L. | Meliaceae | Cèdre acajou | / | 0,447 | 11,667 | 9,20 | 3 | 0,10 | 0,043 | 0,000456 | 0,01 |
| Ceiba pentandra (L.) Gaertn. | Malvaceae | Fromager | Goue | 0,305 | 88,522 | 25,33 | 41 | 1,43 | 0,582 | 0,548517 | 14,08 |
| Celtis adolfi-friderici Engl. | Cannabaceae | Lohonfé | / | 0,554 | 41,700 | 22,00 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,001939 | 0,05 |
| Celtis gomphophylla Baker | Cannabaceae | Koasan | / | 0,568 | 20,700 | 19,20 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,000478 | 0,01 |
| Celtis mildbraedii Engl. | Cannabaceae | Ba | / | 0,617 | 47,079 | 27,22 | 14 | 0,49 | 0,199 | 0,041148 | 1,06 |
| Citrus xsinensis (L.) Osbeck | Rutaceae | Pamplemoussier | Pamplemoussier/Sihidi | 0,74 | 15,213 | 8,29 | 32 | 1,12 | 0,454 | 0,008931 | 0,23 |
| Citrus maxima (Burm.) Merr. | Rutaceae | Mandariner | Mandariner/Sihidi | 0,74 | 13,600 | 5,70 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,000206 | 0,01 |
| Citrus reticulata Blanco | Rutaceae | Oranger | Oranger/Sihidi | 0,78 | 14,233 | 6,90 | 18 | 0,63 | 0,256 | 0,004402 | 0,11 |
| Coelocaryon sphaerocarpum Fouillouy | Myristicaceae | Ekoune | / | 0,491 | 22,050 | 14,50 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,001362 | 0,03 |
| Cola gigantea A. Chev. | Malvaceae | Grand Ouara | Deu | 0,48 | 99,900 | 28,10 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,022588 | 0,58 |
| Cola lateritia K. Schum. | Malvaceae | Petit Ouara | Kiangobaca | 0,507 | 17,567 | 9,03 | 3 | 0,10 | 0,043 | 0,001139 | 0,03 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---------------------------|------------|-------|----|---------|-------|--------|-------|-------|----------|------|
| <i>Cola nitida</i> (Vent.) Schott & Endl. | Malvaceae | Colatier | Go | 0,601 | * | 20,563 | 9,40 | 327 | 11,41 | 4,644 | 0,174319 | 4,48 |
| <i>Copaifera salikounda</i> Heckel | Fabaceae | Etimoé | / | 0,696 | | 30,700 | 16,60 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,001051 | 0,03 |
| <i>Cordia platythyrsa</i> Baker | Boraginaceae | Bon | / | 0,385 | | 53,233 | 27,63 | 3 | 0,10 | 0,043 | 0,011037 | 0,28 |
| <i>Corynanthe pachyceras</i> K.Schum. | Rubiaceae | Gaouo | Gban | 0,672 | | 18,350 | 10,55 | 6 | 0,21 | 0,085 | 0,002535 | 0,07 |
| <i>Dialium dinklagei</i> Harms | Fabaceae | Afambéou | / | 0,683 | | 13,785 | 8,16 | 13 | 0,45 | 0,185 | 0,003021 | 0,08 |
| <i>Dichrostachys cinerea</i> (L.) Wight & Arn. | Fabaceae | Acacia Saint-Domingue | Teu | 0,99 | | 12,200 | 7,80 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,000166 | 0,00 |
| <i>Distemonanthus benthamianus</i> Baill. | Fabaceae | Movingui | Guedali | 0,605 | | 24,483 | 15,74 | 29 | 1,01 | 0,412 | 0,025871 | 0,66 |
| <i>Dracaena arborea</i> (Willd.) Link | Asparagaceae | Elouévo | Django | 0,418 | * | 37,500 | 15,45 | 13 | 0,45 | 0,185 | 0,021791 | 0,56 |
| <i>Drypetes aubrevillei</i> Leandri | Euphorbiaceae | Piatou | Wanti | 0,826 | | 11,700 | 8,30 | 1 | 0,03 | 0,014 | 0,000153 | 0,00 |
| <i>Drypetes gligiana</i> (Pax) Pax & K.Hoffm. | Euphorbiaceae | Sampou | Wanti | 0,707 | * | 19,600 | 10,65 | 2 | 0,07 | 0,028 | 0,000948 | 0,02 |
| <i>Elaeis guineensis</i> Jacq. | Arecaceae | Palmier à huile | / | - | | 38,333 | 14,99 | 203 | 7,08 | 2,883 | 0,343537 | 8,82 |
| <i>Entandrophragma angolense</i> (Welw.) C.DC. | Meliaceae | Tiama | Bieli | 0,483 | | 35,913 | 19,83 | 23 | 0,80 | 0,327 | 0,041146 | 1,06 |
| <i>Entandrophragma utile</i> (Dawe & Sprague) Sprague | Meliaceae | Sipo | / | 0,537 | | 32,083 | 18,97 | 6,00 | 0,21 | 0,085 | 0,007378 | 0,19 |
| <i>Eribrroma oblongum</i> (Mast.) Pierre ex A.Chev. | Malvaceae | Eyong | / | 0,638 | | 72,133 | 29,07 | 3,00 | 0,10 | 0,043 | 0,017881 | 0,46 |
| <i>Euphorbiaceae</i> indéterminée | Euphorbiaceae | / | Glo | 0,508 | ** | 12,300 | 5,40 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000169 | 0,00 |
| <i>Ficus elastica</i> De Widd. | Moraceae | / | Nyin | 0,412 | * | 45,718 | 18,88 | 11,00 | 0,38 | 0,156 | 0,036537 | 0,94 |
| <i>Ficus exasperata</i> Vahl | Moraceae | Dédé | Nyin | 0,344 | | 18,254 | 10,33 | 133,00 | 4,64 | 1,889 | 0,069654 | 1,79 |
| <i>Ficus mucosa</i> Welw. ex Ficalho | Moraceae | Doumbourou | Gou | 0,409 | | 33,724 | 14,53 | 33,00 | 1,15 | 0,469 | 0,073156 | 1,88 |
| <i>Ficus ovata</i> Vahl | Moraceae | / | / | 0,412 | * | 140,750 | 32,85 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,046231 | 1,19 |
| <i>Ficus sur</i> Forssk. | Moraceae | Figuier du Cap | Blordi | 0,412 | * | 15,913 | 7,43 | 151,00 | 5,27 | 2,144 | 0,049869 | 1,28 |
| <i>Funtumia elastica</i> (P.Preuss) Stapf | Apocynaceae | Pri | Paté | 0,424 | * | 29,400 | 16,06 | 14,00 | 0,49 | 0,199 | 0,018320 | 0,47 |
| <i>Garcinia afzeilii</i> Engl. | Clusiaceae | Tiokoué | / | 0,735 | * | 27,900 | 12,40 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000868 | 0,02 |
| <i>Garcinia kola</i> Heckel | Clusiaceae | Aoulié | Petit cola | 0,727 | | 18,517 | 9,77 | 12,00 | 0,42 | 0,170 | 0,005145 | 0,13 |
| <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp. | Fabaceae | / | / | 0,61 | | 13,460 | 7,06 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,001028 | 0,03 |
| <i>Glyphaea brevis</i> (Spreng.) Monach. | Malvaceae | Kiokio | / | 0,476 | ** | 10,100 | 6,40 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000114 | 0,00 |
| <i>Hallea stipulosa</i> (DC.) J.-F.Leroy | Rubiaceae | Bahia | Bahia | 0,479 | | 13,800 | 13,80 | 3,00 | 0,10 | 0,043 | 0,000647 | 0,02 |
| <i>Hammoa klaineana</i> Pierre & Engl. | Simaroubaceae | Effeu | Gui | 0,422 | ** | 32,690 | 17,60 | 20,00 | 0,70 | 0,284 | 0,029308 | 0,75 |
| <i>Harrisonia abyssinica</i> Oliv. | Simaroubaceae | Baingou | / | 0,785 | * | 11,420 | 6,70 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,000729 | 0,02 |
| <i>Harungana madagascariensis</i> Lam. ex Poir. | Hypericaceae | Ouombé | Do | 0,467 | | 17,100 | 12,80 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000326 | 0,01 |
| <i>Hevea brasiliensis</i> (A.Juss.) Müll.Arg. | Euphorbiaceae | Arbre à caoutchouc | / | 0,467 | | 33,150 | 17,44 | 12,00 | 0,42 | 0,170 | 0,015873 | 0,41 |
| <i>Homalium stipulaceum</i> Welw. ex Mast. | Flacourtiaceae | / | / | 0,708 | * | 39,750 | 20,25 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,004114 | 0,11 |
| <i>Irvingia gabonensis</i> (Aubry-LeComte ex O'Rourke) Baill. | Irvingiaceae | Boborou | Kplé | 0,775 | | 25,960 | 15,30 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,005141 | 0,13 |
| <i>Khaya grandifoliola</i> C.DC. | Meliaceae | Acajou à grandes feuilles | / | 0,534 | | 22,060 | 11,98 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,002996 | 0,08 |
| <i>Khaya ivorensis</i> A.Chev. | Meliaceae | Acajou de Bassam | / | 0,442 | | 47,675 | 25,05 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,012293 | 0,32 |
| <i>Klainedoxa gabonensis</i> Pierre ex Engl. | Irvingiaceae | Kroma | / | 0,926 | | 22,000 | 10,00 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000540 | 0,01 |
| <i>Lannea welwitschii</i> (Hieron) Engl. | Anacardiaceae | Loloti | / | 0,405 | | 31,340 | 17,78 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,006057 | 0,16 |
| <i>Lecaniodiscus cupanioides</i> Planch. | Sapindaceae | Boué | / | 0,695 | ** | 14,836 | 7,72 | 11,00 | 0,38 | 0,156 | 0,002811 | 0,07 |
| <i>Macaranga hurifolia</i> Belle | Euphorbiaceae | Macaranga | Von | 0,381 | * | 16,183 | 9,57 | 6,00 | 0,21 | 0,085 | 0,001817 | 0,05 |
| <i>Mammea africana</i> Sabine | Clusiaceae | Djimbo | Man | 0,627 | | 56,450 | 19,95 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,011339 | 0,29 |
| <i>Mangifera indica</i> L. | Anacardiaceae | Manguier | Manglo di | 0,553 | | 28,333 | 10,85 | 86,00 | 3,00 | 1,221 | 0,095097 | 2,44 |
| <i>Mareya micrantha</i> (Benth.) Müll.Arg. | Euphorbiaceae | Oyia | Gno | 0,508 | ** | 13,736 | 8,81 | 14,00 | 0,49 | 0,199 | 0,003063 | 0,08 |
| <i>Margaritaria discoidea</i> (Baill.) G.L.Webster | Phyllanthaceae | Lié | Gan | 0,72 | | 22,608 | 13,38 | 12,00 | 0,42 | 0,170 | 0,008504 | 0,22 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|-----------------------|--------------------|-----------------|---------|-------|-------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| <i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C.C.Berg | Moraceae | Iroko | Geu | 1793 | 35,113 | 1793 | 88,00 | 3,07 | 1,250 | 0,177273 | 4,55 |
| <i>Milletia zechiana</i> Harms | Fabaceae | Dologaha | Nian'nè | 9,14 | 15,391 | 9,14 | 22,00 | 0,77 | 0,312 | 0,006539 | 0,17 |
| <i>Morinda lucida</i> Benth. | Rubiaceae | Kouaia | Zoaglu | 13,65 | 23,360 | 13,65 | 104,00 | 3,63 | 1,477 | 0,078754 | 2,02 |
| <i>Morus mesozygia</i> Stapf | Moraceae | Difou | / | 10,50 | 18,500 | 10,50 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,000836 | 0,02 |
| <i>Musanga cecropioides</i> R.Br. ex Tedlie | Moraceae | Parasolier | Loh | 12,94 | 21,350 | 12,94 | 34,00 | 1,19 | 0,483 | 0,019406 | 0,50 |
| <i>Myrianthus arboreus</i> P.Beauv. | Moraceae | Grand Wounian | Gbo ti | 9,14 | 17,679 | 9,14 | 72,00 | 2,51 | 1,022 | 0,027931 | 0,72 |
| <i>Myrianthus libericus</i> Rendle | Moraceae | Wounian | Gbo pou | 6,73 | 14,607 | 6,73 | 58,00 | 2,02 | 0,824 | 0,014672 | 0,38 |
| <i>Nesogordonia papaverifera</i> (A.Chev.) Capuron ex N.Hallé | Malvaceae | Kotibé | / | 19,64 | 30,650 | 19,64 | 8,00 | 0,28 | 0,114 | 0,009607 | 0,25 |
| <i>Newbouldia laevis</i> (P.Beauv.) Seem. ex Bureau | Bignoniaceae | Balié | Zinkodouari | 14,50 | 22,950 | 14,50 | 44,00 | 1,53 | 0,625 | 0,029721 | 0,76 |
| NON IDENTIFIÉ | | | | 13,96 | 25,826 | 13,96 | 31,00 | 1,08 | 0,440 | 0,032188 | 0,83 |
| <i>Octoknema borealis</i> Hutch. & Dalziel | Octoknemaceae | Gbagba | Wenin di | 11,60 | 38,986 | 11,60 | 7,00 | 0,24 | 0,099 | 0,038680 | 0,99 |
| <i>Pachira glabra</i> Pasq. | Malvaceae | Pistache arbuste | Kuy à kwi | 7,80 | 17,950 | 7,80 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,001619 | 0,04 |
| <i>Parkia bicolor</i> A.Chev. | Fabaceae | Lo | / | 17,50 | 51,000 | 17,50 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,002901 | 0,07 |
| <i>Parkia filicoides</i> Welw. ex Oliv. | Fabaceae | Pipigbalé | / | 15,83 | 56,600 | 15,83 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,027117 | 0,70 |
| <i>Pentaclethra macrophylla</i> Benth. | Fabaceae | Ovala | Gbian | 8,80 | 17,213 | 8,80 | 8,00 | 0,28 | 0,114 | 0,003219 | 0,08 |
| <i>Persea americana</i> Mill. | Lauraceae | Avocatier | Voca li | 10,96 | 21,982 | 10,96 | 159,00 | 5,55 | 2,258 | 0,101199 | 2,60 |
| <i>Petersianthus macrocarpus</i> (P.Beauv.) Liben | Lecythidaceae | Abalé | Pin | 22,85 | 52,229 | 22,85 | 14,00 | 0,49 | 0,199 | 0,054296 | 1,39 |
| <i>Piptadeniastrum africanum</i> (Hook.f.) Brenan | Fabaceae | Dabéma | Blè | 15,01 | 27,025 | 15,01 | 12,00 | 0,42 | 0,170 | 0,014846 | 0,38 |
| <i>Pouteria altissima</i> (A.Chev.) Baehni | Sapotaceae | Grogoli | / | 40,60 | 150,000 | 40,60 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,025094 | 0,64 |
| <i>Pseudospondias microcarpa</i> (A.Rich.) Engl. | Euphorbiaceae | M'braoua | Sron | 19,25 | 32,500 | 19,25 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,001549 | 0,04 |
| <i>Psidium guajava</i> L. | Myrtaceae | Blékouré | / | 11,00 | 21,250 | 11,00 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,002074 | 0,05 |
| <i>Pterocarpus santalinoides</i> L'Hér. ex DC. | Fabaceae | Ouokissé | Goyavier | 7,23 | 13,271 | 7,23 | 14,00 | 0,49 | 0,199 | 0,002859 | 0,07 |
| <i>Pterygota macrocarpa</i> K.Schum. | Malvaceae | Koto | Dodié | 12,77 | 25,867 | 12,77 | 3,00 | 0,10 | 0,043 | 0,002276 | 0,06 |
| <i>Myrcianthes angolensis</i> (Welw.) Warb. | Myristicaceae | Ilomba | Deu | 32,06 | 101,720 | 32,06 | 5,00 | 0,17 | 0,071 | 0,076251 | 1,96 |
| <i>Rauvolfia vomitoria</i> Afzel. | Apocynaceae | Dechavi | Ding | 16,62 | 46,110 | 16,62 | 30,00 | 1,05 | 0,426 | 0,097420 | 2,50 |
| <i>Ricinodendron heudelotii</i> (Baill.) Pierre ex Heckel | Euphorbiaceae | Eho | Gbeghan | 7,04 | 13,425 | 7,04 | 16,00 | 0,56 | 0,227 | 0,003404 | 0,09 |
| <i>Rinorea longicaulis</i> Engl. | Violaceae | Ehoué | Akpi | 16,59 | 46,460 | 16,59 | 30,00 | 1,05 | 0,426 | 0,106455 | 2,73 |
| Rubiaceae indéterminée | Rubiaceae | | / | 5,30 | 11,000 | 5,30 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000135 | 0,00 |
| <i>Spathodea campanulata</i> P.Beauv. | Bignoniaceae | Tulipier du Gabon | Poboli | 13,50 | 19,775 | 13,50 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,001916 | 0,05 |
| <i>Spondias mombin</i> L. | Anacardiaceae | Mombin | Mirabelle/Trontron | 13,14 | 28,264 | 13,14 | 11,00 | 0,38 | 0,156 | 0,011256 | 0,29 |
| <i>Sterculia tragacantha</i> Lindl. | Malvaceae | Poré Poré | Touh | 14,68 | 34,635 | 14,68 | 26,00 | 0,91 | 0,369 | 0,039884 | 1,02 |
| <i>Terminalia ivorensis</i> A.Chev. | Combretaceae | Framiré | Framiré | 16,67 | 35,269 | 16,67 | 26,00 | 0,91 | 0,369 | 0,047625 | 1,22 |
| <i>Terminalia superba</i> Engl. & Diels | Combretaceae | Fraké (Limba) | Fraké | 21,34 | 44,635 | 21,34 | 20,00 | 0,70 | 0,284 | 0,069714 | 1,79 |
| <i>Tetrapleura tetraptera</i> (Schumach. & Thonn.) Taub. | Fabaceae | Eséhésé | Zangbedi | 11,10 | 18,069 | 11,10 | 13,00 | 0,45 | 0,185 | 0,005172 | 0,13 |
| <i>Tetrorchidium didymostemon</i> (Baill.) Pax & K.Hoffm. | Euphorbiaceae | / | Tongla | 9,50 | 15,600 | 9,50 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,001215 | 0,03 |
| <i>Trema orientalis</i> (L.) Blume | Cannabaceae | Adaschia | Lordi | 15,40 | 23,200 | 15,40 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,000600 | 0,02 |
| <i>Trichilia martinica</i> Aubrév. & Pellegr. | Meliaceae | Miéstandabo | Bàdodi | 12,78 | 18,550 | 12,78 | 4,00 | 0,14 | 0,057 | 0,001741 | 0,04 |
| <i>Trichilia tessmannii</i> Harms | Meliaceae | Aribanda | Wouah | 11,74 | 22,370 | 11,74 | 27,00 | 0,94 | 0,383 | 0,019299 | 0,50 |
| <i>Triplepisium madagascariense</i> DC. | Moraceae | Daoucu | Pa pou | 26,63 | 55,783 | 26,63 | 6,00 | 0,21 | 0,085 | 0,023050 | 0,59 |
| <i>Triplochiton scleroxylon</i> K.Schum. | Malvaceae | Samba (Ayous, Obéché) | Samba | 31,00 | 86,365 | 31,00 | 20,00 | 0,70 | 0,284 | 0,221271 | 5,68 |
| <i>Xylopia aethiopica</i> (Dunal) A.Rich. | Annonaceae | Poirvier de Guinée | Poirve | 17,85 | 28,150 | 17,85 | 2,00 | 0,07 | 0,028 | 0,001863 | 0,05 |
| <i>Zanthoxylum gillettii</i> (De Wild.) P.G. Waterman | Rutaceae | Bahé (Olou-dur) | Mbokin | 22,89 | 38,571 | 22,89 | 17,00 | 0,59 | 0,241 | 0,035012 | 0,90 |
| <i>Zanthoxylum parvifolium</i> (A.Chev. ex Keay) W.D.Hawth. | Rutaceae | Mingki | / | 16,40 | 39,000 | 16,40 | 1,00 | 0,03 | 0,014 | 0,001696 | 0,04 |
| | | | | Totaux : | | | 2867 | 100,00 | 40,713 | 3,894452 | 100,00 |
| | | | | | | | | | | | |

Annexe 8 : Autres modèles allométriques (Hauteur – Diamètre) possibles :

- (A) Transformation logarithmique du DHP : ce modèle n'a pas été retenu en raison d'une erreur standard importante, bien que le R^2 ne soit pas mauvais.

Equation allométrique du modèle : $H = -24,279 + 11,845 * \log(\text{DHP})$

```
> #Modélisation avec log de Dbh
> log_model <- lm(H ~ log(Dbh), data = dataALLOM, weights=Dbh)
> summary(log_model)
```

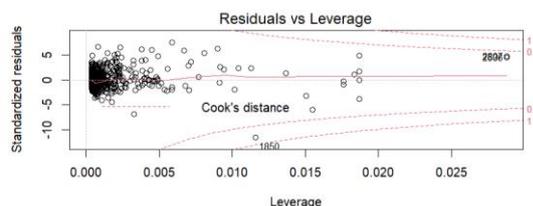
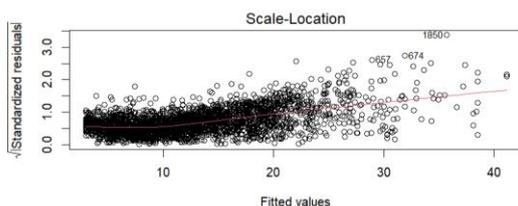
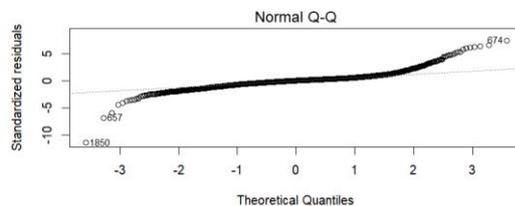
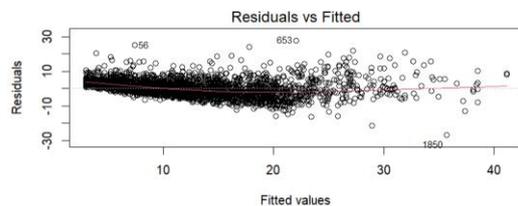
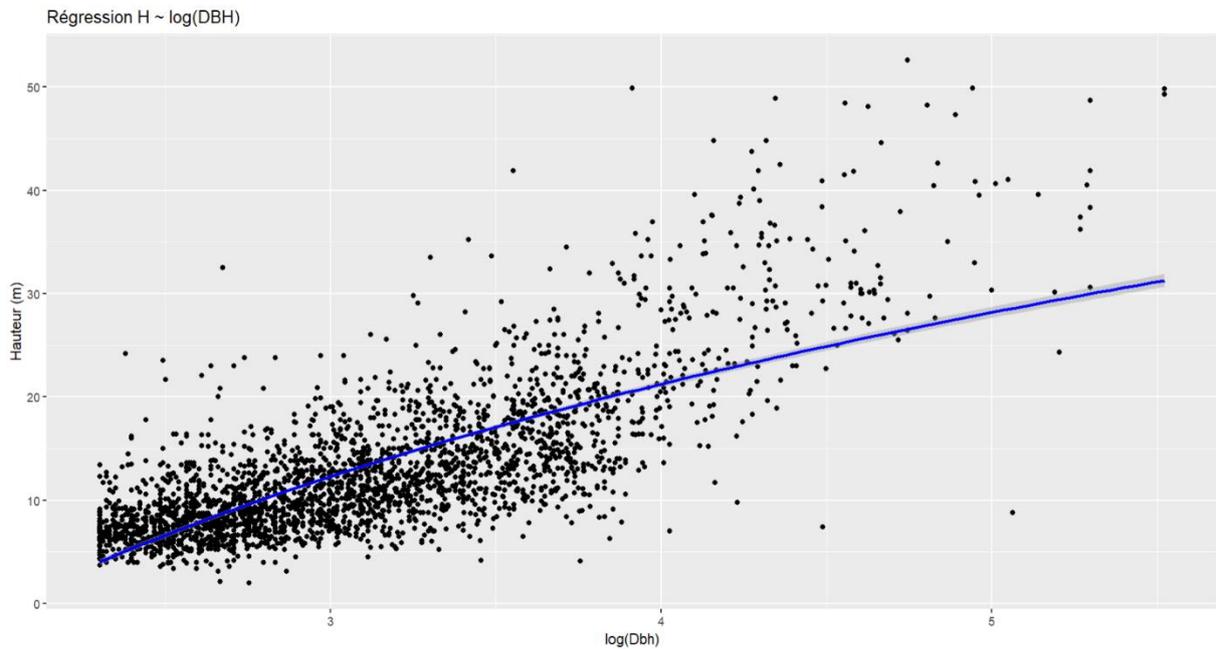
Call:
lm(formula = H ~ log(Dbh), data = dataALLOM, weights = Dbh)

Weighted Residuals:
Min 1Q Median 3Q Max
-338.00 -12.45 1.31 11.54 221.70

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -24.2788 0.5391 -45.03 <2e-16 ***
log(Dbh) 11.8454 0.1501 78.94 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 29.67 on 2865 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.685, Adjusted R-squared: 0.6849
F-statistic: 6231 on 1 and 2865 DF, p-value: < 2.2e-16



(B) Transformation logarithmique du DHP et de H : ce modèle n'a pas été retenu car il demande une double transformation de variable et présente un R^2 plus faible. Toutefois, ce modèle reste robuste et pourrait être utilisé.

Equation allométrique du modèle : $\log(H) = 0,389 + 0,658 \cdot \log(DHP)$

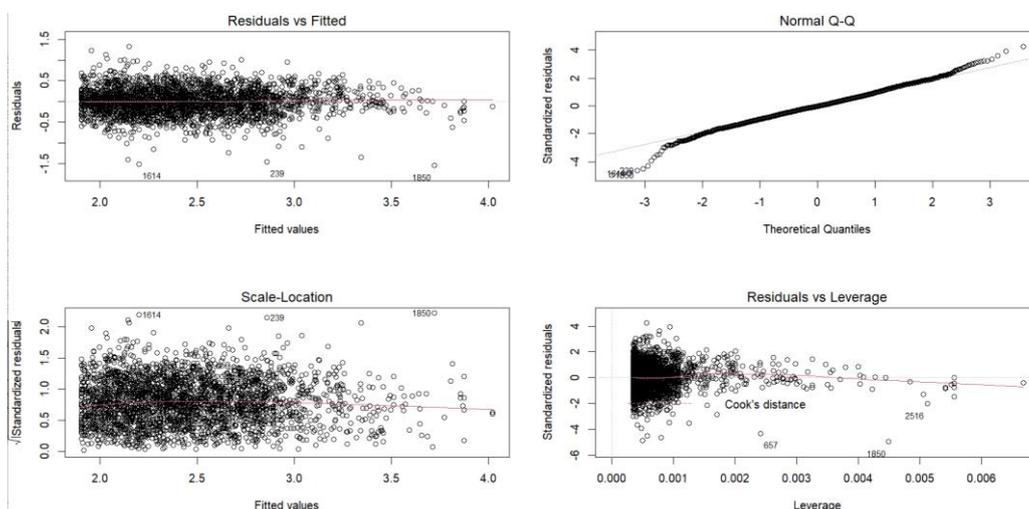
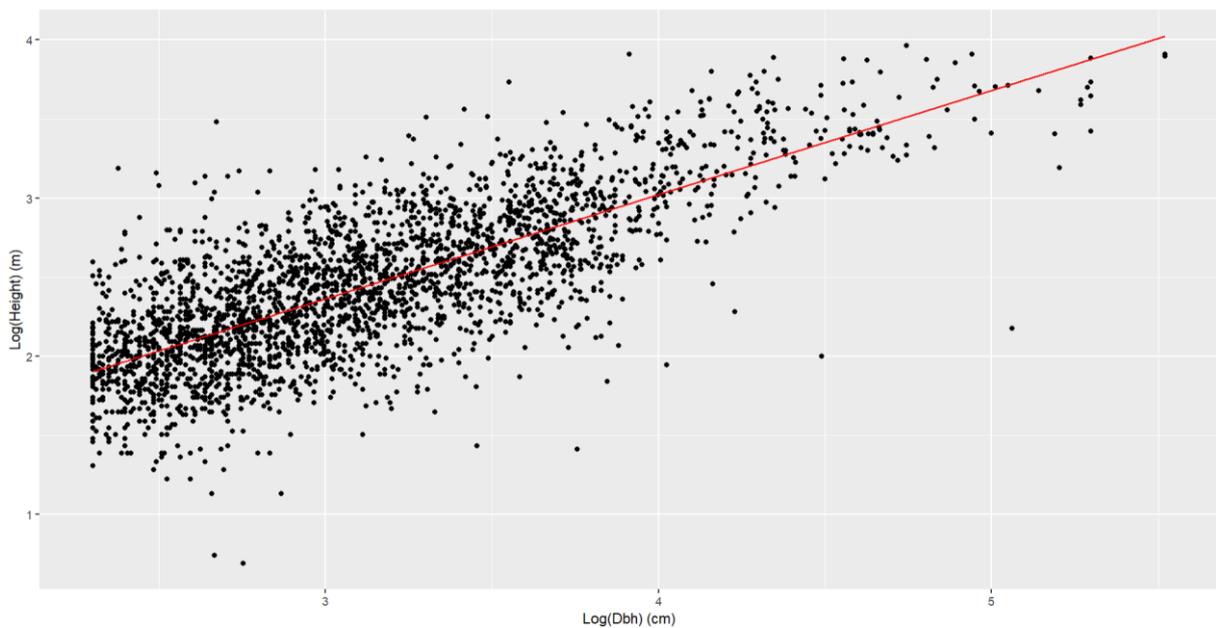
```
> summary(log_model_h)

Call:
lm(formula = log(H) ~ log(Dbh), data = dataALLOM)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.54561 -0.19248 -0.00489  0.19583  1.33271

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.38868    0.03276   11.86  <2e-16 ***
log(Dbh)     0.65810    0.01034   63.62  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3127 on 2865 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5855, Adjusted R-squared:  0.5854
F-statistic: 4047 on 1 and 2865 DF, p-value: < 2.2e-16
```



Annexe 9 : Espèces reprises sur la liste rouge de l'UICN (VU = Vulnérable) (The IUCN Red List of Threatened Species)

| Espèce | Statut UICN |
|---|--------------------|
| <i>Bombax brevicuspe</i> Sprague | VU |
| <i>Cedrela odorata</i> L. | VU |
| <i>Copaifera salikounda</i> Heckel | VU |
| <i>Cordia platythyrsa</i> Baker | VU |
| <i>Entandrophragma utile</i> (Dawe & Sprague) Sprague | VU |
| <i>Eribroma oblongum</i> (Mast.) Pierre ex A.Chev. | VU |
| <i>Garcinia afzelii</i> Engl. | VU |
| <i>Garcinia kola</i> Heckel | VU |
| <i>Khaya grandifoliola</i> C.DC. | VU |
| <i>Khaya ivorensis</i> A.Chev. | VU |
| <i>Nesogordonia papaverifera</i> (A.Chev.) Capuron ex N.Hallé | VU |
| <i>Pterygota macrocarpa</i> K.Schum. | VU |
| <i>Terminalia ivorensis</i> A.Chev. | VU |