
Quantification des stocks de carbone dans les cacaoyères agroforestières en fonction des modes de gestion différenciés dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Man, district des Montagnes).

Auteur : Devroye, Lara

Promoteur(s) : Doucet, Jean-Louis; Meersmans, Jeroen

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24259>

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
DANS LES CACAOYÈRES AGROFORESTIÈRES EN
FONCTION DES MODES DE GESTION
DIFFÉRENCIÉS DANS L'OUEST DE LA CÔTE
D'IVOIRE (MAN, DISTRICT DES MONTAGNES)**

LARA DEVROYE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS: DOUCET J-L & MEERSMANS J

© 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
DANS LES CACAOYÈRES AGROFORESTIÈRES EN
FONCTION DES MODES DE GESTION
DIFFÉRENCIÉS DANS L'OUEST DE LA CÔTE
D'IVOIRE (MAN, DISTRICT DES MONTAGNES)**

LARA DEVROYE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS: DOUCET J-L & MEERSMANS J

REMERCIEMENTS

Un grand merci à mes deux promoteurs pour leur suivi attentif. Au Pr. Jean-Louis Doucet, merci de m'avoir proposé ce projet de mémoire captivant et d'avoir organisé les aspects logistiques de ma mission de terrain. Vos relectures attentives et vos conseils à distance ont été essentiels à sa réalisation.

Je tiens également à remercier le Pr. Jeroen Meersmans pour son encadrement rigoureux, qui m'a permis d'approfondir mes connaissances en sciences du sol, domaine dans lequel mes bases étaient limitées à l'issue de mon master en foresterie. Vos explications techniques, vos conseils pour l'interprétation de mes résultats, ainsi que vos relectures ont largement contribué à la qualité de ce travail. Merci également d'avoir géré l'envoi de mes échantillons vers les laboratoires.

Je souhaite également remercier la Chocolaterie Galler®, partenaire du laboratoire de Foresterie Tropicale de la Faculté de Gembloux. Merci d'avoir poursuivi un projet existant et de m'avoir permis de construire ce travail. Merci à toute l'équipe pour leur accueil et leur engagement. Je remercie aussi la Fondation Roi Baudouin pour le financement de cette recherche, ainsi que l'ULiège qui m'a accordé une bourse ayant couvert une grande partie des frais de voyage.

En tant que partenaire local, je tiens à remercier sincèrement la coopérative YEYASSO qui m'a accueillie pendant trois mois. Un merci particulier à son directeur général, M. Yeo Y. Moussa, qui m'a intégrée au sein de son équipe et a veillé au bon déroulement de ma mission, tant sur le plan scolaire que social.

Merci à M. Ouattara Daba Karim, gestionnaire de projets, pour son impeccable gestion de la logistique et son aide sur divers aspects du projet. Sa sympathie, sa disponibilité constante et son écoute ont grandement facilité mon séjour et mes recherches.

Ma reconnaissance va également à tous les producteurs relais membres de YEYASSO qui m'ont accompagnée sur le terrain. Leur expertise du milieu, leurs relations privilégiées avec les producteurs, leur dévouement et leur bonne humeur ont été indispensables à la réussite de ce projet. Un grand merci tout particulièrement aux producteurs relais de Bogouiné, chez qui j'ai passé de nombreuses journées.

Je tiens à exprimer ma gratitude toute particulière à Vemo Bakayoko et à sa famille, qui m'ont hébergée avec une générosité remarquable. Grâce à eux, j'ai pu découvrir la culture locale, savourer la cuisine traditionnelle et m'initier aux langues locales. Merci également à Gbongue Rickson Diomande et à Tiemoko Emma Innocent, ainsi qu'à leurs familles, pour leur accueil chaleureux, même si de plus courte durée, toujours empreint d'une grande qualité humaine. Merci pour cet enrichissement culturel mutuel.

Enfin, merci à tous les producteurs qui ont accepté de participer à cette étude et ont partagé leurs connaissances avec patience et bienveillance.

Je remercie chaleureusement le Pr. Tom De Mil pour son aide précieuse dans la réalisation de l'équation allométrique. Sa réactivité et ses conseils, tant pendant mon séjour en Côte d'Ivoire qu'à mon retour en Belgique, ont été déterminants pour cette partie technique de mon travail.

Mes remerciements vont également aux personnes qui ont facilité le transport de mes échantillons vers la Belgique : Pr Philippe Lejeune, Monsieur Guy Roulette, Monsieur Vicenté et Ugo Chiavetta. Votre aide logistique a été essentielle à la finalisation des analyses.

Enfin, un tout grand merci à Lisa Hidoine, de m'avoir accompagnée durant ces trois mois de terrain, d'avoir aidé à trouver des solutions à nos problèmes, d'avoir partagé mes rires et mes angoisses, et d'avoir été une partenaire exemplaire.

Merci également à ma famille pour son soutien sans faille durant ce travail, mais aussi durant mes longues années d'études. Merci à mes parents pour leur soutien financier et émotionnel, et pour avoir toujours cru en moi.

Merci également à mes amis, et plus particulièrement à mes colocataires, de m'avoir accompagnée durant cette année. Un merci spécial à Maeva, Téo et Lisa d'avoir partagé cet été avec moi. Merci également à Ugo Chiavetta pour son soutien constant durant cette période et ses relectures attentives de ce document.

Merci à Viviane Flamand pour son accueil chaleureux durant les week-ends, ainsi qu'à Damien Bawin pour son hospitalité estivale.

Et enfin, un grand merci à la grande famille gembloutoise de m'avoir fait vivre ces années exceptionnelles.

RÉSUMÉ

Objectifs	Comprendre comment la densité d'arbres d'ombrage et la gestion de champs agroforestiers en agriculture biologique impactent le carbone stocké dans les cacaoyères.
Localisation	Coopérative agricole YEYASSO COOP – CA de Man, district des Montagnes, dans l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire.
Méthodes	Des mesures des stocks de carbone organique du sol entre 0 et 30cm ont été effectuées dans 17 champs, 5 en agriculture biologique et 12 en conventionnel, suivant un gradient de densité d'arbres d'ombrage. Des analyses statistiques ont été réalisées pour évaluer les différences significatives entre les modes biologique et conventionnel. Une équation allométrique a été réalisée pour quantifier la biomasse des cacaoyers présents sur la coopérative et pour cela 14 cacaoyers ont été abattus. Les stocks de carbone total ont ensuite été calculés sur base de données récoltées précédemment pour environ 5% de la coopérative (Cerny, 2024).
Résultats	Aucune différence significative n'a été observée dans les stocks de SOC en fonction du gradient de densité d'arbres d'ombrage, mais une augmentation de 0,59% du SOC pour chaque m ² /ha de surface terrière supplémentaire a été mesurée, soit +0,18 t C/ha par m ² /ha. Concernant les modes de culture, aucune différence significative de la surface terrière n'a été détectée entre agriculture biologique et conventionnelle, mais les sols biologiques (31 ± 8,35 t C/ha) présentent une très légère augmentation des stocks de SOC de +0,47 t/ha par rapport au conventionnel (30,53± 8,35 t/ha). L'équation allométrique développée donne des résultats satisfaisants pour les arbres de faible diamètre, bien que l'ajustement soit moins robuste pour les cacaoyers de plus gros diamètre. Les stocks actualisés de la coopérative s'élèvent à un total de 55,6 ± 12,2 t /ha, soit 204,1± 44,8 t CO ₂ équivalent par hectare, répartis comme suit : carbone organique du sol (30,7 ± 7,36 t /ha,), arbres d'ombrage (15,8 ± 1,9 t /ha) et cacaoyers (9,1 ± 2,1 t /ha).
Conclusion	Bien que les différences observées ne soient pas statistiquement significatives, les tendances positives entre densité d'arbres d'ombrage et SOC, ainsi que les gains modestes en agriculture biologique, offrent des pistes pour la valorisation carbone. La combinaison de ces pratiques (augmentation surface terrière, maintien des grands arbres, conversion biologique) constitue une stratégie pour améliorer le bilan carbone de la coopérative et accéder aux crédits carbone.
Mots clés	SOC, carbone, agroforesterie, cacao, Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest, équation allométrique cacaoyers, biologique, conventionnel, surface terrière, YEYASSO

ABSTRACT

Objectives	To assess how shade tree density and agroforestry management under organic farming influence carbon stocks in cacao plantations.
Study site	YEYASSO COOP agricultural cooperative – CA of Man, Montagnes district, in the far west of Côte d'Ivoire.
Methods	Soil organic carbon (SOC) stocks between 0 and 30 cm depth were measured in 17 fields, including 5 under organic farming and 12 under conventional management, along a gradient of shade tree density. Statistical analyses were conducted to evaluate significant differences between organic and conventional systems. An allometric equation was developed to quantify cacao tree biomass; for this purpose, 14 cacao trees were felled. Total carbon stocks were subsequently calculated based on previously collected data covering approximately 5% of the cooperative area (Cerny, 2024).
Results	No significant differences in SOC stocks were observed across the shade tree density gradient, but a 0.59% increase in SOC was detected per additional m ² /ha of basal area, corresponding to +0.18 t C/ha per m ² /ha. Regarding farming systems, no significant differences in basal area were detected between organic and conventional plots; however, organic soils (31 ± 8.35 t C/ha) showed a slight increase in SOC stocks of +0.47 t/ha compared to conventional soils (30.53 ± 8.35 t C/ha). The developed allometric equation yielded satisfactory results for small-diameter cacao trees, although the fit was less robust for larger diameters. Updated cooperative-level carbon stocks amount to 55.6 ± 12.2 t/ha, equivalent to 204.1 ± 44.8 t CO ₂ /ha, distributed as follows: soil organic carbon (30.7 ± 7.36 t/ha), shade trees (15.8 ± 1.9 t/ha), and cacao trees (9.1 ± 2.1 t/ha).
Conclusion	Although the observed differences were not statistically significant, the positive trends between shade tree density and SOC, together with the modest gains under organic farming, provide opportunities for carbon valorization. Combining these practices (increasing basal area, preserving large trees, and adopting organic farming) may represent a strategy to improve the cooperative's carbon balance and access carbon credits.
Keywords	SOC, carbon, agroforestry, cacao, Côte d'Ivoire, West Africa, cacao allometric equation, organic, conventional, basal area, YEYASSO

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
1.1 Le changement climatique, causes et conséquences	1
1.2 La Côte d'Ivoire et la culture du cacao.....	2
1.3 L'agroforesterie biologique comme solution	4
1.3.1 L'agroforesterie	4
1.3.2 Les stocks de carbone	5
1.3.3 L'agriculture biologique	6
1.4 Les paiements pour service écosystémique.....	7
1.4 Contexte et objectifs de l'étude.....	8
2. Matériel et méthodes	9
2.1 Zone d'étude	9
2.2 Stock de carbone organique dans le sol	10
2.2.1 Établissement d'un gradient de densité d'arbres	10
2.2.3 Prélèvement des échantillons de sol.....	11
2.2.4 Analyse statistique.....	12
2.3 Biomasse des cacaoyers	13
2.3.1 Sélection des cacaoyers	13
2.3.2 Mesures destructives	13
2.3.3 Analyse des données	14
2.4 Détermination des stocks de carbone dans la biomasse.....	16
2.4.1 Détermination de la biomasse totale des arbres d'ombrages	16
2.4.2 Détermination de la biomasse totale	17
2.5 Utilisation d'outils informatiques	17
3. Résultats	18
3.1 Stock de carbone organique du sol	18
3.1.1 Variation intra parcellaires.....	18
3.1.2 Variation inter-parcellaires	20
3.2 Stock de carbone dans les cacaoyers.....	23
3.2.1 Variabilité des cacaoyers échantillonnés	23
3.2.2 Régression.....	23
3.2.3 Comparaison avec l'équation d'Andrade et al. (2008).....	25
3.3 Carbone total	26
3.3.1 Influence du mode de culture sur la surface terrière	26
3.3.2 Carbone total présent sur la Coopérative.....	27
4. Discussion	29

4.1 Variabilité intra-parcellaires	29
4.2 Effet du facteur mode de culture	29
4.3 Effet de la surface terrière et comparaison avec des zones forestières.....	29
4.4 Biomasse des cacaoyers	30
4.5 Carbone total dans la coopérative.....	31
4.5.1 Différence entre les stocks de carbone dans les cacaoyers de Cerny (2024) et de cette étude	31
4.5.2 Différence du carbone total de cette étude et d'autres	31
4.6 Difficulté de comparaison entre différentes études.....	32
4.7 Limites de l'études	32
5. Contribution personnelle de l'étudiante.....	33
6. Perspectives	34
7. Conclusion.....	35
9. Bibliographie	36
10. Annexes	42

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Carte d'aptitude agro-climatique du cacao : situation actuelle, en 2050 et variation. D'après Schroth et al., (2016), avec focus sur la zone d'étude.....	3
Figure 2 - Flow chart de la méthodologie.....	8
Figure 3 - Cartographie de la zone d'étude (Cerny et al., 2024).....	9
Figure 4 - Photographie schématique d'une fosse d'échantillonnage.....	11
Figure 5 - Évolution temporelle du taux d'humidité dans les échantillons de troncs.....	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 6 - Boîte à moustache du stock de SOC moyen (t/ha) par profondeur.....	20
Figure 7 - Localisation des parcelles biologiques (jaune) et conventionnelles (rouge) affichées sur fond Google Satellite.....	20
Figure 8 - Régression linéaire logarithmique entre les stocks de carbone organique du sol (t/ha) et la surface terrière (m ² /ha) par profondeur (0-10, 10-20, 20-30 cm) dans 17 parcelles.....	22
Figure 9 - Relation entre les valeurs observées et prédites de la biomasse aérienne (AGB) des cacaoyers par l'équation allométrique $AGB = 0,3264 \times D_{30}^{1,4747}$	25
Figure 10 - Comparaison de la surface terrière (m ² /ha) entre systèmes biologiques (vert, n=5) et conventionnels (bleu, n=12) par boîtes à moustaches, test de Mann-Whitney.....	27

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Corrélation entre les différentes variables et la biomasse aérienne	15
Tableau 2 - Équations allométriques proposées pour la modélisation de la biomasse aérienne des cacaoyers	15
Tableau 3 - Analyse de la variabilité spatiale intra-parcellaire : moyenne et écart-type des coefficients de variation (%) par échelle spatiale et par variable, résultats des tests de Kruskal-Wallis.....	18
Tableau 4 - Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des stocks de SOC, densité apparente et teneur en carbone organique selon la profondeur	19
Tableau 5 - Statistiques descriptives des stocks de SOC (t C/ha) par profondeur en systèmes biologiques et conventionnels	21
Tableau 6 - Coefficients de corrélation et p-valeurs des corrélations de Spearman entre les stocks de SOC et la surface terrière selon la profondeur	22
Tableau 7 - Statistiques descriptives de l'échantillon de cacaoyers abattus (n=14) : paramètres dendrométriques et biomasse (D ₃₀ , DBH, D houppier, Aire houppier, hauteur, AGB)	23
Tableau 8 - Comparaison des différents modèles de régression non linéaire pour l'estimation de la biomasse aérienne des cacaoyers : équations, R ² pseudo, AIC, BIC et RMSE.....	24
Tableau 9 - Stocks de carbone par section de la coopérative : stockage dans les arbres d'ombrage, les cacaoyers, biomasse totale, carbone total incluant le sol (30,7 ± 7,36 t C/ha) et équivalent CO ₂ , avec moyenne pondérée par la surface.....	28

TABLE DES ÉQUATIONS

Équation 1 - Surface terrière à partir des diamètres.....	10
Équation 2 - Stocks de carbone organique du sol (Meersmans et al., 2012).....	12
Équation 3 - Coefficient de conversion de masse fraîche - masse sèche	14
Équation 4 - AGB des arbres d'ombrages, Chave et al. (2014)	16
Équation 5 - AGB des palmiers, Mignolet et al. (2020)	16
Équation 6 - Stock de carbone et équivalent CO ₂	17
Équation 7 - Equation allométrique relative aux cacaoyers adapté à la zone d'études.....	24

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 - Equation allométrique linéaire.....	42
Annexe 2 - Equation allométrique linéaire sans le cacaoyers aberrant	42
Annexe 3 - Equation allométrique non linéaire avec le cacaoyer aberrant	43
Annexe 4 - Etudes du facteur localisation sur les stocks de SOC	43
Annexe 5 - Relation linéaire entre la densité apparente et la teneur carbone organique pour chaque parcelles.....	45

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AGB	Above Ground Biomass ; biomasse aérienne des ligneux associée au tronc et au houppier des arbres
BGB	Below Ground Biomass ; biomasse souterraine des ligneux associée aux racines
SOC	Soil Organic Carbon ; carbone organique du sol
EqCO ₂	Équivalent CO ₂
D30	Diamètre à 30cm
DBH	Diameter at Breast Height ; diamètre à hauteur de poitrine, fixé à 1m30
GES	Gaz à Effet de Serre
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
USD	United States Dollar ; dollar des États-Unis

1. Introduction

1.1 Le changement climatique, causes et conséquences

Le changement climatique, crise majeure de l'anthropocène, exerce des impacts considérables sur les systèmes climatiques et la biodiversité terrestre. Il contribue notamment à l'effondrement alarmant de nombreuses populations animales, avec une perte estimée de 52 % des vertébrés sauvages entre 1970 et 2010, et des perturbations écologiques majeures (Upreti, 2023). Ce dérèglement résulte en grande partie d'activités anthropiques, c'est-à-dire attribuable aux effets directs et indirects des activités humaines. (Forster et al., 2024) En 2024, la température moyenne globale a franchi pour la première fois la limite de +1,5 °C définie par l'Accord de Paris. (Bevacqua et al., 2025)

Ce réchauffement s'explique principalement par l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O), dont les effets sont mesurés en équivalent CO₂ pour en comparer le potentiel de réchauffement global (Olczak et al., 2023). Les concentrations de GES ont atteint un niveau record au cours de la dernière décennie. (Forster et al., 2025).

L'agriculture représente 12 % émissions mondiales de GES (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022a) dont 38 % des émissions de N₂O, principalement liées à l'usage d'engrais (Filonchuk et al., 2024).

Elle constitue également l'un des principaux moteurs de la déforestation (FAO,2022). Or, les forêts jouent un rôle essentiel en tant que puits et stocks de carbone terrestres, en absorbant et stockant du CO₂ atmosphérique. La déforestation et la dégradation des écosystèmes forestiers sont liées à la croissance démographique et aux changements d'usage des terres (Kumar et al., 2022).

Bien que l'Afrique ne soit responsable que de 4 % des émissions mondiales de GES, elle en subit de manière disproportionnée les conséquences (Mostefaoui et al., 2024; Mehra et al., 2024). Le changement climatique y provoque déjà une baisse des rendements agricoles et aggrave l'insécurité alimentaire, dans un contexte où l'économie repose largement sur ce secteur (Onyeaka et al., 2024). La pression démographique, avec une population attendue à 2,5 milliards d'habitants d'ici 2050, accentue ces vulnérabilités (Mostefaoui et al., 2024). Dans ce contexte, les émissions issues des activités humaines risquent de croître fortement, au point que le continent africain pourrait contribuer à 20% des émissions mondiale d'ici 2050 (Mostefaoui et al., 2024 ;Williams et al., 2007)

Cette dynamique exerce une pression croissante sur les forêts. La perte de couvert forestier, est attribuable à divers facteurs : conversion des forêts en plantations industrielles (huile de palme, cacao, caoutchouc), expansion de l'agriculture sur brûlis sous l'effet de la pression foncière, feux de brousse incontrôlés et exploitation forestière non durable. En Afrique de l'Ouest, on estime que près de 80 % de la forêt originelle ont été transformés en mosaïques agroforestières (Norris et al., 2010).

1.2 La Côte d'Ivoire et la culture du cacao

À l'échelle mondiale, entre 5 et 6 millions d'agriculteurs dépendent du cacao pour leur subsistance (Hawkins et al., 2024). Cette production repose essentiellement sur de petits producteurs, possédant des exploitations de moins de 2 hectares et qui assurent à eux seuls environ 70 % de la production mondiale de cacao (Vervuurt et al., 2022).

La Côte d'Ivoire est le premier producteur mondial de cacao, représentant 46 % de la production globale (Kouadio et al., 2024), et a produit en 2023 plus de 2 millions de tonnes de cacao (FAOSTAT 2025, ICCO).

Cette position dominante sur le marché mondial s'accompagne d'enjeux socio-économiques considérables. L'agriculture représente aujourd'hui environ 70 % des exportations nationales, emploie deux tiers de la population et contribue à un tiers du Produit intérieur brut (PIB). La cacaoculture constitue donc un pilier de l'économie ivoirienne. Toutefois, cette économie de rente s'est développée au prix d'une forte pression sur les écosystèmes forestiers (Zo-Bi et al., 2023a).

Au cours du siècle dernier, la Côte d'Ivoire a connu une diminution drastique de sa couverture forestière. À la fin des années 1800, les forêts tropicales couvraient environ 16 millions d'hectares. Cette superficie a chuté à 7,8 millions d'hectares en 1990, puis à seulement 3 millions aujourd'hui, soit une réduction de moitié entre 1990 et 2020. Désormais, la forêt ne représente plus que 9,2 % du territoire national (Cuny et al., 2023).

Cette perte s'explique à raison de 62 % par l'expansion des cultures industrielles et vivrières. À cela s'ajoute l'exploitation forestière, notamment pour la production de bois d'œuvre et de bois de chauffage (Kouassi et al., 2021). Parmi les cultures les plus impliquées figurent le cacao (*Theobroma cacao*), l'hévéa (*Hevea brasiliensis*) et le café (*Coffea spp.*) (Diallo, 2023). La culture de cacao est la principale responsable de cette déforestation, causant 60 % de la perte du couvert forestier ivoirien (Sabas et al., 2020 ; Ruf et al., 2015).

Historiquement, la culture du cacao se pratiquait surtout en agroforesterie. Mais à partir des années 1960, l'arrivée de vagues migratoires et l'introduction d'une nouvelle variété plus résistante au soleil — la variété « Ghana » — ont incité les paysans à se tourner vers la monoculture. Au début des années 2000, près de 90 % des plantations étaient cultivées en plein soleil (Alexis et al., n.d.).

Cette évolution vers la monoculture s'accompagne d'une pratique d'agriculture itinérante : les parcelles sont abandonnées dès que leur rendement baisse, au profit de nouvelles zones forestières fraîchement défrichées. Cette intensification a entraîné une diminution des arbres d'ombrage en quantité et diversité (Ruf et al., 2015).

En Côte d'Ivoire, cette logique a entraîné un déplacement progressif des plantations de l'est, plus sec, vers l'ouest, plus humide. Ce mouvement s'est aussi accompagné d'une forte migration d'agriculteurs, souvent venus de pays voisins, attirés par les rendements élevés des forêts récemment ouvertes à la culture (Ruf et al., 2015).

Le changement climatique ajoute une dimension supplémentaire à cette problématique spatiale. Avec le réchauffement, un climat plus chaud et sec pourrait pousser les producteurs vers les dernières forêts du sud-ouest de la Côte d'Ivoire (Ruf, 2011).

Les températures maximales pendant la saison sèche pourraient atteindre des niveaux similaires à ceux des savanes, dépassant localement les seuils de tolérance du cacaoyer. La chaleur extrême durant cette période a d'ailleurs l'impact le plus marqué sur la culture du cacao (Schroth, Läderach, et al., 2016). Par ailleurs, les changements climatiques modifient profondément les régimes saisonniers, avec une réduction de la durée des saisons pluvieuses au profit des saisons sèches (Gnangouin et al., 2023).

Ces projections climatiques se traduisent par une redistribution des zones optimales pour la cacaoculture (*Figure 1*).

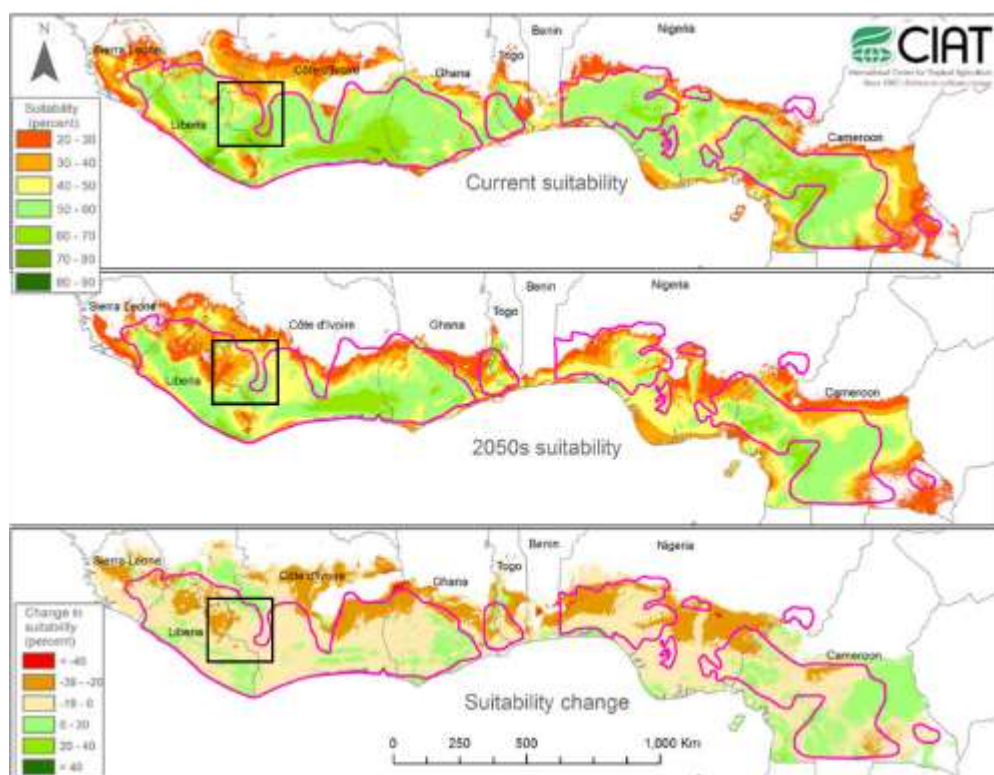


Figure 1 - Carte d'aptitude agro-climatique du cacao : situation actuelle, en 2050 et variation. D'après Schroth et al., (2016), avec focus sur la zone d'étude.

Cette fragilité de la cacaoculture face au changement climatique illustre une relation paradoxale. Alors que le réchauffement climatique restreint les zones favorables à la culture du cacao, cette même production alimente le problème par ses émissions carbone issues de la culture, du transport et de la transformation. On estime que la production d'un kilogramme de fèves de cacao produit en moyenne 1.47 kg CO₂eq (Vervuurt et al., 2022) et celle d'un kilogramme de chocolat noir 2.1 kg (Jungbluth, n.d. ; Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022b).

Pourtant la demande mondiale ne cesse de croître (Smith Dumont et al., 2014) et la pression sur les terres agricoles s'accroît. Produire davantage, tout en préservant les forêts, représente l'un des principaux défis de la filière. Cette contrainte est renforcée par la croissance démographique de la Côte d'Ivoire et la nécessité d'augmenter la production vivrière, en particulier autour des grandes agglomérations. Or, ces zones urbaines se trouvent souvent au cœur des régions traditionnellement cacaoyères (Wessel et al., 2015).

Pour augmenter le rendement sans accroître la surface cultivée, l'apport d'engrais a été l'une des solutions privilégiées. Initialement utilisés sur de vieilles plantations pour prolonger leur productivité, les engrais ont ensuite été appliqués sur de jeunes parcelles afin d'augmenter les

rendement (Plas et al., 2024). Cependant, leurs impacts négatifs sur l'environnement et sur la santé des producteurs ne sont plus à démontrer (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022b). Malgré une certaine sensibilisation aux risques sanitaires, leur usage reste souvent non sécurisé, avec notamment un manque d'équipements de protection, un stockage inapproprié dans les habitations et une exposition directe des applicateurs (Okoffo et al., 2016). Par ailleurs, bien que les engrais améliorent parfois les rendements, leur coût élevé ne les rend pas toujours rentables pour les producteurs (Wessel et al., 2015).

1.3 L'agroforesterie biologique comme solution

1.3.1 L'agroforesterie

Face aux nombreux défis environnementaux et agronomiques liés à la culture du cacao, l'agroforesterie est souvent présentée comme une solution durable. Elle consiste à associer la culture du cacaoyer à des arbres d'ombrage et à d'autres plantes utiles, telles que des cultures vivrières ou des arbres à valeur économique. Cette pratique favorise la diversification des productions, renforce la résilience des exploitations et atténue les impacts écologiques liés à la monoculture (Niether et al., 2020). Dans cette optique, de plus en plus de politiques publiques et d'initiatives de développement rural encouragent l'agroforesterie (Kumeh, 2024).

Cependant, les rendements du cacao sont souvent meilleurs dans les monocultures, surtout durant les premières années (Ruf, 2011) et peuvent être jusqu'à 25% plus élevés que dans les systèmes agroforestiers (Niether et al., 2020). Ce constat soulève un dilemme pour les producteurs : adopter une culture en plein soleil, qui nécessite généralement beaucoup d'intrants, ou s'orienter vers une agroforesterie plus durable bénéficiant potentiellement de certifications (Smith Dumont et al., 2014). Pour que le cacao cesse d'être un moteur de déforestation, il est essentiel d'encourager les producteurs à adopter des pratiques agricoles plus diversifiées et de construire avec eux des stratégies de gestion des risques adaptées à leurs conditions (Ruf et al., 2015).

Il convient toutefois de distinguer deux types d'agroforesterie coexistant en Côte d'Ivoire. D'un côté, l'agroforesterie de reforestation vise à restaurer progressivement le couvert arboré par l'introduction d'arbres dans les cacaoyères existantes. De l'autre, l'agroforesterie de déforestation résulte de la conversion de forêts naturelles en plantations cacaoyères avec maintien partiel de certains arbres, ce qui appauvrit la biodiversité et dégrade les fonctions écologiques du milieu. Cette distinction est essentielle pour orienter les politiques publiques vers des modèles qui favorisent réellement la restauration forestière et la conservation (Zo-Bi et al., 2023b).

Les systèmes agroforestiers cacaoyers sont reconnus pour leur capacité à renforcer la résilience face au changement climatique et aux chocs économiques. Leur structure végétale diversifiée permet de créer un microclimat favorable, en réduisant les températures moyennes et en atténuant les extrêmes. Ces systèmes limitent l'évapotranspiration, améliorent la rétention d'eau et atténuent les effets négatifs liés à la sécheresse (Niether et al., 2020 ; Jacobi et al., 2014 ; Kohl et al., 2024). Cette configuration contribue à maintenir la productivité des cacaoyers malgré les perturbations climatiques (Vaast et al., 2014 ; FAO, 2022)

La baisse de fertilité des sols constitue l'un des facteurs majeurs de la diminution des rendements du cacao en Afrique (Kenfack Essougong et al., 2020), aux côtés des pathogènes et de l'ancienneté des cacaoyères. Les systèmes agroforestiers sont adoptés notamment pour leur

capacité à améliorer la fertilité des sols et à soutenir les fonctions agroécologiques à long terme (Wessel et al., 2015 ; Angoran, 2018)

Les arbres associés jouent un rôle écologique clé en favorisant une biodiversité fonctionnelle (Niether et al., 2020). Ils peuvent héberger des espèces auxiliaires qui participent à la régulation naturelle des bioagresseurs, réduisant ainsi la dépendance aux pesticides (Saj et al., 2013). La diversité des espèces permet aussi de supprimer les flambées d'insectes ravageurs, d'améliorer le microclimat et de renforcer la rétention en eau (Asigbaase et al., 2021; Vaast et al., 2014).

Outre leurs bénéfices écologiques, les systèmes agroforestiers présentent, lorsqu'ils sont bien gérés, des avantages socio-économiques. Ils permettent une plus grande stabilité des rendements, prolongent la durée de vie des plantations et assurent une diversification des sources de revenus. Bien que le rendement en cacao y soit généralement plus faible, le rendement total des parcelles agroforestières peut être jusqu'à dix fois supérieur à celui des monocultures, en raison de la valorisation de co-produits tels que les fruits, le bois, les plantes médicinales ou le fourrage. La diversité des espèces permet également d'étaler les récoltes sur l'année, de sécuriser les revenus et d'améliorer la sécurité alimentaire locale (Yao et al., 2021 ; Asigbaase et al., 2019 ; Niether et al., 2020 ; Angoran, 2018).

En Côte d'Ivoire, 95 % des producteurs interrogés valorisent les arbres d'ombrage pour leurs services écosystémiques et leurs co-produits, indépendamment de leur ethnie ou statut de certification (Smith Dumont et al., 2014).

1.3.2 Les stocks de carbone

Dans les systèmes cacaoyers, le carbone est stocké dans plusieurs compartiments : le sol, la biomasse aérienne (*Above Ground Biomass, AGB*), la litière, la biomasse souterraine (*Below Ground Biomasse, BGB*), les cabosses de cacao, les souches et le bois mort (Asigbaase et al., 2021). Parmi ces compartiments, les principaux contributeurs au stockage de carbone sont généralement la biomasse des arbres d'ombrage et le carbone organique du sol (Somarriba et al., 2013 ; Borden et al., 2019 ; Jacobi et al., 2014).

Les arbres d'ombrage jouent un rôle central dans le stockage du carbone au sein des systèmes agroforestiers cacaoyers. Selon Asigbaase et al. (2021), ils contribuent à hauteur de 70 % au stock de carbone de la végétation, incluant la biomasse aérienne et souterraine.

De manière plus générale, les systèmes agroforestiers cacaoyers peuvent contenir environ la moitié du stock de carbone aérien d'une forêt primaire. Au Brésil, Schroth et al. (2015) indiquent que les stocks moyens de carbone dans la biomasse aérienne des cacaoyères en agroforesterie atteignent jusqu'à 47,5 % de ceux des forêts primaires et Asase et al. (2016) au Ghana à 64 %. ($184,5 \pm 34,8$ contre $288,4 \pm 46,0$ Mg C ha⁻¹).

Au-delà du stockage dans leur biomasse, les arbres d'ombrage enrichissent les sols en carbone via le développement de leur système racinaire plus profond que celui des cacaoyers et l'apport de matière organique par la litière (Somarriba et al., 2013). Cette dynamique contribue également à améliorer la qualité des sols et à limiter leur érosion. Plusieurs études ont également souligné que le stock de carbone augmente avec l'âge de la plantation (Vervuurt et al., 2022), renforçant l'intérêt de pratiques agroforestières durables sur le long terme. Ces stocks de carbone confèrent à l'agroforesterie un fort potentiel pour compenser l'empreinte carbone du chocolat, sans nécessairement diminuer les niveaux de production (Becker et al., 2024).

Le carbone organique du sol (SOC) constitue également un réservoir majeur de carbone dans les systèmes agroforestiers cacaoyers. À l'échelle mondiale, les sols représentent le plus large réservoir de carbone terrestre (Rodrigues et al., 2023).

Les stocks de SOC dans les cacaoyères agroforestières de Côte d'Ivoire ont été estimés à 36,1 Mg C/ha, selon les résultats rapportés par Kouadio et al., (2024).

Toutefois, leur niveau dépend de nombreux facteurs, dont la profondeur du sol, le type de système de culture, l'âge de la plantation les apports de litière, le climat et la région (Asase et al., 2016 ; Asigbaase et al., 2021). La majorité du carbone organique du sol est stockée entre 0 et 30 cm de profondeur, là où se concentrent près de 80 % des racines latérales du cacaoyer (Wood et al., 2008 ; Mohammed et al., 2016).

1.3.3 L'agriculture biologique

L'agriculture biologique repose sur un système de production écologique qui règlemente l'usage d'intrants agrochimiques synthétiques, tels que les engrais, pesticides et herbicides chimiques. Cette approche vise à préserver la santé des sols, des écosystèmes et des producteurs et des consommateurs (Kashyapt et al., 2025).

Plusieurs études montrent que l'agriculture biologique permet d'augmenter significativement les stocks de carbone (Gattinger et al., 2012). Par exemple, au Ghana, la biomasse aérienne dans les exploitations biologiques atteint $41,3 \pm 3,62 \text{ Mg C ha}^{-1}$, contre $22,9 \pm 2,60 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en conventionnel. La biomasse racinaire et les stocks de carbone organique du sol (SOC) sont également supérieurs sous gestion biologique, avec respectivement $7,8 \pm 0,67 \text{ Mg C ha}^{-1}$ contre $4,2 \pm 0,66 \text{ Mg C ha}^{-1}$ et $59,7 \pm 3,36 \text{ Mg C ha}^{-1}$ contre $49,7 \pm 3,33 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Asigbaase et al., 2021). Ces résultats sont confirmés par Agbotui et al., (2023), qui indiquent un carbone total séquestré 30 % plus élevé en bio, dont un SOC supérieur de 27 %.

Au-delà du carbone, les fermes biologiques présentent aussi des teneurs plus élevées en nutriments essentiels tels que le phosphore, le manganèse et le cuivre, contribuant à une meilleure santé des sols ainsi qu'une augmentation du rendement des co-produits (Asigbaase et al., 2021). Les pratiques biologiques favorisent également l'utilisation de résidus de coupe, de composts — parfois issus des cabosses de cacao — et la plantation ou le maintien d'une plus grande diversité d'arbres d'ombrage (Joseph Bandanaa et al., 2021 ; Doungous et al., 2018 ; Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022).

Sur le plan énergétique, le cacao biologique nécessite entre 67 et 77 % moins d'énergie non renouvelable par kilogramme produit, réduisant la dépendance aux énergies fossiles et les émissions de gaz à effet de serre associé (Pérez-Neira et al., 2020). En termes de santé, l'agriculture biologique protège les agriculteurs des risques liés à l'usage des pesticides : au Ghana, une part importante des fermiers appliquant des produits chimiques le fait sans équipement de protection adéquat, avec des conséquences néfastes (Okoffo et al., 2016).

Enfin, l'agriculture biologique offre aux producteurs l'opportunité d'accéder à des certifications valorisantes, ouvrant des marchés de niche où les produits bénéficient de primes et d'appuis spécifiques. Ces certifications encouragent l'adoption de pratiques durables tout en améliorant les conditions de vie des petits exploitants. L'agriculture biologique est donc étroitement liée à l'agroforesterie, où elle apporte des bénéfices supplémentaires tant sur le plan écologique qu'économique (Jacobi et al., 2014 ; Krumbiegel et al., 2024).

Bien que les nombreux avantages de l'agriculture biologique suscitent un intérêt croissant, son adoption reste limitée par plusieurs facteurs, notamment le manque de connaissances techniques chez les producteurs et l'insuffisance de débouchés pour les produits certifiés biologiques (Obeng et al., 2025).

1.4 Les paiements pour service écosystémique

De nombreux petits producteurs de cacao dépendent exclusivement de cette culture pour subvenir à leurs besoins. Or, l'agriculture biologique et les systèmes agroforestiers, bien que parfois perçus comme moins productifs, peuvent représenter une opportunité économique grâce à la valorisation de leurs services environnementaux. En effet, l'agroforesterie est de plus en plus envisagée comme un levier pour aider la Côte d'Ivoire à respecter ses engagements de réduction des émissions de carbone (Vervuurt et al., 2022 ; Schroth et al., 2015).

Les paiements pour services écosystémiques (PSE) constituent un outil visant à rémunérer les producteurs pour les externalités positives générées par leurs pratiques agricoles. Ils reposent sur un transfert monétaire entre les bénéficiaires de services écologiques et les fournisseurs de ces services. Dans le contexte climatique, ces PSE prennent souvent la forme de crédits carbone (Awazi, 2025).

Un crédit carbone correspond à une tonne de CO₂ évitée ou séquestrée. Il peut être utilisé par les entreprises pour compenser leurs émissions de gaz à effet de serre en investissant dans des projets climatiques. Deux grands types de projets existent : les projets « réducteurs », qui évitent des émissions par rapport à un scénario de référence, et les projets « séquestrants », comme la reforestation. Il existe deux types de marchés du carbone : (i) le marché régulé (par exemple le Système d'Échange des Émissions de l'Union européenne) ; (ii) le marché volontaire (Voluntary Carbon Market, VCM), où le prix moyen était de 20 USD/tCO₂ pour les projets agroforestiers en 2024 (Awazi et al., 2025).

Dans les deux cas, la création de crédits carbone exige l'établissement d'un scénario de base, permettant de comparer la situation avec et sans le projet. Dans le secteur du cacao, cela suppose de quantifier les stocks de carbone dans différents types de parcelles (Awazi et al., 2025).

Le mécanisme REDD+, mis en place en 2008 par les Nations Unies, illustre ce type de démarche. Il vise à récompenser la déforestation évitée dans les pays en développement. Il s'inscrit dans une logique de soutien à des systèmes de production moins intensifs, tels que l'agroforesterie cacaoyère, qui combine maintien de la couverture forestière et production de cacao (Singh et al., 2023).

Les retombées financières peuvent être significatives. Selon Asigbaase et al. (2021), la valeur monétaire estimée du CO₂ stocké dans les systèmes biologiques varie de 74,58 à 208,07 US\$/ha/an, contre 39,08 à 99,60 US\$/ha/an dans les systèmes conventionnels. Ces estimations ont été calculées à partir d'un prix de 5 US\$ par tonne d'équivalent CO₂ (Hamrick et al., 2017). Ces incitations pourraient encourager les producteurs à conserver les arbres d'ombrage, à adopter des pratiques plus durables, et à s'engager dans des programmes de certification carbone.

1.4 Contexte et objectifs de l'étude

Ce travail de fin d'études a été réalisé au sein de la coopérative YEYASSO COOP-CA, implantée à Man, dans le district des Montagnes à l'ouest de la Côte d'Ivoire, plus précisément dans la région du Tonkpi. Cette coopérative regroupe 1315 planteurs de cacao répartis sur un territoire de 2150 hectares.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet collaboratif intitulé « *Production d'un cacao bio, équitable et neutre en carbone* », réunissant plusieurs partenaires : la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège), la chocolaterie indépendante Galler®, la coopérative YEYASSO COOP-CA ainsi que la Fondation Roi-Baudouin. Dans le cadre de ce projet, il est important de quantifier précisément le carbone stocké dans les parcelles de la coopérative. Une mesure des stocks de carbone en fonction des modes de culture permettra de disposer des données nécessaires à l'élaboration d'un scénario de référence, en vue d'une éventuelle accréditation carbone susceptible d'augmenter les revenus de la coopérative.

La question de recherche est la suivante :

La densité d'arbres d'ombrage et la gestion en bio des champs agroforestiers ont-elles un impact sur le carbone stocké dans les cacaoyères de la coopérative Yeyasso ?

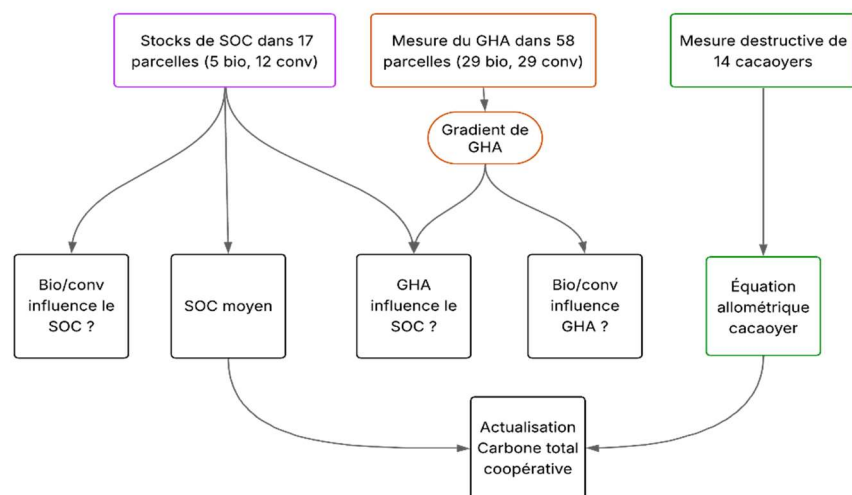
Cerny (2024) a déjà quantifié les biomasses aériennes des arbres d'ombrage dans 46 parcelles couvrant 70,42 ha. Pour avoir une estimation précise des stocks de carbone, il est nécessaire de compléter ce travail en :

- 1) Quantifiant les stocks de carbone organique du sol (SOC) ;
- 2) Estimant précisément la biomasse aérienne des cacaoyers à l'aide d'une équation allométrique adaptée au contexte local ;
- 3) Comparant les stocks de carbone totaux en fonction d'un gradient de densité d'arbres d'ombrage et du mode de culture (bio et non bio).

Une mission de terrain de trois mois a été réalisée entre le 9 février et le 7 mai 2025 par l'étudiante autrice de ce mémoire, Lara Devroye, afin de collecter les données nécessaires à l'analyse.

Une flow-chart (*Figure 2*) a été réalisée pour permettre au lecteur de bien situer les différentes étapes méthodologiques répondant à ces objectifs.

Figure 2 - Flow chart de la méthodologie



2. Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude

Cette étude a été menée dans la région du Tonkpi, à l'ouest de la Côte d'Ivoire, une zone accidentée située à proximité des frontières guinéenne et libérienne. Le site d'étude se concentre autour de la ville de Man, chef-lieu régional situé à environ 500 kilomètres d'Abidjan, dans le district des Montagnes. Cette région se distingue par un relief prononcé, notamment au nord de Man, où les altitudes dépassent les 1000 mètres, culminant à 1200 mètres au niveau du mont Tonkouï.

La ville de Man abrite le siège de la coopérative agricole YEYASSO COOP-CA, partenaire de cette recherche. Les cacaoyères investiguées se situent dans six villages affiliés à cette coopérative : Bogouine, Douele, Yapleu, Melapleu (Man), Gbombelo et Gan. Tandis que Bogouine, Douele et Yapleu se trouvent au sud de Man dans une zone plus plane, les autres villages sont implantés au nord, dans les zones montagneuses (Figure 3). Seulement 2% de la production de la coopérative est certifiée en agriculture biologique.

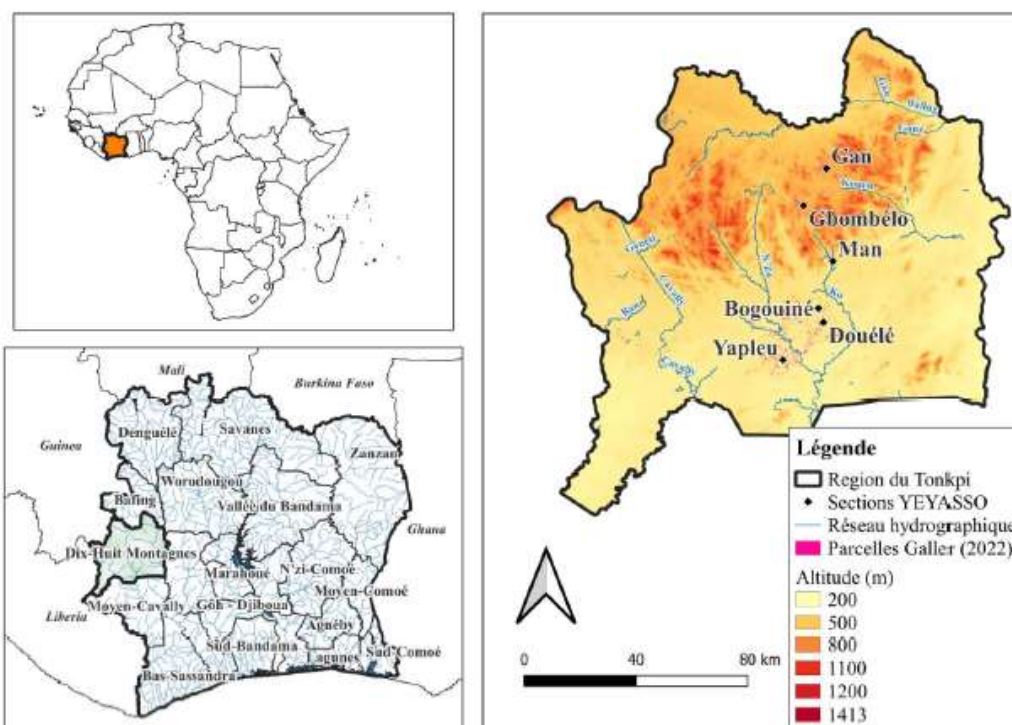


Figure 3 - Cartographie de la zone d'étude (Cerny et al., 2024)

Le climat régional est de type tropical humide, avec une longue saison des pluies de mars à octobre et une saison sèche de novembre à février. La pluviométrie annuelle varie entre 1569 mm et 1718,5 mm en moyenne sur la période 1930–2000 (Tiesse et al., 2017), tandis que l'humidité relative oscille entre 80 et 85 %. La température moyenne annuelle s'établit à 24,6°C (Konan et al., 2023). Cette zone constitue une interface écologique entre les domaines guinéo-congolais au sud et guinéo-soudaniens au nord. La végétation combine ainsi des fragments de forêts denses humides et une flore plus ouverte, typique de milieux savanicoles, remodelée par l'agriculture.

Les sols de la région montagneuse du Tonkpi appartiennent majoritairement à la classe des sols ferrallitiques, typiques des climats chauds et humides (Avenard, 1971).

2.2 Stock de carbone organique dans le sol

Pour quantifier le carbone organique présent dans le sol, la première étape a été la sélection des parcelles. Le budget de l'étude a limité l'échantillonnage à 17 parcelles. La sélection s'est basée sur deux critères, en lien avec les objectifs de l'étude : l'établissement d'un gradient de densité d'arbres d'ombrage et la comparaison entre agriculture biologique et conventionnelle. La section de Bogouiné, seule à disposer de parcelles certifiées biologiques, a été privilégiée.

Un travail de fin d'études réalisé en 2024 par Clément Cerny a permis la mise en place de parcelles permanentes au sein de la coopérative (Cerny, 2024). Les données existantes couvraient 13,65 hectares (11 champs) dans la section de Bogouiné, mais ne comprenaient aucune parcelle biologique.

Par ailleurs, notre travail de fin d'études a été conduit simultanément avec un autre projet portant sur l'évaluation de la biodiversité au sein des cacaoyères, réalisé par Lisa Hidoine. Afin d'optimiser l'organisation sur le terrain et de ménager les équipes, certaines étapes ont été réalisées en concertation, notamment l'échantillonnage destiné à la création du gradient de densité. En tenant compte de cette coordination et en accord avec les objectifs du projet de Lisa Hidoine, soixante parcelles ont été sélectionnées aléatoirement (29 conventionnelles, 29 biologiques) à l'aide de la fonction ALEA de Microsoft Excel (Microsoft 365, version 2504).

2.2.1 Établissement d'un gradient de densité d'arbres

2.2.1.1 Mesures de terrain

Pour quantifier la densité d'arbres d'ombrage, exprimée en surface terrière (GHA), le diamètre des arbres présents dans les 58 parcelles a été mesurée selon le protocole établi lors de la mise en place des parcelles permanentes (Cerny, 2024), afin d'assurer une cohérence entre les données.

Le recensement des arbres d'ombrage s'est basé sur un seuil minimum de diamètre de 10 cm, mesurée à 1,30 m du sol.

Les mesures ont été prises au millimètre près à l'aide d'un mètre-ruban forestier, avec des ajustements méthodologiques en cas de déformations du tronc ou de fourches. Les aspérités susceptibles de fausser les mesures (épines, lianes) ont été retirées à l'aide d'une machette.

Le travail de terrain a été mené en trinôme : un membre mesurait le diamètre, un autre marquait les arbres à l'aide d'un marqueur tout en se repérant sur le terrain pour s'assurer qu'aucun arbre ne soit oublié, et le troisième consignait les données.

Les superficies des parcelles ont été obtenues via la base de données de la coopérative. Les producteurs relais ont obtenu ces superficies à l'aide de la fonction *Area Calculation* des GPS Garmin à leur disposition. Au total, 3 092 arbres ont été mesurés dans 60 parcelles sur une période de quatre semaines.

2.2.1.2 Calcul des surfaces terrières et choix des parcelles.

Une fois les mesures de terrain effectuées, la surface terrière a été calculée à partir de l'équation suivante :

$$GHA = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi * di^2}{4} \right)}{A}$$

Équation 1 - Surface terrière à partir des diamètres

Où d_i représente le diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre i [m] et A la surface totale [ha]

Les nouvelles données de surface terrière ont été intégrées aux données existantes issues des sections de Bogouiné, Douélé et Yapleu, les seules situées en dehors de la zone montagneuse. Cette consolidation a permis l'établissement d'un gradient de densité d'arbres d'ombrage, sur la base duquel 12 parcelles en agriculture conventionnelle ont été sélectionnées et 5 parcelles biologiques, choisies pour leur proximité en termes de surface terrière.

2.2.3 Prélèvement des échantillons de sol

Après la sélection des parcelles selon leur surface terrière (GHA) et leur mode de culture, leurs localisation s'est appuyée sur les cartes fournies par la coopérative. Trois points aléatoires (Besar et al., 2020) ont été générés par parcelle à l'aide du logiciel QGIS (QGIS 3.22.11), puis localisés sur le terrain à l'aide d'un GPS (Garmin GPSMAP 66S). Certains points ont été légèrement déplacés de quelques mètres, pour éviter des obstacles tels que fossés, ravins, termitières ou arbres de grand diamètre. À chaque point, une fosse d'au moins 30 cm de profondeur a été creusée. Dans chaque fosse, 9 échantillons ont été prélevés à l'aide d'un cylindre de 100 cm³ (Besar et al., 2020), à trois profondeurs : 0–10 cm, 10–20 cm et 20–30 cm (Tito et al., n.d.). Pour chaque profondeur, trois prélèvements ont été effectués côte à côte (x, y et z), comme présentés sur la figure 4. Avec trois fosses par parcelle et 17 parcelles au total, cela représente 459 échantillons individuels (3 fosses × 3 profondeurs × 3 réplicats × 17 champs).



Figure 4 - Photographie schématique d'une fosse d'échantillonnage

Chaque prélèvement a été effectué en enfonçant le cylindre dans le sol à l'aide d'un marteau, puis en retirant l'excédent de terre pour obtenir un volume standardisé. L'ensemble (terre + cylindre) a été pesé sur une balance avec une précision de 0,1 g, puis l'échantillon a été transféré dans un sachet de types « zip loc » et pesé. Le cylindre vide a également été pesé séparément à chaque mesure.

Les échantillons ont ensuite été séchés au soleil pendant une semaine, sous surveillance pour éviter toute contamination. Après séchage, chaque échantillon a été de nouveau pesé pour déterminer la masse sèche, puis broyé manuellement à l'aide d'un pilon et tamisé à 2 mm (Asigbaase, Lomax, et al., 2021). La masse de la fraction fine (<2 mm) et de la fraction grossière (>2 mm) a été pesée pour chaque échantillon.

En raison de contraintes budgétaires, l'envoi des 459 échantillons individuels au laboratoire n'était pas envisageable. Pour chaque fosse et chaque profondeur, un échantillon composite équimasse a donc été constitué en prélevant 5 g de chacun des trois réplicats (X, Y et Z), soit 15 g par profondeur et par fosse. Afin de sécuriser l'analyse, trois copies de chaque composite ont été préparées (Gama-Rodrigues et al., 2010). Ces échantillons composites ont ensuite été envoyés au Centre provincial de l'agriculture et de ruralité, situé à La Hulpe (Belgique), pour analyse.

2.2.4 Analyse statistique

Les échantillons ont été analysés selon la méthode de combustion sèche (Carter et al., 2008) pour quantifier la concentration en carbone organique du sol exprimée en g/kg. Le volume des fractions >2 mm a été estimé en divisant leur masse par une densité moyenne de 2,75 g/cm³, valeur représentative des roches locales (granites à hypersthène : 2,65-2,75 g/cm³ et amphibolites : 2,9-3,1 g/cm³) (Deguide et al., 2023).

La densité apparente brute a été calculée en divisant la masse sèche avant tamisage par le volume du cylindre (100 cm³), tandis que la densité apparente fine utilisait la masse sèche après tamisage. Les stocks de carbone organique (SOC stock kg/m²) ont été calculés selon l'équation 2 (Meersmans et al., 2012) où D représente l'épaisseur de couche (m) ici toujours égale à 0.1m, RF le volume occupé par la fraction grossière (> 2mm) rapportés au volume total (%), SOC le pourcentage de carbone organique et φ_s la densité apparente de la fraction fine (<2mm) (kg/m³).

$$SOC_{Stock} = \frac{SOC}{100} D \left(\frac{1 - RF}{100} \right) \varphi_s$$

Équation 2 - Stocks de carbone organique du sol (Meersmans et al., 2012)

Après avoir calculé les stocks de SOC pour chaque combinaison de champ-fosse-profondeur et réplicat, plusieurs étapes d'agrégation ont été réalisées. Les stocks de SOC ont d'abord été moyennés par profondeur, puis sommés par fosse (somme des trois profondeurs), et finalement moyennés par champ (moyenne des trois fosses par champ) pour obtenir le stock de SOC représentatif de chaque parcelle.

L'analyse statistique a évalué la variation intraparcellaire à l'aide de coefficients de variation et de tests non paramétriques de Kruskal-Wallis (homogénéité des réplicats, évolution selon la profondeur ainsi que la variabilité spatiale entre fosses). L'effet du mode de culture (biologique vs conventionnel) a été testé par un test de Mann-Whitney, complété par des statistiques descriptives. Enfin, l'influence de la densité d'arbres d'ombrage (GHA) sur les stocks de carbone organique a été analysée par régression linéaire, après transformation logarithmique.

2.3 Biomasse des cacaoyers

2.3.1 Sélection des cacaoyers

L'estimation de la biomasse aérienne des cacaoyers a été réalisée par échantillonnage destructif selon la méthode décrite par Morán-Villa et al. (2024).

Quatorze cacaoyers ont été sélectionnés dans quatre sections de la coopérative (Bogouiné n=1, Yapeu n=6, Gan n=4, Douélé n=3) durant la période d'éclaircie (avril). La sélection s'est effectuée en concertation avec les producteurs relais et les producteurs.

Les arbres ont été sélectionnés suivant un gradient de diamètre à 30 cm du sol, allant de 4 à 29 cm, correspondant à des âges compris entre 5 et 45 ans, afin d'assurer une bonne représentativité. Pour chaque individu, les coordonnées GPS ont été relevées et les données suivantes ont été collectées: identité du producteur, superficie parcellaire, âge de la plantation et âge estimé du cacaoyer. L'âge de chaque arbre a été déterminé par déclaration du producteur.

2.3.2 Mesures destructives

Les méthodes se sont basées sur celles de Fomekong Tane et al. (2024), Morán-Villa et al., (2024) et Donkor et al. (2023).

Avant l'abattage, la hauteur totale des arbres a été mesurée à l'aide d'un clinomètre. Les diamètres à 30 cm et à 1,30 m du sol ont été relevés à l'aide d'un mètre ruban. Le diamètre du houppier a été estimé à l'aide d'un décamètre, en mesurant deux axes perpendiculaires, dont la moyenne a ensuite été calculée afin d'obtenir le diamètre moyen du houppier.

Chaque arbre a été abattu le plus près possible du sol, et sa chute a été dirigée sur des bâches propres pour éviter toute contamination avec les éléments présents sur le sol. L'équipe comprenait deux scieurs, un responsable des mesures et des aides pour la collecte. Immédiatement après l'abattage, les mesures suivantes ont été prises : longueur totale de l'arbre, longueur du fût, ainsi que les dimensions de la souche (hauteur, circonférence, deux diamètres perpendiculaires).

Le tronc a été débité en rondins de 5 cm d'épaisseur. Chaque rondin numéroté a été pesé individuellement (peson ou balance selon la masse), et ses dimensions mesurées (hauteur, circonférences initiale et finale, deux diamètres perpendiculaires sur chaque face). Cinq rondins par arbre, répartis régulièrement le long du fût depuis la base jusqu'au sommet, ont été conservés comme échantillons pour le séchage.

Les feuilles ont été intégralement récoltées, pesées, et cinq échantillons de 15 à 30 g prélevés pour la détermination de la masse fraîche. Les branches ont été triées selon leur diamètre (≥ 5 cm et < 5 cm), regroupées en fagots et pesées séparément. Cinq échantillons ont été prélevés aléatoirement pour chaque catégorie.

L'ensemble des échantillons (rondins, feuilles, branches) a été séché au soleil pendant au moins une semaine. Une masse mi-sèche a été déterminée avant le transport vers la Belgique. Un échantillon par composante et par arbre a été conservé pour limiter le volume de transport.

2.3.3 Analyse des données

2.3.3.1 Mesure des masses sèches

Les échantillons ont été séchés à 105°C en étuve jusqu'à masse constante (Donkor et al., 2023b). La masse sèche a été déterminée à l'aide d'une balance analytique, en parallèle avec la balance utilisée sur le terrain afin de vérifier la précision des mesures. Aucune différence significative n'a été constatée entre les deux instruments.

Chaque échantillon a été pesé avant mise au four, puis à plusieurs reprises pendant le séchage. Ces mesures répétées ont permis de construire des courbes d'évolution du taux d'humidité en fonction du temps (Figure 5), garantissant l'atteinte d'un séchage complet.

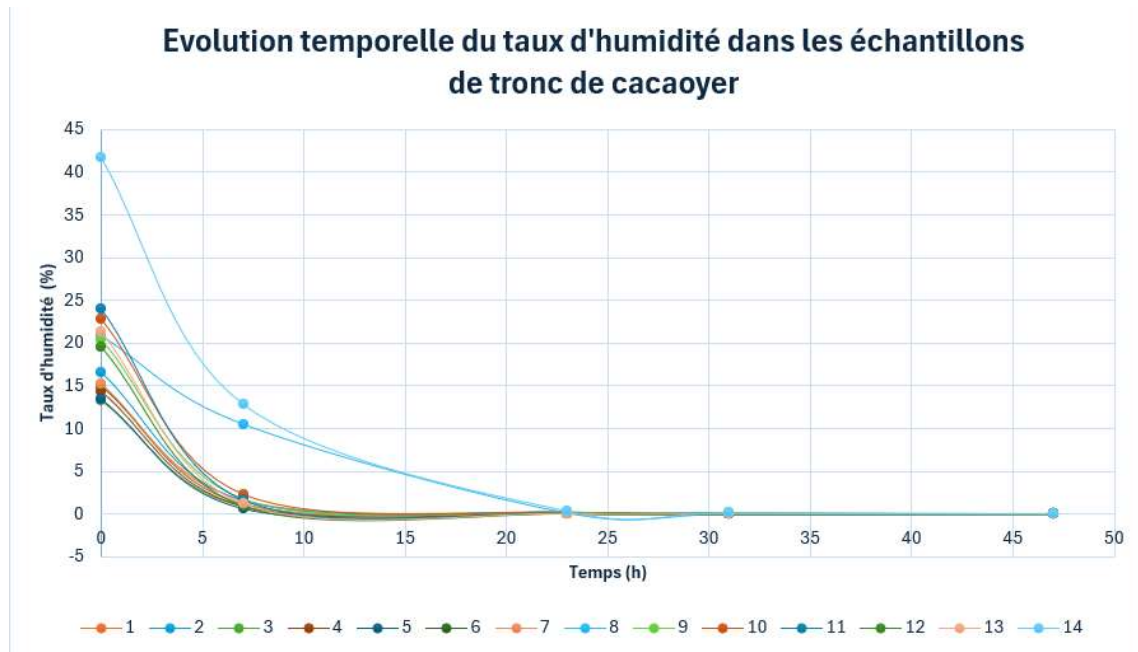


Figure 5 - Évolution temporelle du taux d'humidité dans les échantillons de tronc

2.3.3.2 Détermination de la biomasse

La masse sèche de chaque compartiment a été calculée selon Donkor et al. (2023).

$$M_{TD} = CC * M_{TF} \quad \text{où} \quad CC = \text{moyenne} \left(\frac{M_{FT}}{M_{FS}} \right)$$

Équation 3 - Coefficient de conversion de masse fraîche - masse sèche

Où M_{TD} représente la masse sèche de l'organe, M_{TF} la masse fraîche totale mesurée sur le terrain et CC le coefficient de conversion moyen de chaque organe. Ce coefficient est obtenu en calculant la moyenne des rapports entre la masse sèche et la masse fraîche des différents échantillons.

La biomasse totale de chaque arbre correspond à la somme des masses sèches de tous les compartiments.

La densité du bois a été calculée en divisant la masse sèche par le volume vert de chaque échantillon, déterminé par la formule du tronc de cône. Les densités obtenues sont de 0,33 à 0,40 g/cm³.

Le taux de carbone de 42,6% a été retenu d'après les résultats de Morán-Villa et al. (2024). La conversion en équivalent CO₂ a été effectuée avec un facteur stœchiométrique de 3,67 Petersson et al. (2012).

2.3.3.3 Établissement de l'équation allométrique

Afin de permettre la conversion des diamètres des cacaoyers en biomasse, une équation allométrique a été construite. Pour cela, une régression a été effectuée pour décrire la relation entre l'AGB (Biomasse aérienne) et : le diamètre à 30 cm (D_{30}), le diamètre à 1,3m (dbh, cm), la hauteur totale (H, m), le diamètre du houppier (dia_houp, cm), l'aire du houppier (aire, cm²) et la densité du bois (densite, g/cm³) (Donkor et al., 2023; Morán-Villa et al., 2024)

Une matrice de corrélation a permis de sélectionner les paramètres à tester. La densité ne présentait pas de corrélation significative avec l'AGB et a donc été écartée de l'analyse (Tableau 1). Le diamètre à 30 cm (D_{30}) présentait une corrélation plus forte avec l'AGB que le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et, étant également la variable mesurée sur le terrain, il a été privilégié pour la construction des modèles.

Tableau 1 - Corrélation entre les différentes variables et la biomasse aérienne

Variable	Coefficient de corrélation avec AGB
D_{30}	0.970
DBH	0.933
Aire	0.909
Dia_houp	0.877
H	0.821
Densité	-0.110

L'exploration graphique des données a révélé une relation non-linéaire entre l'AGB et le diamètre à 30 cm. Cependant, avec seulement 14 pieds de cacaoyers, cette relation n'était pas clairement définie sur les graphiques, et des modèles linéaires ont également été explorés, avec transformation logarithmique pour respecter les conditions de normalité (disponibles en Annexe 1). Cependant, ces derniers présentaient des coefficients de détermination (R^2) beaucoup plus faibles et n'ont pas été retenus ici.

Des modèles non-linéaires sous la forme générale $AGB = a * x_1^b * x_2^c * x_3^d$ ont été testés, combinant différentes variables dendrométriques (D_{30} , hauteur (H), diamètre houppier (Dh), aire houppier(Ah)) (Tableau 2) ainsi que des modèle plus complexe. Bien que D_{30} ait été privilégié des modèles incluant le DBH ont également été testés.

Tableau 2 - Équations allométriques proposées pour la modélisation de la biomasse aérienne des cacaoyers

M1 :	$AGB = a * D_{30}^b$
M2 :	$AGB = a * D_{30}^b * H^c$
M3 :	$AGB = a * D_{30}^b * Dh^c$
M4 :	$AGB = a * D_{30}^b * Ah^c$
M5 :	$AGB = a * D_{30}^b * H^c * Dh^d$
M6 :	$AGB = a * D_{30}^b * H^c * Ah^d$
M7 :	$AGB = a + b * D_{30}^c$
M8 :	$AGB = a * e^{(b * D_{30}^c)}$
M9 :	$AGB = a * e^{(b * D_{30}^c + c * H)}$
M 10:	$AGB = a * (D_{30}^c * H)^b$
M11:	$AGB = a * DBH^b$
M12 :	$AGB = a * DBH^b * H^c$

L'ajustement des modèles a été réalisé sur Rstudio avec la fonction `nls()` du package 'base' version 4.1.2.

Pour chacun des modèles testés, les hypothèses de normalité des résidus et d'homoscédasticité ont été vérifiées, respectivement à l'aide des tests de Shapiro-Wilk (`shapiro.test()`) et de corrélation de Spearman entre résidus absolus et valeurs prédites (`cor.test()`). Cette approche alternative a été utilisée car le test de Breusch-Pagan classique n'est pas directement applicable aux objets issus de `nls()`. Les différents modèles ont été comparés sur la base des critères de performance statistiques suivants : le R^2 pseudo, calculé comme $1 - (\text{somme des carrés des résidus} / \text{somme des carrés totale})$ et analogue au R^2 classique mais adapté aux modèles non-linéaires ; les critères d'information d'Akaike (AIC) et de Bayes (BIC) ; et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

L'influence de l'arbre présentant un D_{30} de 29 cm, potentiellement aberrant, a été testée en l'excluant de l'analyse pour les modèles linéaires et non linéaires (Annexe 2 et Annexe 3). Cette exclusion génère des modèles présentant des performances statistiques nettement inférieures (R^2 , AIC, BIC). L'inclusion de cet individu étend le domaine de validité du modèle à l'ensemble de la gamme de diamètres observée (4 à 29 cm de D_{30}), contrairement au modèle restreint, limité aux jeunes arbres de petits diamètres.

2.4 Détermination des stocks de carbone dans la biomasse

2.4.1 Détermination de la biomasse totale des arbres d'ombrages

La biomasse totale des arbres d'ombrage est la somme de la biomasse aérienne reprenant le tronc et le houppier de chaque arbre et de la biomasse souterraine correspondant au système racinaire. Les espèces n'ayant pas été identifiées lors de nos, seules les parcelles permanentes de Cerny (2024) ont été prises en compte pour l'estimation de la biomasse des arbres d'ombrage. Dans ces parcelles, la hauteur, le diamètre et l'espèce des arbres étant connus, il a été possible d'appliquer la formule proposée par Chave et al. (2014) pour le calcul de la biomasse aérienne, où ρ représente la densité du bois (g/cm^3), D le diamètre à 1,30 m du sol, et h la hauteur totale de l'arbre.

$$AGB = 0.0673 * (de * D^2 * H)^{0.976}$$

Équation 4 - AGB des arbres d'ombrages, Chave et al. (2014)

Pour l'AGB des palmiers présents sur les parcelles permanentes, l'équation allométrique suivante a été appliquée (Mignolet et al., 2020) :

$$ABG = e^{(-2.3352 + 0.83352 \times \ln(D^2 \times H))}$$

Équation 5 - AGB des palmiers, Mignolet et al. (2020)

où D correspond au diamètre à 1,30 m (cm) et H à la hauteur totale (m)

La BGB des arbres d'ombrage et des palmiers a été obtenue en multipliant l'AGB par un facteur de 0,2 (Mokany et al., 2006).

Les valeurs de biomasse obtenues ont été converties en stock de carbone en appliquant un facteur de 0,5, correspondant à la proportion conventionnelle de carbone dans la biomasse ligneuse (Eggleston et al., 2006), puis en équivalent CO_2 en multipliant par 3.67.

$$C = 0,5 \times \text{Biomasse totale} \qquad \text{CO}_2 = 3,67 \times C$$

Équation 6 - Stock de carbone et équivalent CO₂

Les valeurs de AGB, BGB et de la biomasse totale, ainsi que les estimations de carbone et de CO₂, ont été calculées individuellement pour chaque arbre à l'aide d'Excel. Par la suite, ces données ont été regroupées par champ afin de déterminer les stocks de carbone rapportés à la surface (Cerny, 2024).

2.4.2 Détermination de la biomasse totale

En plus du carbone stocké dans les arbres d'ombrage, le carbone contenu dans les cacaoyers a été estimé à l'aide de l'équation allométrique développée spécifiquement pour les cacaoyers de la zone d'étude. Cette équation a permis de calculer la biomasse aérienne (AGB), tandis que la biomasse racinaire (BGB) a été estimée en appliquant un facteur de 0,23 à l'AGB, ratio établi localement par Borden et al. (2019). La teneur en carbone des tissus des cacaoyers a été fixée à 42,6 % (Morán-Villa et al., 2024). Le carbone total présent dans la biomasse a été calculé en additionnant le carbone stocké dans la biomasse des arbres d'ombrage et celui contenu dans la biomasse des cacaoyers. Le carbone total de l'écosystème étudié a ensuite été obtenu en additionnant le carbone organique du sol (0–30 cm) et le carbone de la biomasse.

2.5 Utilisation d'outils informatiques

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R (version 4.1.2) et Microsoft Excel (Microsoft 365, version 2504). La gestion et la représentation spatiale des données ont été réalisées avec QGIS (QGIS 3.22.11). La rédaction du document a été menée sous Microsoft Word (version 2506) et la création de schémas via Lucidchart. La bibliographie a été réalisée avec l'aide de Zotero (version 6.0.36).

Des outils d'intelligence artificielle ont également été utilisés : ChatGPT, (August 2025, GPT-5, OpenAI) et Claude (August 2025, 3.5 Sonnet Anthropic) pour la correction orthographique et syntaxique ainsi que pour l'assistance à la rédaction de scripts R mais également la traduction de documents (notamment ceux en espagnol ou indonésien). La recherche bibliographique a été réalisée principalement avec Google Scholar, complétée par SciSpace (Literature Review) et l'IA de l'Université de Liège.

3. Résultats

3.1 Stock de carbone organique du sol

3.1.1 Variation intra parcellaires

Afin de quantifier la variation de différentes variables à différentes échelles spatiales intra-parcellaires, plusieurs statistiques ont été réalisées. Trois échelles spatiales ont été considérées : (i) les répétitions (x, y et z), (ii) la profondeur, et (iii) les fosses. Trois variables ont été analysées : les stocks de carbone organique du sol (SOC), la densité apparente et la teneur en carbone organique.

À l'échelle des répétitions, seules la densité apparente et les stocks de SOC ont pu être étudiés, car les échantillons composites réalisés avant analyse en laboratoire donnaient une teneur en carbone identique pour les répétitions x, y et z.

Pour quantifier la variabilité des différentes variables aux différentes échelles, la moyenne et l'écart-type des coefficients de variation (CV) ont été calculés. Par exemple, pour chaque combinaison champ–fosse–profondeur, un CV a été déterminé à partir des trois valeurs de stock de SOC obtenues pour chaque répétition (x, y et z). Les CV ainsi calculés ont ensuite été moyennés pour obtenir une valeur représentative de la variabilité à cette échelle. Cette opération a été répétée pour chaque échelle spatiale (répétitions, profondeur, fosse) et pour chacune des trois variables étudiées. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 - Analyse de la variabilité spatiale intra-parcellaire : moyenne et écart-type des coefficients de variation (%) par échelle spatiale et par variable, résultats des tests de Kruskal-Wallis

Echelles spatiale	Variable	Moyenne et écart type des coefficients de variation (%)	P- valeur (Kruskal-Wallis)
Répétition (x, y et z)	Stock Soc (t/ha)	14,7 ± 17,2	0.894
	Densité apparente (kg/m ³)	14,7 ± 17,1	0.637
Profondeur	Stock Soc (t/ha)	39.4 ± 19.4	2.2e-16 ***
	Densité apparente (kg/m ³)	17.9 ± 15.4	0.004828 **
	Teneur en carbone organique (%)	28.7 ± 10.9	2.2e-16 ***
Fosses	Stock Soc (t/ha)	22,4 ± 16,6	0.0018**
	Densité apparente (kg/m ³)	18,5 ± 13,8	0.094
	Teneur en carbone organique (%)	15,9 ± 9,6	0.027*

La variabilité entre répétitions x, y et z (réplicats techniques) est faible, généralement comprise entre 10 et 15 %, indiquant une bonne stabilité des mesures. Le test de Kruskal-Wallis montre des p-valeurs non significatives (ns), confirmant l'absence de différences significatives entre répétitions.

À l'échelle « profondeur », la variabilité des stocks de SOC est la plus élevée (39 %), principalement due à une forte variabilité de la teneur en carbone organique, et dans une moindre mesure à la densité apparente. Les différences entre profondeurs sont hautement significatives

pour les stocks de SOC et la teneur en carbone ($p < 0,001$), et très significatives pour la densité apparente ($p < 0,01$).

À l'échelle « fosse », la variabilité des stocks de SOC est de 22 %, avec un CV plus élevé pour la densité apparente que pour la teneur en carbone. Les stocks de SOC présentent une différence hautement significative entre fosses ($p < 0,01$), la teneur en carbone une différence significative ($p < 0,05$), tandis que la densité apparente n'est pas significativement différente (ns).

Variabilité entre les 3 profondeurs

Le tableau 4 représente la moyenne, l'écart type ainsi que le coefficient de variation pour les stocks de SOC, le teneur en carbone organique et la densité apparente par profondeur. On remarque que les stocks de SOC diminuent avec la profondeur (figure 7). La variation du SOC est plus élevée à la profondeur de 10-20 cm. La densité apparente diminue également avec la profondeur, mais la variation est la plus élevée à 20-30 cm. Le teneur en carbone organique diminue également avec la profondeur, avec un coefficient de variation plus élevé entre 10-20cm.

Tableau 4 - Moyennes, écarts-types et coefficients de variation des stocks de SOC, densité apparente et teneur en carbone organique selon la profondeur

Profondeur	Stock Soc (T/ha)		Densité apparente (kg/m ³)		Teneur en carbone organique (%)	
	Moyenne et écart-type	Coefficient de variation (%)	Moyenne et écart-type	Coefficient de variation (%)	Moyenne et écart-type	Coefficient de variation (%)
0-10 cm	13.8 ± 3.51	25.3	1196 ± 202	18.4	11.8 ± 3.07	26.0
10-20 cm	9.86 ± 5.18	52.6	1087 ± 327	30.1	9.28 ± 4.47	48.1
20-30 cm	6.98 ± 2.96	42.5	1023 ± 370	36.2	6.91 ± 1.91	27.6

La variabilité est assez semblable entre les trois profondeurs. Le stock maximal de SOC à 0-10 cm est de 23,6 tonnes/ha. On remarque deux valeurs aberrantes à 10-20 cm, dont un stock maximal de SOC de 36,6 tonnes/ha. La valeur minimale se retrouve à la profondeur de 20-30 cm avec un stock de SOC de 1,77 tonnes/ha.

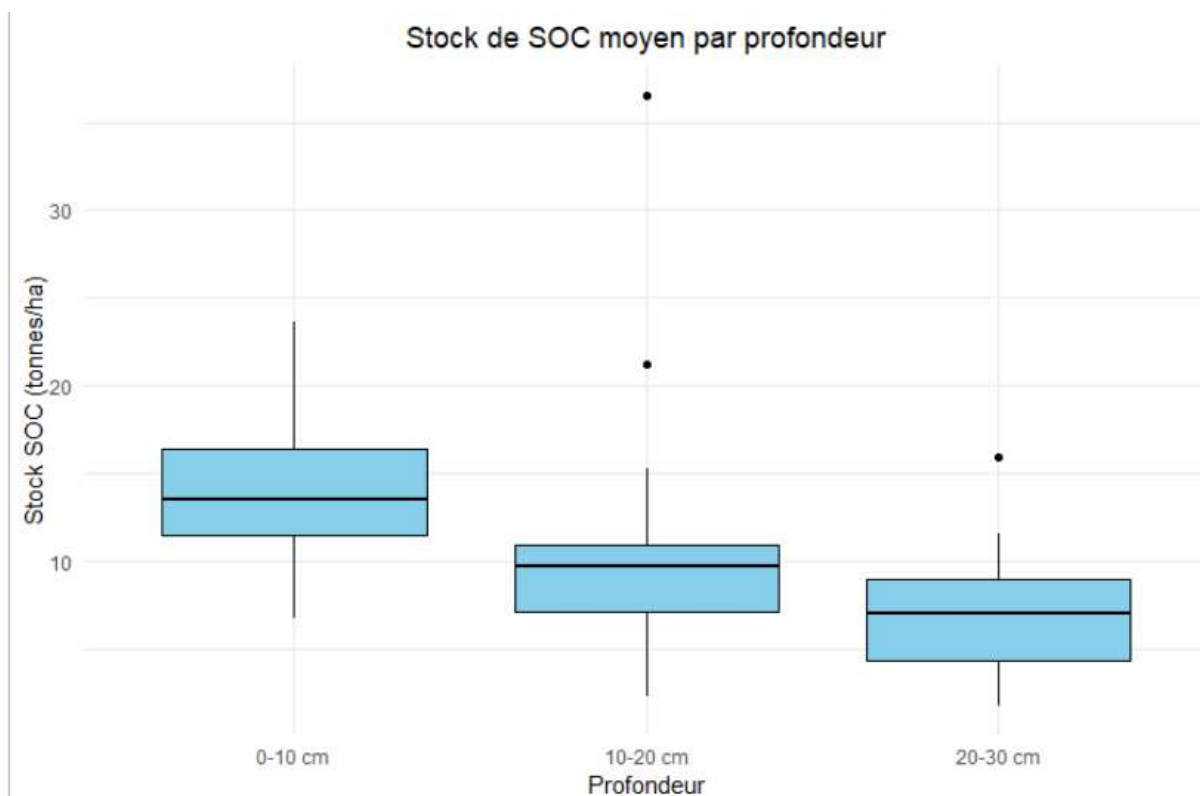


Figure 6 - Boîte à moustache du stock de SOC moyen (t/ha) par profondeur

3.1.2 Variation inter-parcellaires

3.1.2.1 Présentation des résultats

Les stocks de carbone ont été mesurés dans 17 champs, dont 5 biologiques (en jaune) et 12 conventionnels (en rouge), représentés sur la carte (Figure 7).

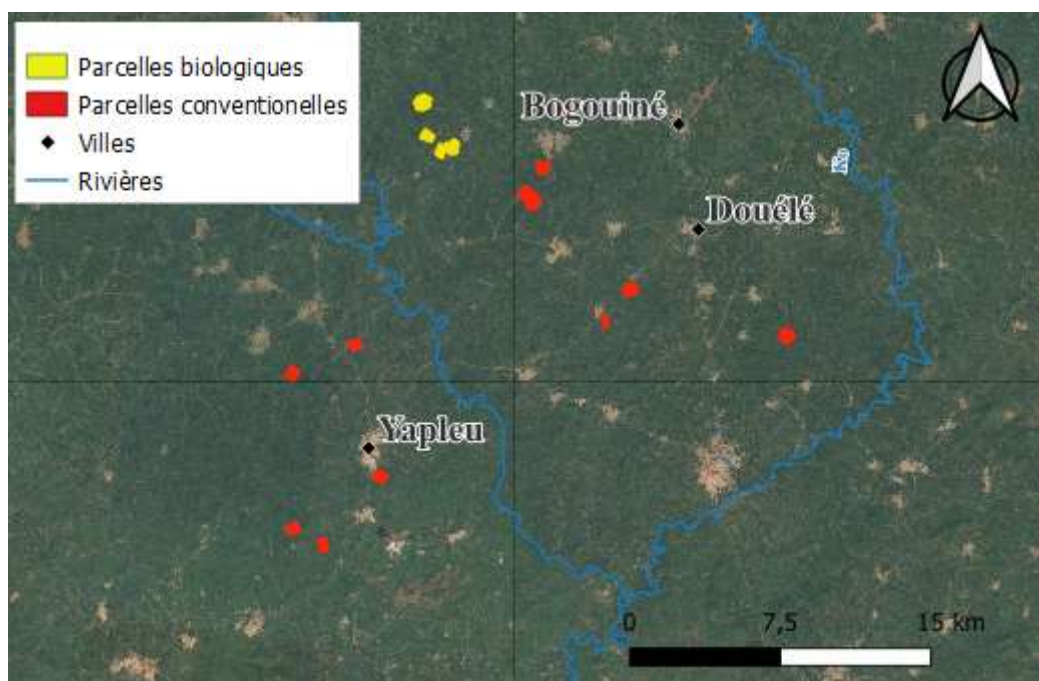


Figure 7 - Localisation des parcelles biologiques (jaune) et conventionnelles (rouge) affichées sur fond Google Satellite

L'indice de Moran a été calculé afin d'évaluer l'autocorrélation spatiale des stocks SOC en fonction de la position des parcelles. Les résultats, présentés en Annexe 4, montrent des indices proches de zéro et non significatif pour toutes les profondeurs indiquant une absence d'autocorrélation spatiale significative et une distribution aléatoire des stocks de SOC.

En moyennant les stocks de SOC des trois fosses par champ, on obtient, pour la couche 0-30 cm, un stock maximal de 46,30 t/ha, un stock minimal de 18,20 t/ha, et une moyenne de **30,70 ± 7,36 t/ha**. Le coefficient de variation de 24 % témoigne d'une variabilité modérée entre les champs. La teneur maximale en carbone organique est de 13,41 %, la teneur minimale de 5,38 % avec une moyenne de 9,33 ± 2,26 %, tandis que la densité apparente varie entre 792,30 et 1435,89 kg/m³ avec une moyenne de 1102,08 ± 204,67 kg/m³. Une régression linéaire a été réalisée entre la densité apparente et la teneur en carbone organique (Annexe 5). Les résultats montrent que la densité apparente diminue lorsque la teneur en carbone organique augmente.

3.1.2.2 Influence du mode de culture

Le tableau 5 présente les stocks de carbone organique du sol à différentes profondeurs selon le mode de culture. Les stocks de carbone organique du sol présentent des profils similaires entre les deux modes de culture, avec une diminution progressive des stocks en profondeur. La couche superficielle (0-10 cm) concentre la plus forte proportion du carbone total (45,7% en biologique, 44,9% en conventionnel), suivie des couches 10-20 cm (32,4% et 32,8% respectivement) et 20-30 cm (21,9% et 23,1% respectivement).

Les comparaisons entre modes révèlent des tendances contrastées selon la profondeur. Le système biologique présente des stocks légèrement supérieurs en surface et dans la couche intermédiaire. En revanche, la couche profonde montre des stocks légèrement plus élevés en système conventionnel. Ces différences restent toutefois mineures et le stock total demeure comparable entre les deux systèmes. Les coefficients des variations sont plus élevés en conventionnel, dû en partie à plus grand nombre de données (n=12).

Tableau 5 - Statistiques descriptives des stocks de SOC (t C/ha) par profondeur en systèmes biologiques et conventionnels

Profondeur Stock SOC	Stat	Unités	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-30 cm
Bio (n=5)	Moyenne écart-type	Tonnes /ha	14,16 ± 1,09	10,03 ± 2,41	6,81 ± 2,31	31 ± 4,99
	Min-Max	Tonnes /ha	13,06– 15,90	6,4 – 12,57	4,28 – 9,32	24,29 – 36,72
	CV %	%	7,7	24,02	33,98	16,09
Conv (n=12)	Moyenne écart-type	Tonnes /ha	13,7 ± 3,07	9,78 ± 4,75	7,05 ± 2,34	30,53 ± 8,35
	Min-Max	Tonnes /ha	9,77 – 19,68	4,76 – 20,3	3,1 – 9,29	18,16 – 46,28
	CV %	%	22,4	39,66	33,14	27,34

Les comparaisons statistiques ont été réalisées après vérification des hypothèses de normalité (Shapiro-Wilk) et d'homogénéité des variances (test F de Fisher). Les conditions de normalité n'étant pas respectées, un test non-paramétrique de Mann-Whitney-Wilcoxon a été appliqué.

L'analyse statistique ne révèle **aucune différence significative** entre les deux systèmes de culture, et ce quelle que soit la profondeur considérée. Les p-valeurs obtenues (0,075, 0,51, 0,87 et 0,90 pour les différentes profondeurs) sont toutes supérieures au seuil de significativité de 0.05.

3.1.2.3 Influence d'un gradient de surface terrière

Pour quantifier précisément la relation entre le gradient de surface terrière et les stocks de carbone organique du sol, une analyse de corrélation de Spearman suivie d'une régression linéaire ont été réalisées à différentes profondeurs. Une analyse par classe a également été réalisée et est disponible en Annexe 6.

Le tableau 6 présente les tests de corrélation de Spearman (test non paramétrique). Ils montrent qu'il n'y a aucune corrélation entre les stocks de SOC et le gradient de surface terrière pour toutes les profondeurs.

Tableau 6 - Coefficients de corrélation et p-valeurs des corrélations de Spearman entre les stocks de SOC et la surface terrière selon la profondeur

	SOC_stock_0_10	SOC_stock_10_20	SOC_stock_20_30	SOC_stock_0_30
Coefficient de Corrélation	0.189	0.031	0.248	0.208
P valeur	p=0.47	p=0.91	p=0.34	p=0.42

La figure 8 représente l'évolution des stocks de SOC à différentes profondeurs selon un gradient de densité d'arbres d'ombrage analysée par régression linéaire simple. Toutes les variables ont subi une transformation logarithmique (ln) afin de normaliser leur distribution, l'hétéroscédasticité de la variance étant acceptable sans correction supplémentaire. Les triangles représentent les parcelles en agriculture conventionnelles et les ronds les parcelles en agriculture biologiques. Les résultats montrent que les stocks de carbone sont plus faibles en profondeur (20-30 cm) et augmentent progressivement vers la surface 10-20 cm, puis 0-10 cm.

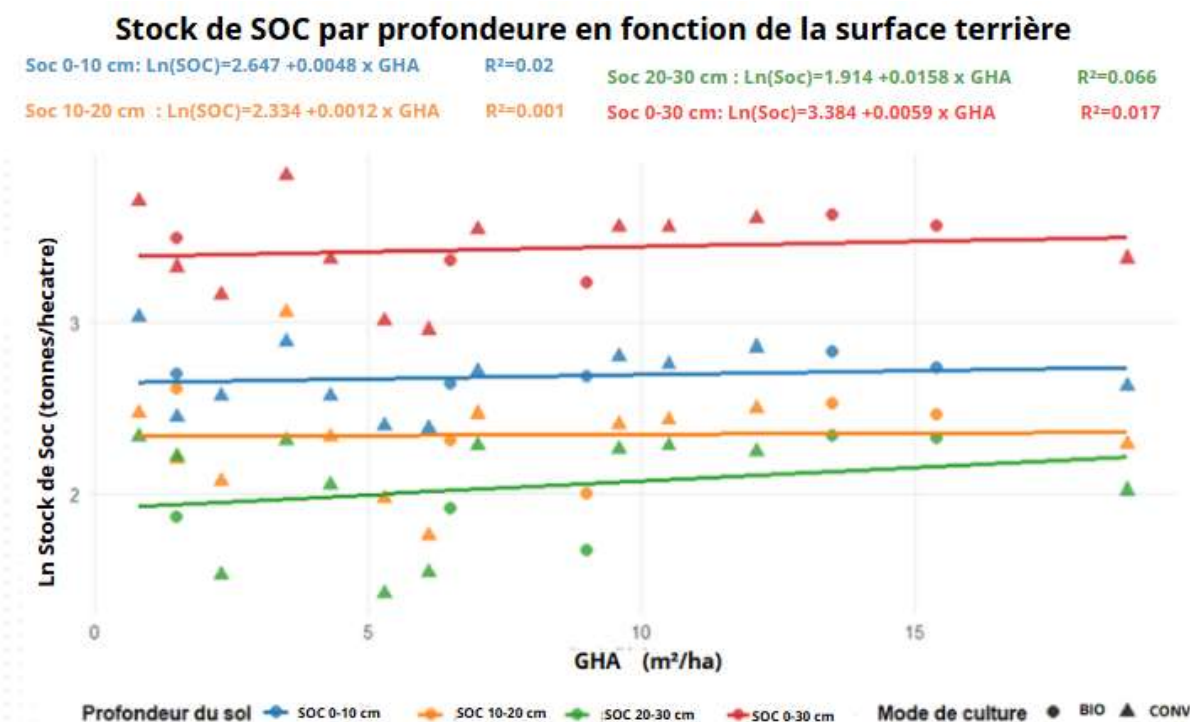


Figure 8 - Régression linéaire logarithmique entre les stocks de carbone organique du sol (t/ha) et la surface terrière (m²/ha) par profondeur (0-10, 10-20, 20-30 cm) dans 17 parcelles

Les quatre courbes de régression présentent des pentes positives, suggérant une augmentation des stocks de carbone avec l'augmentation de la surface terrière. Cette augmentation est d'environ 0,59 % pour chaque m²/ha supplémentaire de surface terrière. Cependant, aucune des variables n'est significativement corrélée au GHA ($p > 0.05$), indiquant que **les stocks de SOC n'augmentent pas de manière significative avec la densité d'arbres d'ombrage**. De plus, les coefficients de détermination (R^2) extrêmement faibles indiquent que la surface terrière n'explique que 0 à 6.6% de la variabilité des stocks de SOC, confirmant l'absence quasi-totale de relation entre ces variables.

3.2 Stock de carbone dans les cacaoyers

3.2.1 Variabilité des cacaoyers échantillonnés

Une variabilité importante a été observée parmi les 14 arbres échantillonnés. Les forts coefficients de variation s'expliquent principalement par la présence d'un individu dont le diamètre à 30 cm atteint 28,65 cm, nettement supérieur à celui des autres arbres, dont les diamètres varient entre 4 et 13 cm. La hauteur des arbres se situe entre 3 et 9 mètres, et l'AGB entre 1,02 et 45,62 kg. (*Tableau 7*).

Tableau 7 - Statistiques descriptives de l'échantillon de cacaoyers abattus (n=14) : paramètres dendrométriques et biomasse (D₃₀, DBH, D houppier, Aire houppier, hauteur, AGB)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne et Ecart-type	Coefficient de variation (%)
D_30 (cm)	4,07	28,65	10,21 ± 6,04	59,16
DBH (cm)	2,83	22,28	7,8 ± 4,86	62,39
D_houp (m)	2	7,9	3,60 ± 1,51	29,54
Aire_Houp(m ²)	1,96	3,06	7,41 ± 7,25	97,83
Hauteur (m)	3	9	5,3 ± 1,57	29,54
AGB (kg)	1,02	45,62	10,85 ± 11,30	104,12

La répartition moyenne de l'AGB entre les différents compartiments de l'arbre montre que le tronc constitue la part la plus importante avec 41 %, suivi des petites branches (dia <5cm) avec 33%, des grande branche (dia >5cm) avec 14% et des feuilles avec 12 %.

3.2.2 Régression

Le *Tableau 8* présente les résultats statistiques des 12 équations allométriques testées pour estimer la biomasse aérienne des cacaoyers. Le modèle 1, de forme simple $AGB = a \times D_{30}^b$, a ainsi été retenu bien qu'il n'affiche pas le R^2 pseudo le plus élevé. Il explique 94,1 % de la variance de l'AGB, tout en présentant les valeurs d'AIC (72,95) et de BIC (74,86) les plus faibles, indiquant le meilleur compromis entre performance et simplicité selon le principe de parcimonie. Son RMSE (2,64) compte parmi les plus faibles observés. Le léger gain de performance des modèles plus complexes ne justifie pas leur complexité accrue.

Tableau 8 - Comparaison des différents modèles de régression non linéaire pour l'estimation de la biomasse aérienne des cacaoyers : équations, R² pseudo, AIC, BIC et RMSE

Modèle	Équation	R ² pseudo	AIC	BIC	RMSE
M 1	$AGB = a * D_{30}^b$	0.9411	72.95	74.86	2.64
M 2	$AGB = a * D_{30}^b * H^c$	0.9412	74.91	77.47	2.64
M 3	$AGB = a * D_{30}^b * Dh^c$	0.9418	74.77	77.32	2.62
M 4	$AGB = a * D_{30}^b * Ah^c$	0.9418	74.77	77.32	2.62
M 5	$AGB = a * D_{30}^b * H^c * Dh^d$	0.9423	76.65	79.84	2.61
M 6	$AGB = a * D_{30}^b * H^c * Ah^d$	0.9423	76.65	79.84	2.61
M 7	$AGB = a + b * D_{30}^c$	0.9414	72.86	74.78	2.63
M 8	$AGB = a * e^{(b * D_{30}^c)}$	0.8952	81.01	82.92	3.52
M 9	$AGB = a * e^{(b * D_{30}^c + c * H)}$	0.8982	82.60	85.16	3.47
M 10	$AGB = a * (D_{30}^c * H)^b$	0.9330	74.74	76.65	2.81
M 11	$AGB = a * DBH^b$	0.8981	80.61	82.52	3.47
M 12	$AGB = a * DBH^b * H^c$	0.9016	82.12	84.67	3.41

La biomasse totale peut être estimée à partir du diamètre à 30 cm à l'aide de l'équation suivante:

$$AGB = 0.3264 \times D_{30}^{1.4747}$$

Équation 7 - Equation allométrique relative aux cacaoyers adapté à la zone d'études

Cette équation présente de bonnes performances et permet une estimation satisfaisante de la biomasse aérienne. Cependant, le RMSE de 2,64 kg indique qu'en moyenne, les prédictions du modèle s'écartent de ±2,64 kg par rapport à la biomasse réellement mesurée. Étant donné que la biomasse aérienne des cacaoyers échantillonnés varie de 1,02 à 45,62 kg, cette erreur correspond à une incertitude relative comprise entre 5,8 % et 259 %, selon la taille des arbres. La précision du modèle est meilleure pour les arbres de taille moyenne à grande, tandis que l'incertitude devient plus marquée pour les jeunes plants de faible biomasse. Le graphique comparant les valeurs prédites et observées d'AGB (Figure 9) confirme la qualité de l'ajustement, avec une distribution des points proche de la diagonale idéale pour les arbres moyens à grands. Cependant, les arbres présentant une biomasse inférieure à 5 kg tendent à

être systématiquement sous-estimés par le modèle, ce qui suggère une performance limitée pour les très jeunes cacaoyers.

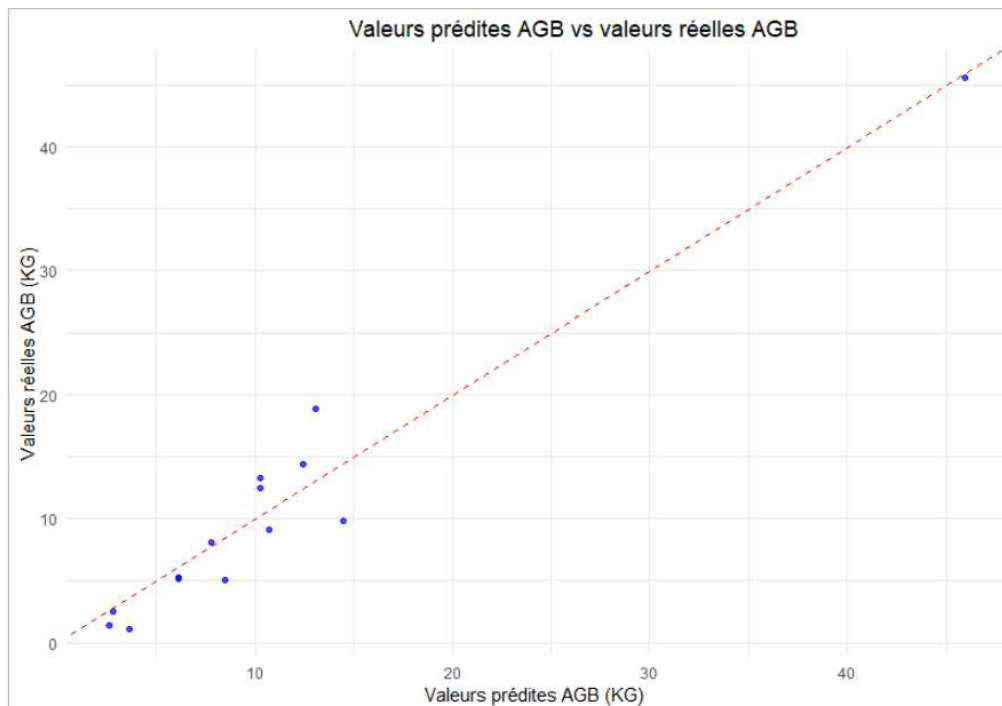


Figure 9 - Relation entre les valeurs observées et prédites de la biomasse aérienne (AGB) des cacaoyers par l'équation allométrique $AGB = 0,3264 \times D_{30}^{1,4747}$

3.2.3 Comparaison avec l'équation d'Andrade et al. (2008)

Pour évaluer les performances de l'équation allométrique développée dans le cadre de cette étude, une comparaison avec l'équation la plus utilisée dans la littérature, celle d'Andrade et al. (2008) ($AGB = 10^{(-1,625 + 2,63 \times \log(D_{30}))}$), a été réalisée. L'analyse vise à identifier d'éventuelles surestimations ou sous-estimations systématiques, ainsi qu'à évaluer l'ampleur des différences entre les deux méthodes en fonction du diamètre des arbres.

Les deux équations ont été comparées sur les données des parcelles permanentes (Cerny, 2024), avec un échantillon de 2329 cacaoyers. Pour ce faire, les arbres ont été répartis en cinq classes de (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, >20 cm). Pour chaque classe, quatre indicateurs statistiques ont été calculés pour quantifier les écarts entre les prédictions : le biais moyen, le biais relatif, suivi du RMSE (Root Mean Square Error) et enfin le MAE (Mean Absolute Error). Ces indicateurs permettent d'évaluer à la fois la tendance centrale (biais) et la dispersion (RMSE, MAE) des écarts entre les deux méthodes. Les résultats détaillés sont présentés dans le tableau 9.

Pour compléter l'analyse statistique, un test non paramétrique de Wilcoxon a été conduit pour chaque classe de diamètre ainsi qu'au niveau global. Ce test confirme une différence significative entre les deux équations ($p < 0,001$) tant au niveau global que pour chaque classe de diamètre.

Tableau 9 - Comparaison de l'équation allométrique développée dans le cadre de cette étude et l'équation de référence d'Andrade et al. (2008)

Classe de diamètre (D30)	N	Diamètre moyen (cm)	Biais moyen (Kg)	Biais relatif %	RMSE (Kg)	MAE (Kg)
0-5 cm	251	3.5	-1.34	-69.1	1.45	1.34
5-10 cm	1193	7.9	-1.16	-20.5	1.38	1.22
10-15 cm	720	12	3.98	28.4	4.93	3.98
15-20 cm	142	16.8	19.1	89.2	20.1	19.1
>20cm	23	23.6	65.9	181.0	72.4	65.9
Total	2329	9.1	2.3	-1.9	9.2	3.8

L'analyse comparative révèle des biais systématiques dépendants de la taille entre les deux équations allométriques. Pour les petits cacaoyers (0-5 cm et 5-10 cm), l'équation d'Andrade et al. (2008) sous-estime la biomasse de 69% et 21% respectivement par rapport à l'équation développée dans cette étude. Cette sous-estimation s'inverse à partir de 10 cm de diamètre, où l'équation d'Andrade et al. (2008) commence à surestimer progressivement la biomasse (+28% pour 10-15 cm, +89% pour 15-20 cm, jusqu'à +181% pour les arbres > 20 cm).

Les métriques d'erreur confirment cette tendance : les valeurs de RMSE et MAE restent faibles pour les petites classes (< 2 kg), mais augmentent drastiquement avec la taille des arbres, atteignant 72 kg de RMSE pour les cacaoyers > 20 cm. Cette progression indique que les écarts entre équations deviennent critiques pour les gros arbres, bien que ces derniers soient minoritaires dans l'échantillon.

Au niveau global, le biais moyen de +2,3 kg et le biais relatif de -1,9% masquent des compensations entre classes : les sous-estimations massives sur les nombreux petits arbres (83% de l'échantillon < 10 cm) compensent partiellement les surestimations importantes sur les rares gros arbres. *Le RMSE global (9,2 kg) est plus de deux fois supérieur au MAE (3,8 kg), ce qui indique que les écarts ne sont pas uniformes, mais concentrés sur quelques arbres, notamment les plus gros.*

3.3 Carbone total

3.3.1 Influence du mode de culture sur la surface terrière

La *figure 10* illustre l'influence du mode de culture sur la surface terrière, à partir des 58 champs prospectés (29 en agriculture biologique, 29 en conventionnelle).

Les profils de surface terrière (GHA) apparaissent très similaires entre systèmes : la moyenne est de $4,33 \pm 4,42$ en biologique contre $4,06 \pm 4,06$ en conventionnel. Les coefficients de variation, élevés dans les deux cas (102 % en bio, 99,9 % en conventionnel), traduisent une forte hétérogénéité intra-système. Les valeurs extrêmes confirment cette variabilité : de 0,60 à 15,4 en biologique, et de 0,46 à 18,8 en conventionnel.

Après vérification des hypothèses (normalité : Shapiro-Wilk, $p < 0,001$; homogénéité : Bartlett, $p = 0,65$), un test non paramétrique de Mann-Whitney a été appliqué. Il n'indique **aucune différence significative** entre les deux systèmes ($p = 0,96$), suggérant que le mode de culture n'influence pas le GHA dans cet échantillon.

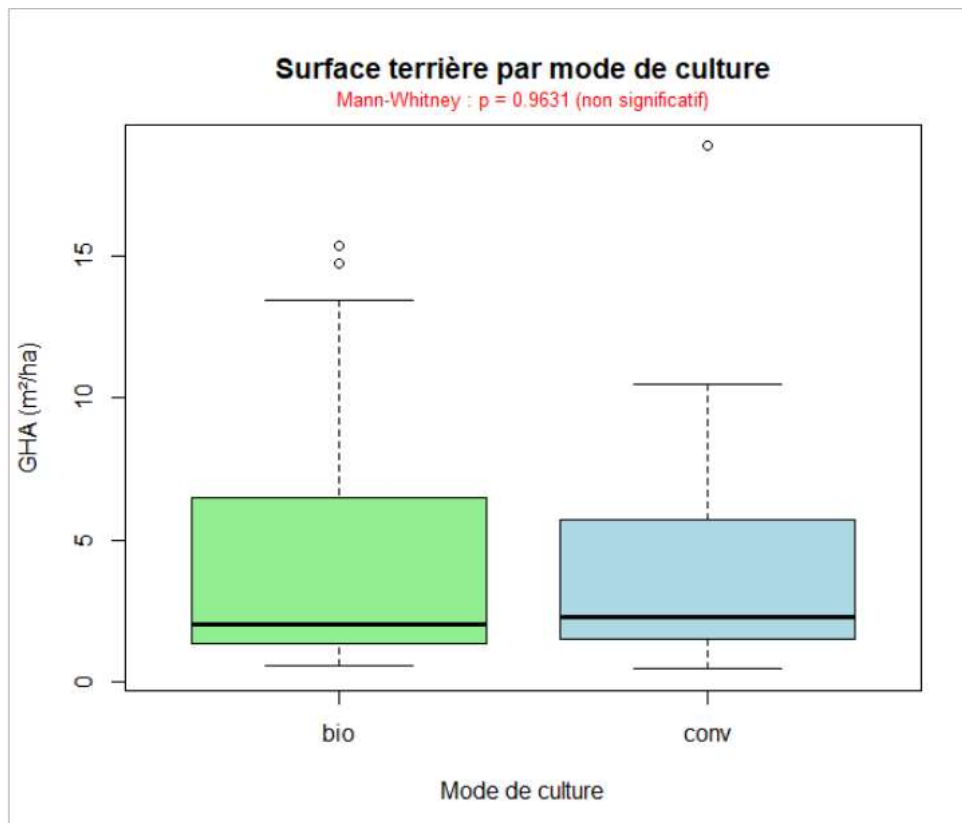


Figure 10 - Comparaison de la surface terrière (m^2/ha) entre systèmes biologiques (vert, $n=5$) et conventionnels (bleu, $n=12$) par boîtes à moustaches, test de Mann-Whitney

3.3.2 Carbone total présent sur la Coopérative

Pour estimer le stock total de carbone présent sur l'ensemble de la coopérative, les données collectées l'année précédente lors de la mise en place des parcelles permanentes par Cerny (2024) ont été actualisées. Le stockage de carbone dans les arbres d'ombrage n'a pas été modifié. Pour les stocks de carbone des cacaoyers, les mesures réalisées l'année dernière ont été reprises, mais le calcul de la biomasse aérienne moyenne par section a été effectué à l'aide de l'équation allométrique développée dans le cadre de cette étude.

Le stock de carbone organique du sol a été estimé à partir de la moyenne mesurée dans la couche 0–30 cm, soit $30,70 \pm 7,36$ t/ha. Le tableau 9 présente les différents stocks de carbone par section, puis une moyenne pondérée par la surface. Le stock total de carbone est estimé à **55,6 ± 12,2 t/ha**.

Tableau 10 - Stocks de carbone par section de la coopérative : stockage dans les arbres d'ombrage, les cacaoyers, biomasse totale, carbone total incluant le sol ($30,7 \pm 7,36$ t C/ha) et équivalent CO_2 , avec moyenne pondérée par la surface, adapté de Cerny (2024)

Section	Surface Totale (ha)	Stockage C Arbres d'ombrage (t/ha)	Stockage C Cacaoyer (t/ha)	Stockage C biomasse (Arbres d'ombrage et cacaoyers) (t/ha)
Bogouine	579,0	$17,9 \pm 3,9$	$8,0 \pm 2,3$	$25,9 \pm 4,6$
Douele	277,7	$16,1 \pm 7,2$	$10,4 \pm 2,1$	$26,5 \pm 7,5$
Gan	126,2	$45,7 \pm 12,2$	$6,9 \pm 3,3$	$52,6 \pm 12,6$
Man-Gbombelo	263,3	$5,0 \pm 2,1$	$9,0 \pm 1,7$	$14 \pm 2,7$
Yapleu	747,5	$12,8 \pm 1,8$	$9,9 \pm 2,1$	$22,7 \pm 2,8$
Moyenne pondérée par la surface :		$15,8 \pm 1,9$	$9,1 \pm 2,1$	$24,9 \pm 9,7$
Total avec le carbone organique du sol ($30,7 \pm 7,36$ t/ha)				$55,6 \pm 12,2$
			Equivalent CO_2	$204,1 \pm 44,8$

4. Discussion

4.1 Variabilité intra-parcellaires

Les analyses de variabilité intra-parcellaires révèlent des comportements contrastés selon les échelles. Aucune variation significative n'est observée entre répétitions. La profondeur influence hautement significativement le SOC et la teneur en carbone (diminution avec la profondeur) et très significativement la densité apparente. À l'échelle des fosses, le SOC varie hautement significativement, la teneur en carbone significativement, tandis que la densité apparente ne présente pas de différence significative.

La variabilité intra-parcelle du SOC est souvent non négligeable et notre stratégie d'échantillonnage, basée sur plusieurs fosses par parcelle, a permis de la caractériser de manière adéquate. Le coefficient de variation de 22 % observé pour le SOC entre fosses, ainsi que celui obtenu pour la densité apparente (18.5%), s'inscrivent dans les ordres de grandeur rapportés dans des études similaires (Carter et al., 2008).

La diminution des stocks de SOC avec la profondeur a également été observée en Côte d'Ivoire (Diallo, 2023), au Cameroun (Norgrove et al., 2013) et au Ghana (Adiyah et al., 2022). Cette tendance s'explique probablement par un apport continu de matière organique en surface, provenant de la litière, du renouvellement des racines fines et de l'incorporation de débris ligneux, suivi de leur décomposition (Adiyah et al., 2022).

4.2 Effet du facteur mode de culture

Nous n'avons pas observé de variabilité dans la biomasse selon le mode de culture dans les 58 champs étudiés. Cela contraste avec l'étude d'Asigbaase et al. (2021), qui a analysé 82 champs au Ghana et montré que les stocks de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine étaient plus élevés en bio qu'en conventionnel. Jacobi et al. (2014) souligne que les champs biologiques présentent souvent une diversité d'espèces arborées significativement plus importante que les champs conventionnels, un aspect qui n'a pas été étudié ici.

En ce qui concerne le SOC, nous n'avons pas trouvé de différence significative entre l'agriculture biologique et conventionnelle, les stocks étant légèrement supérieurs en agriculture biologique ($31,0 \pm 4,99$ t/ha) par rapport au conventionnel ($30,53 \pm 8,35$ t/ha). La valeur en biologique est toutefois plus faible que celle rapportée par Asigbaase et al. (2021), qui observe 49,1 t/ha contre 27,1 t/ha en conventionnel. L'écart entre bio et conventionnel est donc beaucoup plus marqué dans son étude, tandis que les présents résultats se rapprochent davantage de son scénario conventionnel que du biologique.

Cependant, les résultats obtenus sont en accord avec ceux de Diallo (2023) qui, dans une étude à plus long terme, n'a pas observé de différence significative du SOC selon le mode de culture. Une explication possible de cette absence de différence significative dans les cacaoyères pourrait être la fréquence relativement faible d'utilisation d'engrais et d'autres intrants chimiques, liée au coût élevé de ces produits pour les paysans de la région.

4.3 Effet de la surface terrière et comparaison avec des zones forestières

Aucune différence significative liée au gradient de GHA n'a été trouvée dans cette étude, mais une légère augmentation des stocks de SOC est perceptible. Cette tendance est cohérente avec Nair

et al. (2010) et Jacobi et al. (2014), qui indiquent qu'un SOC plus élevé est associé à une densité d'arbres d'ombrage supérieure, mais également à une diversité supérieure. Ce lien peut s'expliquer par les apports de litière supérieurs : moins d'arbres signifie moins de litière, ce qui limite la couverture du sol, favorise l'érosion et réduit l'activité de la faune du sol (Gama-Rodrigues et al., 2010 ; Norgrove et al., 2013).

Ces tendances observées le long du gradient de GHA peuvent être mises en perspective avec les variations de SOC mesurées entre forêts et cacaoyères dans plusieurs études en Afrique.

Au Ghana, Adiyah et al. (2022) ont trouvé que, dans les 30 premiers centimètres, le SOC était plus élevé en cacaoyère (39,5 t/ha) qu'en forêt (37,8 t/ha), bien que la différence ne soit pas significative. Les valeurs obtenues dans cette étude ($30,7 \pm 7,36$ t/ha) restent inférieures.

Au Cameroun, Norgrove et al. (2013) ont trouvé des SOC différents selon la profondeur et l'usage de terre : entre 0–10 cm, le résultat obtenu dans la présente études (13,8 C/ha) est proche de celui des forêts (13,5 t/ha) et inférieur aux cacaoyères (16,9 t/ha) du Cameroun. Entre 10–20 cm, la valeur (9,86 t/ha) se situent entre celle des forêts (8,6 t/ha) et des cacaoyères (12,2 t/ha), tandis qu'à 20–30 cm, elle est plus faible (6,98 t/ha) que pour les deux types de couvert végétal camerounais (9 t/ha). Au total sur 30 cm, les forêts présentent 31,1 t/ha contre 38,1 t/ha pour les cacaoyères, les valeurs obtenues dans la présente étude restant toujours inférieures.

4.4 Biomasse des cacaoyers

L'équation développée dans le cadre de cette étude est une régression non linéaire qui prend en compte le diamètre à 30 cm pour prédire la biomasse aérienne. Elle explique 94% de la variance de l'AGB, avec un AIC élevé de 72,95 et présente une RMSE de $\pm 2,64$ kg. Elle est bien ajustée pour les arbres de plus de 5 kg, mais les arbres de moins de 5 kg sont souvent sous-estimés par le modèle. Cette équation allométrique présente plusieurs points forts, mais également certaines limites

La méthodologie employée a permis d'obtenir des résultats pertinents, comparables à ceux d'autres études. Les densités obtenues sont de 0.33 à 0.40 g/cm³, ce qui est cohérent avec les gammes trouvées au Ghana (0.3 à 0.5 g/cm³) (Donkor et al., 2023) et en Côte d'ivoire (0.39 à 0.44 g/cm³) (Romero et al., 2018).

De plus, les proportions relatives des différents organes à l'AGB totale observées dans cette étude s'avèrent globalement cohérentes avec celles rapportées au Mexique (Morán-Villa et al., 2024). Toutefois, la part du tronc est plus faible (41 % contre 48 %), tandis que celle des branches est plus élevée (47 % contre 41 %). Cette différence pourrait s'expliquer par des pratiques de taille distinctes, la taille modifiant la structure des cacaoyers (Tosto et al., 2022).

Cependant, certaines limites de l'étude doivent être soulignées.

D'abord, l'échantillonnage a porté sur seulement 14 cacaoyers, dont un seul dépassait 15 cm de diamètre à 30 cm. Cette taille d'échantillon diffère de celle de Morán-Villa et al. (2024) (21 cacaoyers), de Fomekong Tane et al. (2024) (50) et est très inférieure à celle de Donkor et al. (2023) (110). Un échantillonnage aussi restreint peut introduire une incertitude notable.

Les choix méthodologiques distincts entre la présente étude et celles de la littérature limitent la comparabilité directe des résultats. Tout d'abord, l'utilisation d'un modèle non-linéaire dans cette étude rend le pseudo R² (0,94) non comparable aux R² classiques rapportés ailleurs, ces derniers étant issus de régressions linéaires ou linéarisées.

Ensuite, les variables retenues dans les modèles varient : l'équation développée ici, ainsi que celles de Fomekong Tane et al. (2024) et Andrade et al. (2008) se basent uniquement sur le diamètre à 30 cm (D30), tandis que Morán-Villa et al. (2024) intègrent le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et la hauteur, et Donkor et al. (2023) combinent D30 et la densité du bois. Ces différences reflètent des compromis entre précision et simplicité de mesure.

Enfin, les gammes de validité des équations diffèrent : Andrade et al. (2008) couvrent des diamètres (D30) de 11,3 à 26,8 cm, et Fomekong Tane et al. (2024) de 5 à 27 cm. Malgré ces variations, notre modèle présente un RMSE de 2,64 kg, inférieur à celui de Donkor et al. (2023) (11,61 kg). Ces écarts pourraient s'expliquer par des différences dans la taille des échantillons, la représentativité des données ou les méthodes d'ajustement.

4.5 Carbone total dans la coopérative

4.5.1 Différence entre les stocks de carbone dans les cacaoyers de Cerny (2024) et de cette étude

Entre l'année dernière et la présente étude, les stocks de carbone des cacaoyers ont diminué de $12,4 \pm 0,8$ à $9,1 \pm 2,1$ t/ha ($\sim 27\%$) à l'échelle de la coopérative. Cette différence s'explique par plusieurs facteurs méthodologiques.

Premièrement, le taux de carbone utilisé cette année (42,6 %, Morán-Villa et al. (2024)) est inférieur à la valeur générique précédente (50 %, Cerny, (2024)), entraînant une réduction de 17,4 % des stocks (diminution de 1,58 t/ha). Le coefficient de conversion pour obtenir la BGB à partir de l'AGB est passé de 0,2 à 0,23 ce qui augmente la biomasse de 2,5 %. Cela reste insuffisant pour compenser la baisse liée au taux de carbone, ce qui conduit à une estimation finale 13,9 % plus faible, que ceux de Cerny (2024) soit une diminution de 1.7 t/ha.

Deuxièmement, l'utilisation d'équations allométriques différentes peut expliquer le reste de la variation (1,6 t/ha). L'équation d'Andrade et al. (2008) tend à sous-estimer la biomasse des petits cacaoyers, tandis qu'elle surestime de manière croissante celle des grands individus à mesure que le diamètre augmente. Plusieurs raisons méthodologiques peuvent expliquer cette divergence. Lors de l'élaboration de notre équation, un seul arbre de plus de 15 cm de diamètre a été inclus. De plus, cet arbre présentait un état sanitaire dégradé, ce qui a probablement conduit à une sous-estimation de sa biomasse et, par conséquent, à une sous-estimation systématique de la biomasse des grands cacaoyers dans notre étude, comparativement à l'équation d'Andrade et al. (2008). En revanche, pour les arbres de moins de 10 cm de diamètre — représentant 62 % des individus de la coopérative — l'échantillonnage a été plus représentatif, avec 13 arbres mesurés. Dans cette classe, notre équation tend à surestimer la biomasse par rapport à celle d'Andrade et al. (2008) mais elle est mieux adaptée au contexte local de l'étude.

4.5.2 Différence du carbone total de cette étude et d'autres

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude indiquent un stockage moyen total de $55,6 \pm 12,2$ t/ha dans les parcelles inventoriées. Ce total intègre à la fois le carbone organique du sol, évalué à $30,7 \pm 7,36$ t/ha, et le carbone contenu dans la biomasse ligneuse, estimée à $24,9 \pm 9,7$ t/ha, dont $15,8 \pm 1,9$ dans les arbres d'ombrage et $9,1 \pm 2,1$ dans les cacaoyers.

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études. Andrade et al. (2008) ont montré que le sol constitue la plus grande réserve de carbone (27–74 %), suivi de la biomasse aérienne (15–57 %). Jacobi et al. (2014) confirme également que le SOC est le plus grand réservoir de carbone,

représentant 35% du carbone total en agroforesterie et 64% en monoculture (car les arbres d'ombrage prennent une plus grande place en agroforesterie). Au contraire, au Cameroun, (Norgrove et al., 2013) rapportent une répartition différente avec des stocks de carbone plus importants dans les arbres d'ombrage ($121,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$) que dans le sol (90 Mg ha^{-1}), les cacaoyers ne représentant que $14,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

4.6 Difficulté de comparaison entre différentes études

Il est parfois difficile de comparer les résultats de différentes études sur la séquestration de carbone dans les systèmes agroforestiers, en raison de divergences méthodologiques et de la présentation incomplète des résultats.

Par exemple, le manque d'équations allométriques spécifiques et rigoureuses pour estimer la biomasse aérienne constitue une source importante d'incertitude. (Nair, 2012). Molto et al. (2013) ont souligné que le choix de l'équation allométrique est la principale source d'erreur dans le calcul de la biomasse. On peut observer cette différence dans les résultats entre l'étude de Cerny (2024) et la présente, bien qu'elles soient basées sur le même jeu de données. Cette différence méthodologique est également présente dans plusieurs études : là où Asigbaase et al. (2021) utilisent l'équation d'Andrade et al. (2008) pour les cacaoyers, Assale et al. (2021) utilisent celle de Segura et al. (2006). Le même constat s'applique aux équations permettant de prédire la biomasse des arbres d'ombrage, où plusieurs équations différentes sont utilisées selon les études.

Une autre limite majeure réside dans l'absence de méthodes uniformes pour décrire et caractériser les surfaces sous agroforesterie, ce qui complique l'évaluation globale de leur contribution à la séquestration de carbone (Nair et al., 2009).

En ce qui concerne le carbone organique du sol, il existe un manque d'uniformité dans la profondeur d'échantillonnage. La plupart des travaux se limitent à 20–30 cm de profondeur, alors que certaines études vont jusque 1m de profondeur. Cette hétérogénéité est particulièrement problématique dans les systèmes arborés, où les racines explorent des horizons plus profonds et où le sous-sol joue un rôle clé dans la stabilisation à long terme du carbone. Il devient alors difficile, voire impossible, de comparer des stocks mesurés entre 0–15 cm avec ceux calculés sur 0–100 cm (Nair, 2012).

Par ailleurs, de nombreuses publications ne précisent pas suffisamment les paramètres essentiels au calcul des stocks de carbone du sol. Celui-ci nécessite la combinaison de la concentration en C, de la densité apparente et de la profondeur d'échantillonnage. Or, ces informations sont parfois omises ou incomplètes, ce qui entraîne des biais lors des comparaisons (Nair et al., 2010). Par exemple, deux sols présentant la même concentration en C mais des densités apparentes différentes peuvent afficher des stocks totaux très divergents. Comparer des valeurs issues de différentes études sans tenir compte de ces variables compromet donc la validité des conclusions (Nair, 2012).

4.7 Limites de l'études

Cette étude présente plusieurs limites méthodologiques qui doivent être prises en considération. La principale faiblesse réside dans le faible nombre de répétitions effectuées pour mesurer chaque variable.

Concernant l'équation allométrique, seulement 14 cacaoyers ont été abattus pour sa réalisation, ce qui constitue un échantillon réduit. Cette limitation est d'autant plus marquée que nous

n'avons disposé que d'un seul arbre de plus de 15 cm de diamètre (à 30cm), ce qui est insuffisant pour établir une équation robuste sur l'ensemble de la gamme de diamètres.

Pour la quantification du SOC, seulement 17 parcelles de la coopérative ont été visitées et uniquement dans les sections de Bogouiné, Douélé et Yapleu, sans prendre en compte les sections en zone montagneuse. Cette limitation spatiale est problématique car la topographie influence indirectement les stocks de carbone : l'altitude affecte la végétation, les pentes favorisent l'érosion des particules riches en carbone, et la topographie contrôle l'humidité du sol et l'activité microbienne (Rodrigues et al., 2023).

De plus, l'échantillonnage des modes de culture est également insuffisant avec seulement 5 champs en agriculture biologique, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions robustes sur l'influence des pratiques culturales.

Les mesures de terrain comportent inévitablement des erreurs, malgré tous les efforts déployés pour les minimiser. De plus, plusieurs variables importantes n'ont pas été prises en compte dans l'étude du SOC, notamment l'âge des plantations et la durée écoulée depuis la transformation de la forêt en cacaoyère, facteurs pourtant identifiés comme influents dans la littérature.

Une autre limite de cette étude réside dans l'absence de quantification des intrants appliqués dans les parcelles biologiques et conventionnelles.

Enfin, dans le calcul des stocks de carbone total, la litière n'a pas été comptabilisée, contrairement à plusieurs études de référence, ce qui peut conduire à une sous-estimation des stocks totaux.

5. Contribution personnelle de l'étudiante

Lorsque Monsieur Doucet a proposé ce sujet de TFE, j'ai tout de suite eu envie de m'impliquer dans ce travail. Après une réunion avec la chocolaterie Galler®, qui m'a permis de mieux comprendre les enjeux de cette étude, j'ai développé les protocoles expérimentaux nécessaires à sa réalisation : protocole d'analyses de sol en collaboration avec M. Meersmans et M. Doucet, ainsi que protocole d'abattage des cacaoyers avec M. De Mil. Ensuite, je suis partie en Côte d'Ivoire du 9 février au 7 mai 2025 afin de collecter mes données de terrain. J'ai alors découvert une nouvelle culture, grâce à l'accueil chaleureux des membres de la coopérative. En compagnie des producteurs relais et lors de l'assemblée générale de la coopérative, j'ai eu l'opportunité de découvrir concrètement les enjeux de l'agroforesterie cacaoyère ivoirienne. Après ces trois mois de terrain, je me suis chargé de l'analyse complète des données (traitement statistique via R et Excel) mais également de la rédaction du présent document.

6. Perspectives

Cette étude permet de quantifier les stocks de carbone présents dans la coopérative, qui s'élèvent à 55,6 tonnes par hectare, soit 204,1 tonnes équivalent CO₂ par hectare. Les prix actuels du marché carbone pour de tels projets agroforestiers fluctuent considérablement, la fourchette haute atteignant 15,5 dollars par tonne équivalent CO₂ (World Bank, 2025). D'autres projets en Côte d'Ivoire ont obtenu 5 dollars par tonne équivalent CO₂ (World Bank, August-17-2025), ce qui est significativement plus faible.

Cependant, pour obtenir une accréditation, il convient d'abord d'établir un scénario de base, puis de quantifier les améliorations apportées par le projet en termes d'équivalent CO₂. Cette étude fournit des éléments essentiels à cette démarche. Elle révèle que l'agriculture biologique présente des stocks légèrement supérieurs au conventionnel, permettant d'établir une différence, bien que non significative statistiquement, grâce à la conversion biologique. En passant du conventionnel (30,53 t C/ha) au biologique (31 t C/ha), on gagne 0,47 tonnes de SOC par hectare, ce qui équivaut à 1,72 tonnes équivalent CO₂ gagnées par hectare qui passe d'une agriculture conventionnelle à une agriculture biologique.

En ce qui concerne l'agroforesterie, les parcelles présentant une surface terrière plus importante contiennent légèrement plus de SOC, avec 0,59% de carbone organique du sol en plus par m²/ha de surface terrière. Par exemple, pour un champ moyen de la coopérative (SOC = 30,7 t C/ha), cela revient à une augmentation de 0,18 tonnes de carbone par hectare par m²/ha de surface terrière supplémentaire, ce qui fait 0,66 tonnes équivalent CO₂. Même si ce chiffre reste très faible, rapporté à l'échelle des champs Galler® de la coopérative (c'est-à-dire 2 150 hectares), cela reviendrait à 1 419 tonnes équivalent CO₂, si toutes les parcelles augmentent leur surface terrière d'1 m²/hectare et ce seulement pour le carbone organique du sol. À cela s'ajoute l'augmentation de la biomasse aérienne et souterraine qui découle de l'augmentation de la surface terrière, également à prendre en compte.

Pour ce faire, le projet a déjà pris des initiatives en plantant plus de 6 000 arbres d'ombrage depuis 2020. Cependant, et comme le précise Cerny, les gros arbres ont le plus gros poids et présentent le plus de carbone dans la biomasse. Il faut donc veiller à conserver ces vestiges de forêt et sensibiliser les producteurs dans ce sens, en plus de continuer les efforts de plantation pour augmenter la surface terrière.

Pour ce faire, la mise en place d'un système de parrainage d'arbres existants pourrait constituer une voie innovante pour concilier conservation et bénéfices économiques. Concrètement, des parrains – particuliers, entreprises ou institutions – verseraient une compensation financière aux producteurs en échange de leur engagement à conserver les arbres d'ombrage présents sur leurs parcelles. Afin d'assurer la transparence, un dispositif de suivi pourrait être instauré, reposant sur la géolocalisation des arbres ainsi que sur des photographies régulières permettant de vérifier leur présence et leur état. Ces preuves visuelles garantiraient l'existence continue des arbres et déclencheraient le versement de la compensation aux producteurs. Un système de contrôle indépendant serait néanmoins nécessaire afin de limiter les risques de fraude. L'intérêt d'un tel mécanisme est double : d'une part, il encourage le maintien d'arbres d'ombrage essentiels à la durabilité des systèmes agroforestiers, et d'autre part, il permet de comptabiliser la quantité de carbone préservée grâce à l'évitement de l'abattage. La réalisation d'une étude exploratoire visant à évaluer la faisabilité et les modalités de mise en place d'un tel système de parrainage constituerait ainsi une piste prometteuse pour sauvegarder les arbres d'ombrage existants à l'échelle locale.

7. Conclusion

Cette étude a permis de préciser l'estimation des stocks de carbone de la coopérative. L'établissement d'une équation allométrique spécifique à la zone d'étude pour le calcul de la biomasse des cacaoyers a été réalisé, après l'abattage de 14 arbres sur le terrain, avec des résultats satisfaisants, surtout pour les arbres de faible diamètre, même si l'ajustement est moins robuste pour les cacaoyers de plus gros diamètre.

En parallèle, les stocks de carbone organique du sol (SOC) ont également été étudiés dans 17 champs de la coopérative, ce qui a permis d'affiner les estimations de l'année précédente. Alors qu'ils avaient été évalués à environ 50 t C/ha, les mesures de cette année les situent à 30 t C/ha. Ces résultats permettent de disposer d'une valeur moyenne représentative pour les zones non montagneuses de la coopérative.

L'effet de la surface terrière sur les stocks de carbone du sol a également été examiné. Bien qu'aucun effet significatif n'ait été observé, on constate une tendance positive : une augmentation de la surface terrière est associée à une légère hausse du SOC, pouvant se traduire en équivalent CO₂ pour la coopérative.

Enfin, l'impact du mode de culture sur le bilan carbone a été analysé. Si la surface terrière ne varie pas entre agriculture biologique et conventionnelle, les résultats montrent que les sols en bio présentent des stocks de SOC légèrement plus élevés (+0,47 t C/ha, soit +1,72 t CO₂/ha). Ces différences, bien que faibles, offrent à la coopérative une marge pour valoriser les pratiques biologiques dans le cadre d'un accès aux crédits carbone. En parallèle, les efforts déjà réalisés en plantation d'arbres d'ombrage depuis 2020 renforcent ce potentiel. La combinaison de ces pratiques – augmentation de la surface terrière, maintien des grands arbres et conversion vers le biologique – constitue une stratégie prometteuse pour améliorer le bilan carbone de la coopérative et accéder à des bénéfices économiques liés au marché du carbone.

9. Bibliographie

- Adiyah F., Michéli E., Csorba A., Gebremeskel Weldmichael T., Gyuricza C., Ocansey C.M., Dawoe E., Owusu S. & Fuchs M., 2022. Effects of land use change and topography on the quantity and distribution of soil organic carbon stocks on Acrisol catenas in tropical small-scale shade cocoa systems of the Ashanti region of Ghana. *CATENA* **216**, 106366, DOI:10.1016/j.catena.2022.106366.
- Agbotui D.K., Ingold M., Wiehle M. & Buerkert A., 2023. Can carbon payments improve profitability of traditional conventional and organic cocoa agroforests? A case study in the Eastern Region of Ghana. *Agrofor. Syst.* **97**(5), 813–831, DOI:10.1007/s10457-023-00828-0.
- Alexis A.A., René Y.G., Olivier D., Ismaël B., Jules K.Z. & Amoncho A., n.d. Les caractéristiques agronomiques des vergers de cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) en Côte d'Ivoire. . *Vol.* **2**(1).
- 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.
- Angoran E.J., n.d. The impact of full-sun cocoa monoculture on deforestation and ecosystem services in Agnibilekrou, Ivory Coast.
- Asase A. & Tetteh D.A., 2016. Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in southeast Ghana. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **40**(1), 96–113, DOI:10.1080/21683565.2015.1110223.
- Asigbaase M., Dawoe E., Lomax B.H. & Sjogersten 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.
- Asigbaase M., Lomax B.H., Dawoe E. & Sjogersten S., 2021. Influence of organic cocoa agroforestry on soil physico-chemical properties and crop yields of smallholders' cocoa farms, Ghana. *Renew. Agric. Food Syst.* **36**(3), 255–264, DOI:10.1017/S1742170520000290.
- Asigbaase M., Sjogersten S., Lomax B.H. & Dawoe E., 2019. Tree diversity and its ecological importance value in organic and conventional cocoa agroforests in Ghana. *PLOS ONE* **14**(1), e0210557, DOI:10.1371/journal.pone.0210557.
- Assale A. a. Y., Kouakou K.A., Kouakou A.T.M., Kpangui K.B. & Barima Y.S.S., 2021. Diversité végétale et potentiel de séquestration De carbone des espaces domaniaux anthropisés: Cas de la forêt classée du Haut-Sassandra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Agron. Afr.* **33**(1), 15–28.
- Avenard J.M., 1971. *Le Milieu naturel de la Côte d'Ivoire*, IRD Editions, 396.
- Awazi N.P., 2025. Driving sustainable agroforestry through carbon credit-based policies: Realities and perspectives. *Nat. Resour. Conserv. Res.* **8**(1), 10184-, DOI:10.24294/nrcr10184.
- Awazi N.P., Alemagi D. & Ambebe T.F., 2025. Promoting the carbon market in agroforestry systems: the role of global, national and sectoral initiatives. *Discov. For.* **1**(1), 9, DOI:10.1007/s44415-025-00013-4.
- Becker A., Wegner J.D., Dawoe E., Schindler K., Thompson W.J., Bunn C., Garrett R.D., Castro F., Hart S.P. & Blaser-Hart W.J., 2024. The unrealized potential of agroforestry for an emissions-intensive agricultural commodity.
- Besar N.A., Suardi H., Phua M.-H., James D., Mokhtar M.B. & Ahmed M.F., 2020. Carbon Stock and Sequestration Potential of an Agroforestry System in Sabah, Malaysia. *Forests* **11**(2), 210, DOI:10.3390/f11020210.

- Bevacqua E., Schleussner C.-F. & Zscheischler J., 2025. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nat. Clim. Change* **15**(3), 262–265, DOI:10.1038/s41558-025-02246-9.
- Borden K.A., Anglaere L.C.N., Adu-Bredu S. & Isaac M.E., 2019. Root biomass variation of cocoa and implications for carbon stocks in agroforestry systems. *Agrofor. Syst.* **93**(2), 369–381, DOI:10.1007/s10457-017-0122-5.
- Carter M.R. & Gregorich E.G., 2008. *Soil sampling and methods of analysis*, Boca Raton (Fla.): CRC press.
- Cerny C. & Université de Liège > Master bioing. : gest. forêts & esp. nat. À.F.S., 2024. 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). ChatGPT, August-15-2025. . <https://chatgpt.com>, (15/08/2025).
- 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.
- Claude, August-15-2025. . <https://claude.ai/new>, (15/08/2025).
- Cuny P., Plancheron F., Bio A., Kouakou E. & Morneau F., 2023. La forêt et la faune de Côte d'Ivoire dans une situation alarmante – Synthèse des résultats de l'Inventaire forestier et faunique national. *BOIS FORETS Trop.* **355**, 47–72, DOI:10.19182/bft2023.355.a36939.
- Deguide E. & Tech U. de L.> G.A.-B., 2023. Travail de fin d'études: "Contribution à l'accompagnement d'une coopérative agricole dans l'amélioration des rendements de cultures par des pratiques agroécologiques : Cas de la coopérative Yeyasso en Côte d'Ivoire."
- Diallo R., Héroult B. & Ehouman E., n.d. Impacts de la déforestation et des usages actuels des terres sur le Carbone Organique des Sols d'une zone post-forestière (Behiri, département de Lôh Djiboua) de Côte d'Ivoire.
- Donkor E., Adu-Bredu S., Jnr E.M.O., Andam-Akorful S.A. & Mohammed Y., 2023a. Biomass Estimation Models for Cocoa (*Theobroma cacao*) Plantations in Ghana, West Africa. *Open J. Appl. Sci.*
- Donkor E., Adu-Bredu S., Jnr E.M.O., Andam-Akorful S.A. & Mohammed Y., 2023c. Biomass Estimation Models for Cocoa (&i>Theobroma cacao&i>) Plantations in Ghana, West Africa. *Open J. Appl. Sci.* **13**(09), 1588–1618, DOI:10.4236/ojapps.2023.139126.
- Dougous O., Minyaka E., Longue E.A.M. & Nkengafac N.J., 2018. Potentials of cocoa pod husk-based compost on Phytophthora pod rot disease suppression, soil fertility, and *Theobroma cacao* L. growth. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **25**(25), 25327–25335, DOI:10.1007/s11356-018-2591-0.
- Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K., 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- FAO, 2022. The state of the World's forests 2022. <https://www.fao.org/3/cb9360en/online/cb9360en.html>, (03/07/2025).
- Filonchik M., Peterson M.P., Yan H., Gusev A., Zhang L., He Y. & Yang S., 2024. Greenhouse gas emissions and reduction strategies for the world's largest greenhouse gas emitters. *Sci. Total Environ.* **944**, 173895, DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.173895.
- Fomekong Tane A.B., Momo Solefack M.C., Mendi Anjah G., Woukoué Taffo J.B., Kengne O.C. & Kenfack Feukeng S.S., 2024. Site-Species Allometry Equation for *Theobroma cacao* L. Biomass Estimation in Agroforestry Systems of Cameroon. *Int. J. Ecol.* **2024**(1), 7096854, DOI:10.1155/2024/7096854.
- Forster P.M., Smith C., Walsh T., Lamb W.F., Lamboll R., Cassou C., Hauser M., Hausfather Z., Lee J.-Y., Palmer M.D., von Schuckmann K., Slangen A.B.A., Szopa S., Trewin B., Yun J.,

- Gillett N.P., Jenkins S., Matthews H.D., Raghavan K., Ribes A., Rogelj J., Rosen D., Zhang X., Allen M., Aleluia Reis L., Andrew R.M., Betts R.A., Borger A., Broersma J.A., Burgess S.N., Cheng L., Friedlingstein P., Domingues C.M., Gambarini M., Gasser T., Gütschow J., Ishii M., Kadow C., Kennedy J., Killick R.E., Krummel P.B., Liné A., Monselesan D.P., Morice C., Mühle J., Naik V., Peters G.P., Pirani A., Pongratz J., Minx J.C., Rigby M., Rohde R., Savita A., Seneviratne S.I., Thorne P., Wells C., Western L.M., van der Werf G.R., Wijffels S.E., Masson-Delmotte V. & Zhai P., 2025. Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth Syst. Sci. Data* **17**(6), 2641–2680, DOI:10.5194/essd-17-2641-2025.
- Gama-Rodrigues E.F., Ramachandran Nair P.K., Nair V.D., Gama-Rodrigues A.C., Baligar V.C. & Machado R.C.R., 2010. Carbon Storage in Soil Size Fractions Under Two Cacao Agroforestry Systems in Bahia, Brazil. *Environ. Manage.* **45**(2), 274–283, DOI:10.1007/s00267-009-9420-7.
- Gattinger A., Muller A., Haeni M., Skinner C., Fliessbach A., Buchmann N., Mäder P., Stolze M., Smith P., Scialabba N.E.-H. & Niggli U., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109**(44), 18226–18231, DOI:10.1073/pnas.1209429109.
- Gnangouin A.Y.J., Kouassi A.M. & Diarrassouba K., 2023. Impacts du changement climatique sur les régimes climatiques futurs en Afrique de l’Ouest : Cas du bassin versant du N’zi (Bandama, Côte d’Ivoire). *Bull. L’association Géographes Fr. Géographies* **Volume 100**(1), 92–111, DOI:10.4000/bagf.10813.
- Hawkins J.W., Gallagher E.J., van der Haar S., Sevor M.K.E., Weng X., Rufino M.C. & Schoneveld G.C., 2024. Low-emissions and profitable cocoa through moderate-shade agroforestry: Insights from Ghana. *Agric. Ecosyst. Environ.* **367**, 108961, DOI:10.1016/j.agee.2024.108961.
- Hosseinzadeh-Bandbafha H. & Kiehadrouinezhad M., 2022a. Environmental Impacts of Chocolate Production and Consumption. In: Galanakis, C.M. ed. *Trends in Sustainable Chocolate Production*. Cham: Springer International Publishing, 229–258.
- Jacobi J., Andres C., Schneider M., Pillco M., Calizaya P. & Rist S., 2014. Carbon stocks, tree diversity, and the role of organic certification in different cocoa production systems in Alto Beni, Bolivia. *Agrofor. Syst.* **88**(6), 1117–1132, DOI:10.1007/s10457-013-9643-8.
- Joseph Bandanaa, Isaac K Asante, Irene S Egyir, Christian Schader, Ted Y Annang, Johan Blockeel, Irene Kadzere, & Anja Heidenreich, 2021. Sustainability performance of organic and conventional cocoa farming systems in Atwima Mponua District of Ghana Sustainability performance of organic and conventional cocoa farming systems in Atwima Mponua District of Ghana. *Environ. Sustain. Indic.* **11**, 100121-.
- Jungbluth N., n.d. Environmental impacts of chocolate in a life cycle perspective.
- Kashyap P. & Jain M., 2025. Organic Farming: Emerging Practices, Effect on Environment and Nutrition. *Nat. Environ. Pollut. Technol.* **24**, 137–148, DOI:10.46488/NEPT.2025.v24iS1.009.
- Kenfack Essougong U.P., Slingerland M., Mathé S., Vanhove W., Tata Ngome P.I., Boudes P., Giller K.E., Woittiez L.S. & Leeuwis C., 2020. Farmers’ Perceptions as a Driver of Agricultural Practices: Understanding Soil Fertility Management Practices in Cocoa Agroforestry Systems in Cameroon. *Hum. Ecol.* **48**(6), 709–720, DOI:10.1007/s10745-020-00190-0.
- Kohl T., Niether W. & Abdulai I., 2024. Impact of common shade tree species on microclimate and cocoa growth in agroforestry systems in Ghana. *Agrofor. Syst.* **98**(6), 1579–1590, DOI:10.1007/s10457-024-01029-z.
- Konan G.D., Kpangui K.B., Kouakou K.A. & Barima Y.S.S., 2023. Typologie des systèmes agroforestiers à base de cacaoyers selon le gradient de production cacaoyère en Côte d’Ivoire: Typology of cocoa-based agroforestry systems according to the cocoa production gradient in Côte d’Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **17**(2), 378–391, DOI:10.4314/ijbcs.v17i2.7.

- Kouadio K.A.L., Kouakou A.T.M., Zanh G.G., Jagoret P., Bastin J.-F. & Barima Y.S.S., 2024. Floristic structure, potential carbon stocks, and dynamics in cocoa-based agroforestry systems in Côte d'Ivoire (West Africa). *Agrofor. Syst.* **99**(1), 12, DOI:10.1007/s10457-024-01103-6.
- 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.
- Krumbiegel K. & Tillie P., 2024. Sustainable practices in cocoa production. The role of certification schemes and farmer cooperatives. *Ecol. Econ.* **222**, 108211, DOI:10.1016/j.ecolecon.2024.108211.
- Kumar R., Kumar A. & Saikia P., 2022. Deforestation and Forests Degradation Impacts on the Environment. In: Singh, V.P., Yadav, S., Yadav, K.K., Yadava, R.N. eds. *Environmental Degradation: Challenges and Strategies for Mitigation*. Cham: Springer International Publishing, 19–46.
- Kumeh E.M., 2024. The political ecology of cocoa agroforestry and implications for equitable land use in rural Ghana. *Agrofor. Syst.* **98**(7), 2463–2481, DOI:10.1007/s10457-024-01041-3.
- Meersmans J., Martin M.P., De Ridder F., Lacarce E., Wetterlind J., De Baets S., Le Bas C., Louis B.P., Orton T.G., Bispo A. & Arrouays D., 2012. A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France. *Agron. Sustain. Dev.* **32**(4), 873–888, DOI:10.1007/s13593-012-0085-x.
- Mehra D., Rael T. & Bloem M.W., 2024. A review of the intersection between climate change, agriculture, health, and nutrition in Africa: costs and programmatic options. *Front. Sustain. Food Syst.* **8**, DOI:10.3389/fsufs.2024.1389730.
- Milena Segura Markku Kanninen Damaris Sua ´ rez, 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *ResearchGate* DOI:10.1007/s10457-006-9005-x.
- Mohammed A.M., Robinson J.S., Midmore D. & Verhoef A., 2016. Carbon storage in Ghanaian cocoa ecosystems. *Carbon Balance Manag.* **11**(1), 6, DOI:10.1186/s13021-016-0045-x.
- Mokany K., Raison R.J. & Prokushkin A.S., 2006. Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob. Change Biol.* **12**(1), 84–96, DOI:10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x.
- Molto Q., Rossi V. & Blanc L., 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods Ecol. Evol.*
- Morán-Villa V.L., Monterroso-Rivas A.I., Mata-González R., Márquez-Berber S.R., Abdallah M.A.B., Valdes-Velarde E. & Hernández-Sánchez R., 2024a. Above-ground biomass estimation by developing allometric equations for *Theobroma cacao* in Tabasco, Mexico. *Agrofor. Syst.* **98**(3), 537–549, DOI:10.1007/s10457-023-00928-x.
- Nair P.K.R., 2012. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agrofor. Syst.* **86**(2), 243–253, DOI:10.1007/s10457-011-9434-z.
- Niether W., Jacobi J., Blaser W.J., Andres C. & Armengot L., 2020. Cocoa agroforestry systems versus monocultures: a multi-dimensional meta-analysis. *Environ. Res. Lett.* **15**(10), 104085, DOI:10.1088/1748-9326/abb053.
- Norgrove L. & Hauser S., n.d. Carbon stocks in shaded *Theobroma cacao* farms and adjacent secondary forests of similar age in Cameroon.
- Norris K., Asase A., Collen B., Gockowski J., Mason J., Phalan B. & Wade A., 2010. Biodiversity in a forest-agriculture mosaic – The changing face of West African rainforests. *Biol. Conserv.*, Conserving complexity: Global change and community-scale interactions **143**(10), 2341–2350, DOI:10.1016/j.biocon.2009.12.032.
- Obeng, Godfred Adduow, 2025. Organic cocoa governance and its implications on sustainable production : A case analysis of Ghana and Ivory Coast.

- Okoffo E.D., Mensah M. & Fosu-Mensah B.Y., 2016. Pesticides exposure and the use of personal protective equipment by cocoa farmers in Ghana. *Environ. Syst. Res.* **5**(1), 17, DOI:10.1186/s40068-016-0068-z.
- Olczak M., Piebalgs A. & Balcombe P., 2023. A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness. *One Earth* **6**(5), 519–535, DOI:10.1016/j.oneear.2023.04.009.
- Onyeaka H., Nwauzoma U.M., Akinsemolu A.A., Tamasiga P., Duan K., Al-Sharify Z.T. & Siyanbola K.F., 2024. The ripple effects of climate change on agricultural sustainability and food security in Africa. *Food Energy Secur.* **13**(5), e567, DOI:10.1002/fes3.567.
- Pérez-Neira D., Schneider M. & Armengot L., 2020. Crop-diversification and organic management increase the energy efficiency of cacao plantations. *Agric. Syst.* **177**, 102711, DOI:10.1016/j.agsy.2019.102711.
- Petersson H., Holm S., Ståhl G., Alger D., Fridman J., Lehtonen A., Lundström A. & Mäkipää R., 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *For. Ecol. Manag.* **270**, 78–84, DOI:10.1016/j.foreco.2012.01.004.
- Plas B. & Ruf F., 2024. QUELLE AGROFORESTERIE CACAOYERE POUR QUELLES CHAINES DE VALEUR DU BOIS ? CAS.
- Ramachandran Nair P.K., Mohan Kumar B. & Nair V.D., 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **172**(1), 10–23, DOI:10.1002/jpln.200800030.
- Ramachandran Nair P.K., Nair V.D., Mohan Kumar B. & Showalter J.M., 2010. Chapter Five - Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In: Sparks, D.L. ed. *Advances in Agronomy*. Academic Press, 237–307.
- Rodrigues C.I.D., Brito L.M. & Nunes L.J.R., 2023. Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review. *Soil Syst.* **7**(3), 64, DOI:10.3390/soilsystems7030064.
- Romero F.C., n.d. Biomass and nutrient distribution in cacao trees (*Theobroma cacao*): A case study in Cote d'Ivoire.
- 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.
- Saj S., Jagoret P. & Todem Ngogue H., 2013. Carbon storage and density dynamics of associated trees in three contrasting *Theobroma cacao* agroforests of Central Cameroon. *Agrofor. Syst.* **87**(6), 1309–1320, DOI:10.1007/s10457-013-9639-4.
- Schroth G., Bede L.C., Paiva A.O., Cassano C.R., Amorim A.M., Faria D., Mariano-Neto E., Martini A.M.Z., Sambuichi R.H.R. & Lôbo R.N., 2015. Contribution of agroforests to landscape carbon storage. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* **20**(7), 1175–1190, DOI:10.1007/s11027-013-9530-7.
- SciSpace Literature Review | AI Agent for conducting reviews, August-15-2025. . <https://scispace.com/search>, (15/08/2025).
- Singh A.K., Singh B.K., Kumar N.M., Karada M.S., Agnihotri D. & Singh R., 2023. Agroforestry as a Mechanism for Reforestation: Scenarios within REDD+.
- Smith Dumont E., Gnahoua G.M., Ohouo L., Sinclair F.L. & Vaast P., 2014. Farmers in Côte d'Ivoire value integrating tree diversity in cocoa for the provision of ecosystem services. *Agrofor. Syst.* **88**(6), 1047–1066, DOI:10.1007/s10457-014-9679-4.
- Somarriba E., Cerda R., Orozco L., Cifuentes M., Dávila H., Espin T., Mavisoy H., Ávila G., Alvarado E., Poveda V., Astorga C., Say E. & Deheuvels O., 2013a. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric. Ecosyst. Environ.* **173**, 46–57, DOI:10.1016/j.agee.2013.04.013.

- Tiesse C.B., Wandan E.N. & N'da H.D., 2017. Apport De La Teledetection Pour Le Suivi SpatioTemporel De L'occupation Du Sol Dans La Region Montagneuse Du Tonkpi (Cote D'ivoire). *Eur. Sci. J. ESJ* **13**(15), 310, DOI:10.19044/esj.2017.v13n15p310.
- Tito M.R., León M.C. & Porro R., n.d. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales.
- Tosto A., Zuidema P.A., Goudsmit E., Evers J.B. & Anten N.P.R., 2022. The effect of pruning on yield of cocoa trees is mediated by tree size and tree competition. *Sci. Hortic.* **304**, 111275, DOI:10.1016/j.scienta.2022.111275.
- Unlocking Potential State of the Voluntary Carbon Markets 2017.pdf, n.d. .
- Upreti G., 2023. Climate Change and Its Threat to Humanity in the Anthropocene. In: Upreti, G. ed. *Ecosociocentrism: The Earth First Paradigm for Sustainable Living*. Cham: Springer Nature Switzerland, 137–162.
- Vaast P. & Somarriba E., 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agrofor. Syst.* **88**(6), 947–956, DOI:10.1007/s10457-014-9762-x.
- Vervuurt W., Slingerland M.A., Pronk A.A. & Van Bussel L.G.J., 2022. Modelling greenhouse gas emissions of cacao production in the Republic of Côte d'Ivoire. *Agrofor. Syst.* **96**(2), 417–434, DOI:10.1007/s10457-022-00729-8.
- 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.
- Williams C.A., Hanan N.P., Neff J.C., Scholes R.J., Berry J.A., Denning A.S. & Baker D.F., 2007. Africa and the global carbon cycle. *Carbon Balance Manag.* **2**(1), 3, DOI:10.1186/1750-0680-2-3.
- Wood G.A.R. & Lass R.A., 2008. *Cocoa*, John Wiley & Sons, 650.
- World Bank, August-17-2025. La Côte d'Ivoire reçoit 35 millions de dollars en paiement d'une réduction vérifiée de ses émissions de carbone. *World Bank*. <https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2024/06/14/cote-ivoire-receives-35-million-payment-for-verified-reduction-of-carbon-emissions>, (17/08/2025).
- World Bank, 2025. *State and Trends of Carbon Pricing 2025*, Washington, DC: World Bank, 1.
- Yao M.K., Koné A.W., Otinga A.N., Kassin E.K. & Tano Y., 2021. Carbon and nutrient cycling in tree plantations vs. natural forests: implication for an efficient cocoa agroforestry system in West Africa. *Reg. Environ. Change* **21**(2), 44, DOI:10.1007/s10113-021-01776-0.
- Zo-Bi I.C. & Hérault B., 2023. Promouvoir l'agroforesterie ? Les leçons de la Côte d'Ivoire: Version française. *BOIS FORETS Trop.* **356**, 93–98, DOI:10.19182/bft2023.356.a37132.

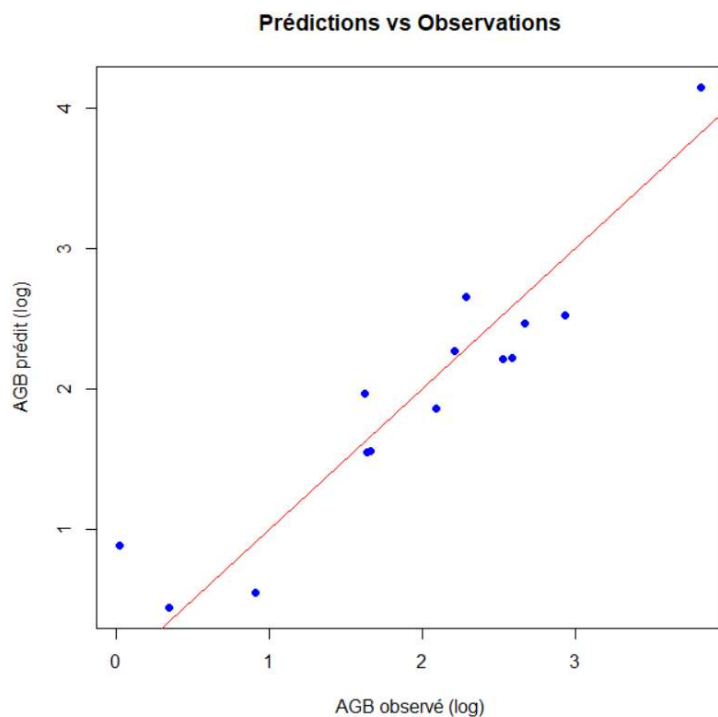
10. Annexes

Annexe 1 - Equation allométrique linéaire

Equation	R ²	R ² ajusté	AIC	BIC
M1: $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30})$	0.870	0.860	16.712	18.629
M2: $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30}) + c \times \ln(\text{H})$	0.871	0.848	18.626	21.182
M3 : $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30}) + c \times \ln(\text{D_houp})$	0.877	0.855	17.956	20.512
M4 : $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30}) + c \times \ln(\text{H}) + d \times \ln(\text{D_houp})$	0.877	0.841	19.935	23.130
M5 : $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30}) + c \times \ln(\text{aire})$	0.877	0.855	17.956	20.512
M6: $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{D30}) + c \times \ln(\text{H}) + d \times \ln(\text{aire})$	0.877	0.841	19.935	23.130
M7 : $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{DBH})$	0.778	0.760	24.221	26.138
M8 : $\ln(\text{AGB}) = a + b \times \ln(\text{DBH}) + c \times \ln(\text{H})$	0.801	0.765	24.686	27.242

Le modèle retenus : M1 : $\text{AGB} = 0.1092 \times \text{D}_{30}^{1.8943}$

Qualité de l'ajustement



Annexe 2 - Equation allométrique linéaire sans le cacaoyers aberrant

Statistiques descriptive sans l'arbre aberrant

Variable	Min	Max	Moyenne	Mediane	Ecart_type	CV_pourcent
Age	5.00	15.00	10.15	10.00	3.65	35.93
D_0.3	4.07	13.08	8.79	9.10	3.00	34.12
DBH	2.83	9.87	6.68	6.68	2.61	39.03
D_houppier	200.00	485.00	327.08	342.50	91.25	27.90
H_m	3.00	7.00	5.02	5.00	1.20	23.84
densite_tronc_gcm3	0.28	0.40	0.34	0.33	0.03	10.42
AGB_seche_kg	1.02	18.83	8.18	8.07	5.46	66.74
aire_houp	1963.50	11546.58	5628.61	5758.26	2935.65	52.16

Modèles à tester et résultats

Modele	Equation	R2	R2_adj	AIC	Mallows_Cp	RMSE	p_value
1 L3	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(Dh)$	0.8609	0.8331	15.61	2.00	0.324	0.000052
4 L5	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(aire)$	0.8609	0.8331	15.61	2.00	0.324	0.000052
3 L1	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30)$	0.8407	0.8262	15.36	1.31	0.347	0.000010
13 L9	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(Dh) + d \times \ln(D30) \times \ln(Dh)$	0.8644	0.8191	17.28	3.78	0.320	0.000304
9 L4	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(H) + d \times \ln(Dh)$	0.8609	0.8146	17.60	4.00	0.324	0.000340
6 L6	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(H) + d \times \ln(aire)$	0.8609	0.8146	17.60	4.00	0.324	0.000340
5 L2	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(H)$	0.8418	0.8101	17.28	3.24	0.346	0.000099
11 L12	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(D30)^2 + d \times \ln(D30)^2 \times \ln(Dh)$	0.8628	0.7942	19.42	5.88	0.322	0.001577
14 L13	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(Dh) + d \times \ln(H) + e \times \ln(Dh) \times \ln(H)$	0.8618	0.7926	19.52	5.95	0.323	0.001624
7 L15	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(Dh) + d \times \ln(H) + e \times \ln(Dh) \times \ln(H)$	0.8618	0.7926	19.52	5.95	0.323	0.001624
15 L10	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(H) + d \times \ln(D30) \times \ln(H)$	0.8428	0.7903	19.20	5.18	0.345	0.000585
10 L11	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(D30)^2 + d \times \ln(D30)^2 \times \ln(H)$	0.8488	0.7731	20.69	6.79	0.338	0.002300
8 L14	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(D30) + c \times \ln(D30)^2 + d \times \ln(Dh) + e \times \ln(H) + f \times \ln(D30)^2 \times \ln(Dh)$	0.8629	0.7649	21.42	7.87	0.322	0.006261
12 L8	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(DBH) + c \times \ln(H)$	0.7276	0.6732	24.34	10.62	0.454	0.001499
2 L7	$\ln(AGB) = a + b \times \ln(DBH)$	0.6940	0.6662	23.85	10.80	0.481	0.000406

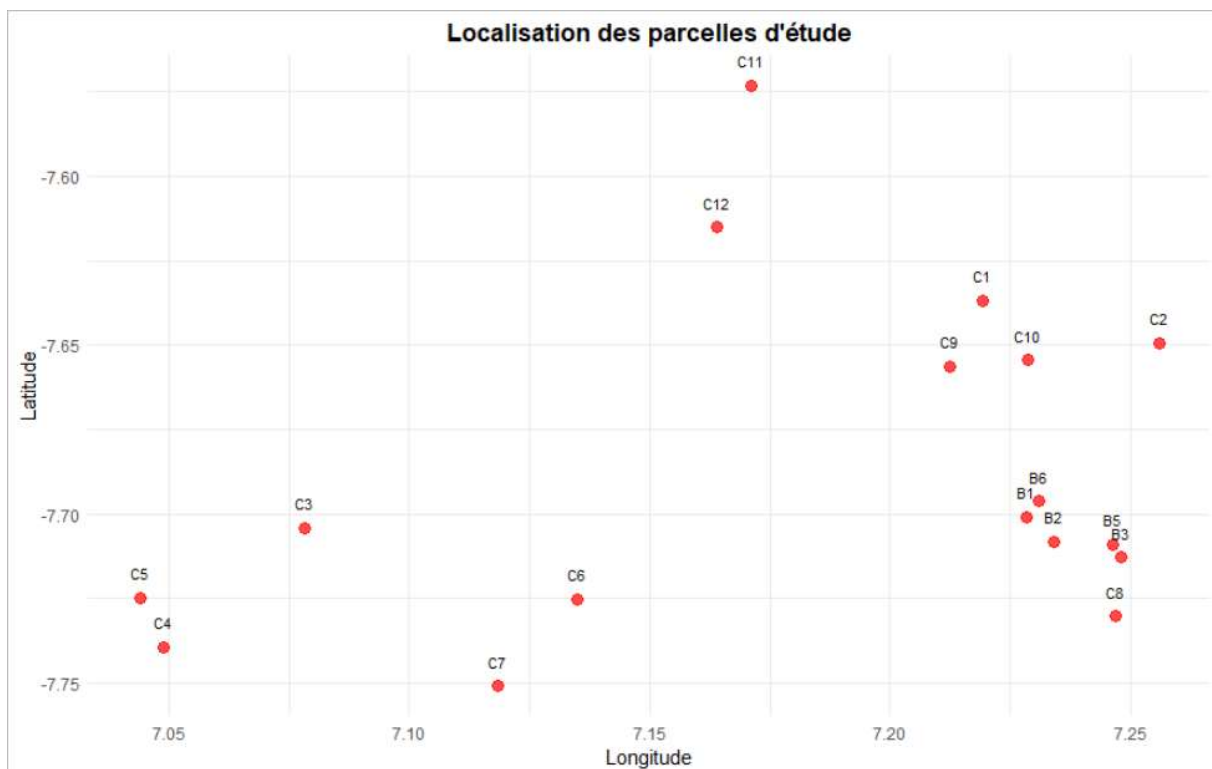
Annexe 3 - Equation allométrique non linéaire sans le cacaoyer aberrant

Résultats

Modele	R2_pseudo	AIC	BIC	RMSE
1 Modele 1	0.7408	68.41	70.11	2.6687
2 Modele 2	0.7414	70.39	72.65	2.6660
3 Modele 3	0.7586	69.49	71.75	2.5758
4 Modele 4	0.7586	69.49	71.75	2.5758
5 Modele 5	0.7653	71.12	73.95	2.5394
6 Modele 6	0.7653	71.12	73.95	2.5394
7 Modele 7	0.7503	67.93	69.63	2.6196
8 Modele 8	0.6933	70.60	72.30	2.9029
9 Modele 9	0.6933	72.60	74.86	2.9029
10 Modele 10	0.6973	70.43	72.13	2.8840
11 Modele 11	0.5292	76.17	77.87	3.5970
12 Modele 12	0.5451	77.73	79.99	3.5356

Annexe 4 - Etudes du facteur localisation sur les stocks de SOC

La figure représente la répartition spatiale des différentes parcelles étudiées. Les parcelles en agriculture biologique sont fortement rassemblées. Les parcelles en agriculture conventionnelle sont réparties assez homogènement sur la zone d'étude.

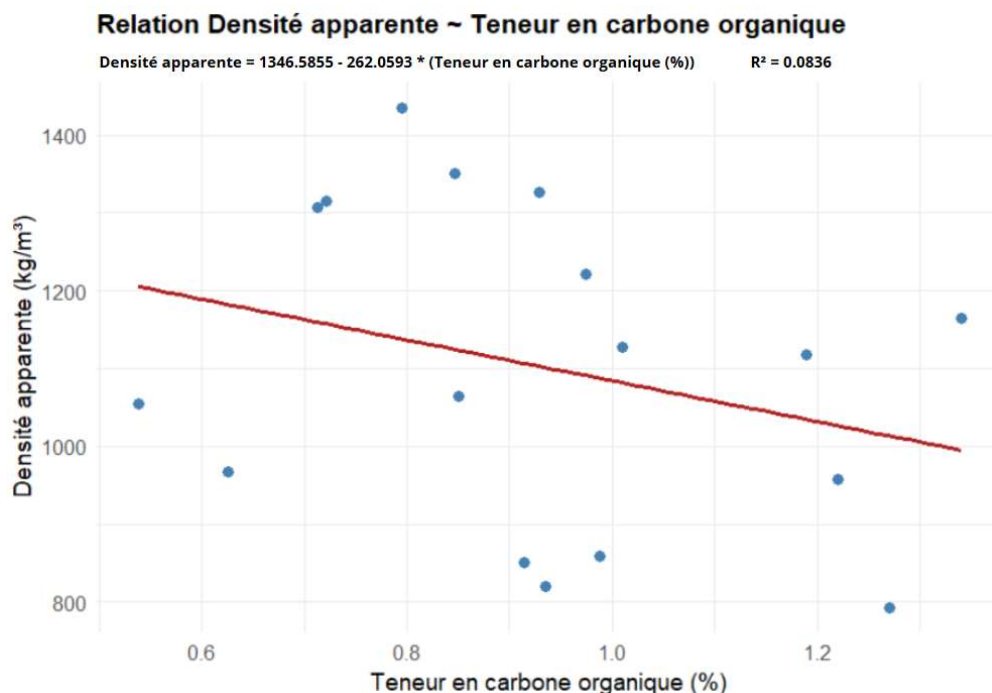


Le tableau présente L'indice de Moran pour les stocks de SOC à différentes profondeur. Cet indice évalue l'autocorrélation spatiale en mesurant si les parcelles géographiquement proches présentent des valeurs de SOC similaires (autocorrélation positive), différentes (autocorrélation négative), ou distribuées de manière aléatoire. Les résultats révèlent l'absence d'autocorrélation spatiale significative pour toutes les profondeurs ($p > 0.05$), avec des indices proches de zéro, indiquant une distribution spatiale aléatoire des stocks de carbone organique.

Profondeur	Indice de Moran	P-value
0-10 cm	-0.10	0.59
10-20 cm	-0.02	0.39
20-30 cm	-0.19	0.78
0-30 cm	-0.05	0.47
Teneur C	-0.0454	0.4514
BD	-0.0580	0.4874

Tableau : Indice de Moran pour les stocks de SOC à différentes profondeur et la teneur en carbone et la densité apparente

Annexe 5 - Relation linéaire entre la densité apparente et la teneur carbone organique pour chaque parcelles



Annexe 6 - Analyse par classe de la relation entre le gradient de surface terrière et les stocks de carbone organique du sol

1) Surface terrière par classe

Une méthodologie d'analyse par classes de GHA a été développée pour compléter l'approche de régression continue en permettant une interprétation plus directe des seuils d'effet de l'ombrage sur le stockage de carbone.

La variable continue GHA a été transformée en classes discrètes de cinq unités définies par les intervalles 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 m²/hectare avec respectivement n=6, n=6, n=3 et n=2 parcelles dans chaque classe. Pour ce faire, la fonction cut de R a été utilisée avec les paramètres include.lowest = TRUE et right = FALSE pour créer des facteurs ordonnés.

L'analyse statistique a débuté par l'évaluation des conditions nécessaires aux tests paramétriques à travers le test de normalité de Shapiro-Wilk, et l'homogénéité des variances entre classes a été vérifiée par le test de Levene. Cependant, la majorité des analyses ont révélé que les conditions d'application de l'ANOVA paramétrique n'étaient pas respectées, principalement en raison d'effectifs trop réduits dans certaines classes empêchant l'application du test de Shapiro-Wilk ou de distributions non-normales dans au moins une classe, conduisant systématiquement au choix du test de Kruskal-Wallis comme méthode statistique appropriée.

2) Stock de soc pour différentes profondeurs

Le tableau 11 présente les moyenne +/- écart-type des stocks de soc à chaque profondeur en fonctions des classes de surface terrière. Les stocks totaux (0-30 cm) sont les plus élevée pour la classe 10-15 et le plus faible pour la classe 5-10. Le stock maximum sur tout le profil (0-30

cm) est de 46,3 tonnes/hectare dans la première classe. Le minimum est de 18,2 t/ha dans la classe 5-10. Les tests de Kruskal-Wallis ne montrent aucune différence significative entre les classes, quelle que soit la profondeur.

Tableau : Moyenne et écart-type des stock de SOC par classe et par profondeur

Classe (m ² /ha)	N	Soc 0-10	Soc 10-20	Soc 20-30	Soc 0-30
0-5	6	14.18 ± 3.49	11.32 ± 4.83	7.04 ± 2.23	32.54 ± 8.9
5-10	6	12.65 ± 2.3	7.85 ± 2.41	5.69 ± 2.48	26.19 ± 6.86
10-15	3	15.67 ± 0.8	11.01 ± 0.58	8.84 ± 0.45	35.53 ± 1.43
15-20	2	13.61 ± 1.13	9.75 ± 1.3	7.86 ± 1.91	31.21 ± 4.34
P-value		0.297394	0.168477	0.275930	0.186731

La figure 17 présente les boîtes à moustaches des stocks de SOC pour les différentes profondeurs en fonction des classes de surface terrière. On remarque une plus grande variabilité dans les deux premières classes, où 6 parcelles sont regroupées par classe, que dans les deux dernières classes avec respectivement 3 et 2 parcelles. La variabilité la plus faible est pour la classe 10-15, qui représente également les stocks les plus importants. Pour chaque profondeur, les stocks sont plus importants sur les couches supérieures et diminuent avec la profondeur.

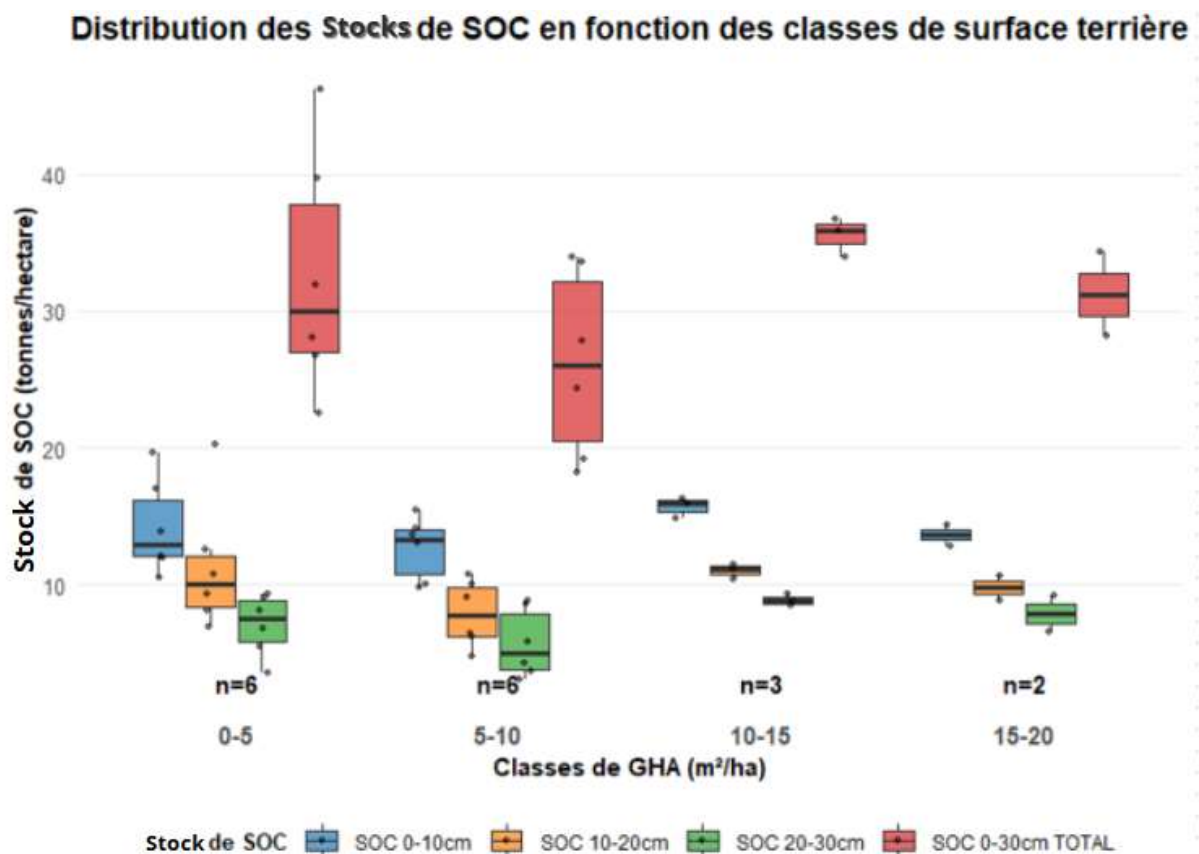


Figure : Stock de Soc en fonction de la profondeur et de la classe.