

Contribution des écosystèmes de plantation d'anacardier à la séquestration du stock de carbone dans la zone soudano-guinéenne du Centre-Bénin à partir des images sentinel-2a

Alain ABI-KABEROU^{1*}, Lambert ZOUNTCHEGNON², Bruno DJOSSA¹ et Jean-Paul RUDANT³

¹ Université Nationale d'Agriculture (UNA), Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques et de l'Eau (EDSAE), Laboratoire des Sciences Végétales, Horticoles et Forestières (LaSVHF), BP 910 Abomey-Calavi, Bénin

² Université de Parakou (UP), Laboratoire d'Ecologie et de Botanique et de Biologie Végétale (LEB), Bénin

³ Université Gustave Eiffel, ENSG, IGN, Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LASTIG), F-77454 Marne-la-Vallée, France

(Reçu le 23 Octobre 2023 ; Accepté le 05 Décembre 2023)

* Correspondance, courriel : abisadock20@gmail.com

Résumé

L'objectif de ce travail a été de proposer une démarche pour l'évaluation de la contribution des écosystèmes de plantation d'anacardier à la séquestration du stock de carbone dans la zone soudano-guinéenne du centre-Bénin. La variabilité de la biomasse et du stock de carbone aérienne des plantations d'*Anacardium occidentale* a été estimée dans la zone soudano-guinéenne du centre-Bénin. La démarche méthodologique utilisée est essentiellement basée sur l'approche « non destructive » fondée sur l'utilisation du modèle allométrique existant sur l'espèce dans la zone d'étude. Au total, 183 placettes ont été installées dans 6 différents types d'utilisation des terres. A l'intérieur des placettes, l'inventaire et les données dendrométriques ont été collectées sur toutes les espèces dans les différentes formations végétales. Les résultats indiquent globalement que, les plantations et les zones agroforestières stockent respectivement en moyenne ($120,63 \pm 87,92 \text{ t. ha}^{-1}$) et ($113,75 \pm 76,18 \text{ t. ha}^{-1}$) tandis que les forêts denses ; les savanes arborées et arbustives et les terres cultivées stockent en moyenne ($25,03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1}$) ; ($35,95 \pm 24,96 \text{ t. ha}^{-1}$) et ($7,80 \pm 4,96 \text{ t. ha}^{-1}$). L'analyse de la variance montre que les stocks de carbone varient significativement entre les unités d'utilisation des terres discriminées dans la zone d'étude ($F = 2,38$; $p < 0,001$).

Mots-clés : *plantation d'anacardier, stock de carbone, équation allométrique, zone soudano-guinéenne, utilisation des terres.*

Abstract

Contribution of cashew plantation ecosystems to carbon stock sequestration in the Sudano-Guinean zone of Central Benin using sentinel-2a images

The aim of this study was to propose an approach for assessing the contribution of cashew plantation ecosystems to carbon stock sequestration in the Sudano-Guinean zone of central Benin. The variability of the biomass and above-ground carbon stock of western *Anacardium* plantations was estimated in the Sudano-

Guinean zone of central Benin. The methodological approach used is essentially based on a "non-destructive" approach using the existing allometric model for the species in the study area. A total of 183 plots were set up in 6 different land-use types. Within the plots, inventory and dendrometric data were collected on all species in the different plant formations. Overall, the results indicate that plantations and agroforestry zones store an average of $(120.63 \pm 87.92 \text{ t. ha}^{-1})$ and $(113.75 \pm 76.18 \text{ t. ha}^{-1})$ respectively, while dense forests, tree and shrub savannahs and cultivated land store an average of $(25.03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1})$, $(35.95 \pm 24.96 \text{ t. ha}^{-1})$ and $(7.80 \pm 4.96 \text{ t. ha}^{-1})$. Analysis of variance shows that carbon stocks vary significantly between the land use units discriminated in the study area ($F= 2.38$; $p < 0.001$).

Keywords : *cashew plantation, carbon stock, allometric equation, Sudano-Guinean area, land use.*

1. Introduction

Les forêts représentent le plus grand stock de carbone aérien de la biosphère terrestre. La déforestation, la dégradation des forêts et la repousse sont des flux importants au niveau mondiale. Les émissions dues aux changements d'usage de terre représentent environ la moitié des émissions du secteur AFAT (Agriculture Forêt et autre utilisation des Terres) [1]. La déforestation et la dégradation des forêts contribuent approximativement de 12 à 20 % aux émissions globales des gaz à effet de serre dans l'atmosphère [2, 3]. Aussi, la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation, la conservation de la biodiversité, la gestion durable des forêts et le renforcement des stocks de carbone forestier (REDD+) dans les pays en développement sont devenus des cadres importants pour atténuer le changement climatique et limiter la hausse de la température mondiale à plus de 2 °C [4]. Ainsi l'estimation globale des stocks de carbone forestier a pris une place prépondérante dans le programme de recherche avec des implications importantes en matière d'écologie de politique et de conservation [5]. Cependant, les plantations d'espèces à croissance rapide offrent des rendements beaucoup plus élevés et captent plus rapidement du carbone sur des périodes plus courtes [6]. Par ailleurs, des observations de [7] montrent que les forêts tropicales qui se régénèrent sur d'anciennes terres agricoles accumulent de la biomasse plus rapidement que celles qui repoussent sur d'anciens pâturages (probablement en raison de la compaction des sols). Certains experts proposent donc d'opter pour des pratiques agroforestières afin de réduire les pertes de superficies forestières [8]. Dans les systèmes agroforestiers et forestiers, la capacité de séquestration du carbone est considérablement plus élevée que dans les systèmes agricoles, principalement en raison de la présence accrue de biomasse aérienne [9 - 11]. La quantité de carbone séquestrée dépend de plusieurs facteurs, tels que les espèces d'arbres utilisées, les conditions géographiques (climat et sol), les densités de plantation et la gestion globale du système [12]. Ils estiment qu'une culture agroforestière dans une région humide peut capturer en moyenne environ 50 tonnes de carbone par hectare. Il existe toute une série de données de télédétection satellitaire basse, haute et très haute résolution, qui permettent de caractériser et de cartographier la biomasse et le stock de carbone les dynamiques spatiales qui s'opèrent à différentes échelles au sein de la biosphère. La multiplicité des sources et des politiques spatiales oblige à adapter les protocoles d'extraction d'informations en fonction de l'objet étudié et de la zone d'étude, d'où une littérature abondante et diversifiée sur le sujet. Les équations allométriques, qui permettent de prédire la biomasse d'un arbre à partir de caractéristiques dendrométriques plus faciles à mesurer (telles que son diamètre ou sa hauteur) sont des éléments clés pour l'estimation de la contribution des écosystèmes forestiers au cycle du carbone. Les estimations des stocks de carbone aériens basé sur les inventaires de terrain et sur des approches de télédétection ont permis de réaliser des progrès substantiels dans la cartographie des stocks de carbone forestier à grande échelle [13, 16]. Cette spatialisation peut être opérée selon différentes approches et à différentes échelles pour produire in fine des cartes de biomasse. De façon globale, la biomasse forestière

peut être estimée à trois échelles spatiales successives : l'arbre, le peuplement et la région [17]. A l'échelle spécifique des arbres, elle peut être évaluée soit par la méthode directe, soit par la méthode indirecte, ou par les techniques de la télédétection, plusieurs études se sont focalisées sur l'estimation de la biomasse aérienne au détriment de la biomasse souterraine, dont l'évaluation reste difficile et est peu précise [18, 22]. Par ailleurs, de nombreuses études [4, 20, 23] ont montré que les espèces dominantes qui impriment la physionomie de la végétation contribuent plus au stockage de la biomasse. Ce sont elles qui doivent être considérées dans l'élaboration des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse des écosystèmes forestiers [4, 20]. En Afrique subsaharienne et en particulier dans les pays d'Afrique de l'Ouest, la plupart des estimations des stocks de carbone totaux ont également utilisé des modèles allométriques ainsi que des données d'inventaire forestier [24, 25]. Grâce à ces méthodes, il est possible de combiner les données de la télédétection pour spatialiser les estimations de la biomasse forestière et le stock de carbone afin de produire des cartes à différentes échelles [16, 26]. Jusqu'à présent, la majorité des études se sont concentrées sur les écosystèmes forestiers, des espèces d'arbres spécifiques ou des plantations pour l'estimation de l'AGB et des stocks de carbone [27 - 29]. L'estimation de la biomasse est une étape indispensable à l'évaluation du stock de carbone des écosystèmes [30]. Très peu d'études ont traité de l'estimation du carbone aérien des plantations d'anacarde dans les paysages agricoles [31] utilisant les données combinées de terrain in situ et de la télédétection pour la spatialisation de la biomasse et du stock de carbone au Bénin [4]. Il en résulte un manque d'informations précises sur les stocks de biomasse entravant l'évaluation de la contribution des écosystèmes forestiers et en particulier des plantations d'anacardier du pays dans la mitigation du changement climatique à travers la séquestration du carbone. De telle méthode peut permettre de détecter et de quantifier la variation de la contribution des écosystèmes des plantations d'anacardier à la séquestration du carbone aérien dans l'espace. Pour combler ces insuffisances, la présente étude propose une méthodologie pour évaluer la contribution des plantations d'anacardier dans la savane soudano-guinéenne à l'aide d'imageries satellites à très haute résolution spatiale dérivées des données d'utilisation et d'occupation des terres et des modèles allométriques existantes dans la zone agro-climatique soudano-guinéenne basés sur les données de la méthode non destructive. Cette étude permettra de produire des connaissances pouvant orienter la prise de décisions. L'hypothèse qui sous-tend cette étude stipule que le stock de carbone aérien des plantations d'anacardier d'un écosystème varie en fonction des types d'occupation du sol.

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre de l'étude

L'étude a été conduite dans la zone soudano-guinéenne plus précisément dans la commune de Savè en République du Bénin (*Figure 1*). La commune de Savè est située dans la partie centrale du Bénin dans le département des collines entre 7°41' et 8°20' de latitude nord et entre 2°20' et 2°45' de longitude est. Elle s'étend sur une superficie de 2228 Km². Elle est subdivisée en huit (08) arrondissements à savoir : Besse, Kaboua, Offe, Okpara, Sakin, Adido, Boni et Savè (qui est le Chef-lieu d'Arrondissement). La zone d'étude est limitée au nord par la commune de Ouessè, au sud par la commune de Kétou dans le département du Plateau, à l'ouest par les communes de Glazoué et de Dassa-Zoumè, à l'est par les Etats d'Oyo, de Kwara et d'Ogoun de la République Fédérale du Nigéria. Savè, le chef-lieu de la commune, est situé, à environ 255 km de Cotonou. Il est traversé par la RNIE 2 et la RNIE 5 (Savè - Oké-Owo).

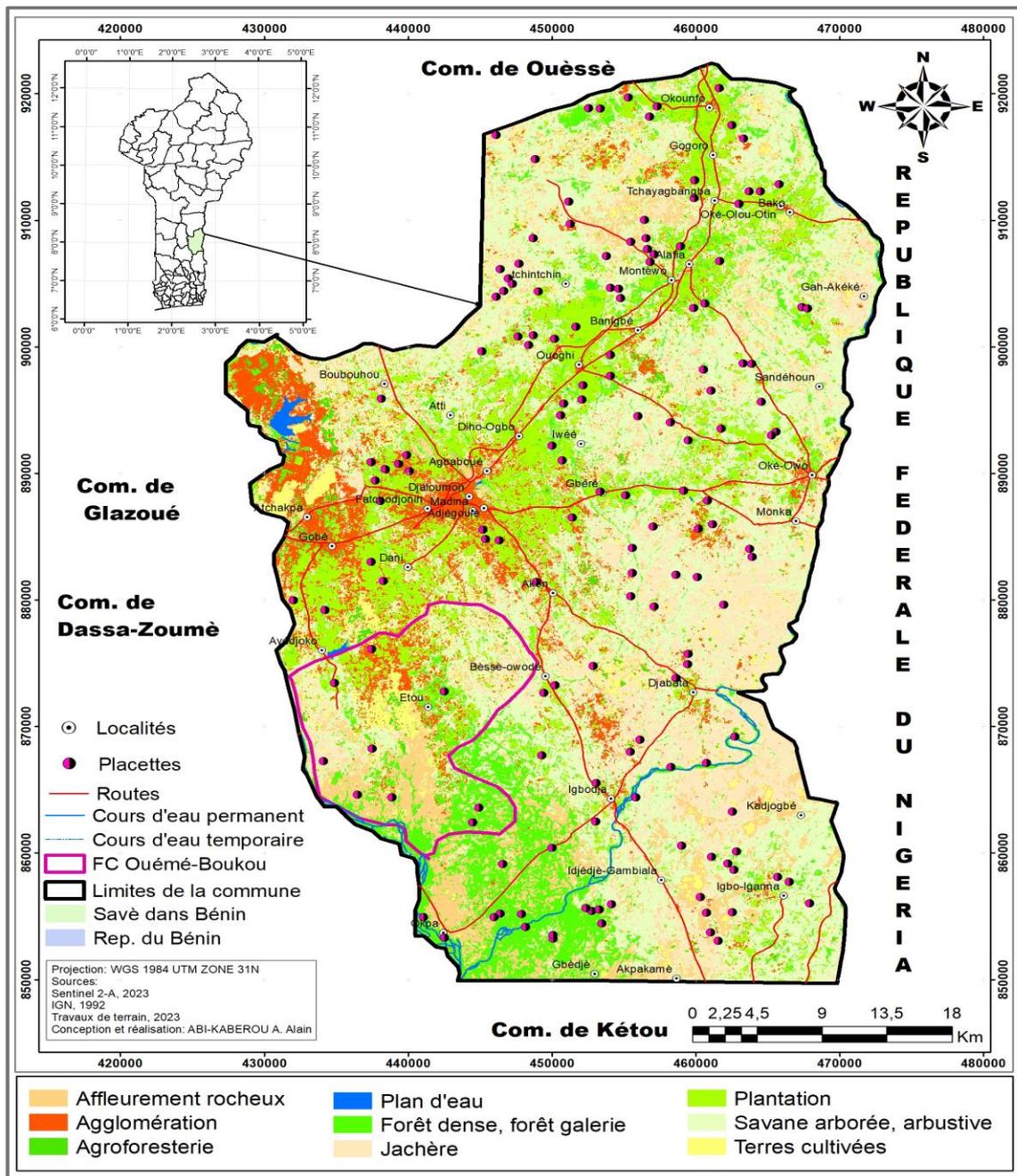


Figure 1 : Occupation du sol de la zone d'étude en 2023

2-2. Méthode d'estimation du stock de carbone de la zone

L'étude a impliqué une analyse approfondie des images satellitaires pour classifier avec précision les différents types d'utilisation/occupation des terres. Un inventaire forestier complet a été effectué dans chaque classe d'Usage des Terres et de la Couverture des Sols (LULC) identifiée dans la zone d'étude. Les données de biomasse ont été calculées à l'échelle de l'arbre et de la parcelle en utilisant des équations allométriques spécifiques à chaque Unité de Cartographie de l'Aire (LUCa), avec une extrapolation à l'échelle de la zone d'étude. L'abondance de la biomasse a ensuite été convertie en stock de carbone, fournissant une vue complète de la séquestration carbone dans la région. Enfin, la densité de la biomasse et du stock de carbone a été cartographiée de manière détaillée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.4, offrant une représentation spatiale visuelle de ces éléments cruciaux.

2-2-1. Collecte de données

2-2-1-1. Sources de données pour la classification des images

L'estimation de la biomasse aérienne des arbres à l'échelle du paysage de la zone d'étude a été complexe compte tenu de la distribution hétérogène des espèces d'arbres dans les différentes classes d'utilisation des terres. Deux scènes Sentinel 2-A (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) ont été utilisées pour la classification LULC. Les dates d'acquisition étaient le 16 janvier 2023, recouvrant la zone d'étude. Cette date d'acquisition a été choisie car elle correspond bien à la forte activité photosynthétique de la végétation naturelle, des cultures et compense la couverture nuageuse et les perturbations du régime des incendies. Les scènes sélectionnées avaient zéro pour cent de couverture nuageuse. Les images Sentinel 2-A ont été fournies atmosphériquement et géométriquement corrigées. Pour séparer l'agroforesterie et la plantation qui sont facilement confondues avec la végétation naturelle à la résolution Sentinel de 10 m, l'imagerie multispectrale des UAS a été utilisée pour couvrir les zones confuses issues de notre classification de 0,4 m de résolution spatiale à partir de données supplémentaires de vérification au sol (relevés de terrain de données de parcelles de systèmes agroforestiers et de plantations).

2-2-1-2. Etablissement d'une carte maillée de l'indice de végétation à partir des données de l'imagerie sentinelle

Pour sélectionner des points d'échantillonnage qui couvrent adéquatement les différentes classes d'utilisation des terres, les indices spectraux ont d'abord été dérivés et calculés à partir d'une image sentinelle (10 m de résolution). Ces indices ont été choisis en fonction des caractéristiques biophysiques du secteur d'étude. Les équations (1) à (3) du **Tableau 1** sont relatives aux indices de télédétection utilisés. Le NDVI a été utilisé comme entrée dans une analyse par grappes k-moyenne [4] avec le nombre de grappes défini sur le nombre des types d'utilisation des terres utilisées dans l'analyse. Les clusters ont ensuite été utilisés pour la création d'un échantillon aléatoire stratifié dans ArcGIS 10.4. Les centroïdes des pixels sélectionnés ont été utilisés pour établir des tracking à partir desquels les informations sur la zone d'entraînement au sol ont été dérivées pour la classification. Sur la base des données de vérification au sol dérivées pour les points d'échantillonnage, le classifieur Random Forest a été utilisé pour classer les données de l'imagerie à très haute résolution spatiale sentinel 2-A. Pour la classification, les bandes 2, 3, 4 et 8 respectivement bleu, vert, rouge et proche-infrarouge ont été utilisées. L'approche random forest (RF) est une méthode de classification supervisée et non paramétrique largement utilisée dans le domaine de la télédétection [32, 33]. L'algorithme « Random Forest (RF) » est un ensemble de méthodes d'apprentissage statistiques basé sur la construction d'arbres de décision à partir de sous-échantillons tirés de façon aléatoires des données d'observation [34]. L'approche s'accommode mieux aux relations non linéaires entre variables explicatives et variable expliquée. Dans la présente recherche, c'est la régression par forêt aléatoire qui a été utilisée pour déterminer la variabilité du stock de carbone comme fonction des unités de végétation, des paramètres spectraux, des indices spectraux, la distance par rapport aux routes, aux cours d'eau et la densité du réseau routier. Un tirage aléatoire est appliqué aux données de référence. Un arbre de décision est construit à partir de chaque échantillon. Pour chaque arbre est utilisé un sous-échantillon des variables. Par défaut, le nombre de variables pour chaque sous-échantillon est la racine carrée du nombre totale de variables. L'algorithme cherche pour chaque échantillon la variable qui sépare le mieux les classes les unes des autres. Le choix de la variable est obtenu par le calcul de l'entropie. Elle correspond à la pureté d'une classe. On cherche donc à minimiser l'entropie :

$$A = \sum_{i=1}^k \frac{C_i}{n_i} \log_2 \left(\frac{C_i}{n_i} \right) \quad (1)$$

où, k = nombre de classes ; c = effectif de la classe ; n = effectif total.

L'opération est réalisée à chaque nœud de l'arbre. Le nombre de nœuds correspond à la profondeur de l'arbre, c'est un paramètre ajustable, de même que le nombre d'arbres utilisés. Le modèle est obtenu en faisant la moyenne (ou vote majoritaire en cas de variable qualitative) des prédictions de chaque arbre. L'analyse a été effectuée dans R (Team RC, 2003) en utilisant le package randomForest [35].

Tableau 1 : Indices de végétation définis à partir des données de télédétection

Indice spectral	Equation	Formule	Caractéristique	Source
Indices de végétation simple				
Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	(1)	$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$ <i>Avec PIR : réflectance dans la bande proche infrarouge</i> <i>R : Bande rouge</i>	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible, que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil "hot spot"	[36]
Indices de végétation tenant compte des effets du sol				
Indice de stress d'humidité de la végétation (MSI)	(2)	$MSI = MIR / PIR$ <i>MIR : réflectance dans la bande infrarouge moyen</i> <i>PIR : réflectance dans la bande proche infrarouge</i>	Variation en fonction de la teneur en eau des feuilles. Détection des végétaux en état de stress hydrique. Très utiles pour le suivi de la végétation en zone sèche.	[37]
Les indices de stress hydrique de la végétation				
Indice de végétation ajusté au sol (SAVI)	(3)	$SAVI = \frac{PIR - R}{PIR + R + L} (1 + L)$ <i>Avec L = 0,5 pour diminuer l'effet du sol</i> <i>PIR : réflectance dans la bande proche infrarouge</i> <i>R : Bande rouge</i>	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	[38]

2-2-2. Inventaire forestier

Un maillage systématique des strates composées de six unités de végétation (forêt galerie/forêt dense, savane arborée et arbustive, terres cultivées, jachère, plantation, agroforesterie) a été réalisé pour l'évaluation des stocks de biomasse et du carbone dans notre zone d'étude. Nous avons séparé l'agroforesterie et les plantations des terres cultivées, car une augmentation de l'agroforesterie et des plantations pourrait constituer une stratégie d'atténuation du changement climatique. Un inventaire systématique de tous les arbres à l'intérieur des placettes a été effectué pendant de décembre 2022 à Mars 2023). Les mesures des arbres ont été effectuées par échantillonnage non destructif selon l'approche décrite par [39]. En appliquant cette méthode a été appliquée sur l'analyse des espèces inventoriées dans chaque placette. Dans chaque classe d'utilisation des terres, des placettes ont été installées aléatoirement proportionnellement à leur taille en utilisant l'équation de [2]. L'unité d'inventaire (placettes) était de 30 × 30 m dans les terres forestières (galerie forestière, savane arborée et arbustive) [40], [41], de 100 m × 100 m dans les terres cultivées et jachères [4], et de 10 m × 20 m dans les systèmes agroforestiers et les plantations (plantation de teck et d'anacarde). Ces tailles de placettes sont couramment utilisées pour l'inventaire de la végétation ligneuse en Afrique de l'Ouest et répondent à l'aire minimale exigée par Braun-Blanquet. Au total 183 placettes ont été étudié et couvre une superficie totale de 33,55 ha. En résumé les activités suivantes ont été

entreprises en vue de l'utilisation de l'approche non destructive : Mesure de la circonférence de la tige à 1,3 m, et hauteur totale de l'arbre. Dans chaque placette, tous les ligneux avec un diamètre à 1,30 m du sol (DBH) ≥ 5 cm ont été inventoriés. Les données collectées se rapportaient au nom scientifique des espèces, la hauteur des arbres, le diamètre à 1,30m. Un ruban a été utilisé pour les mesures dendrométriques. La hauteur de chaque individu a été déterminée à l'aide d'un clinomètre.

2-2-3. Estimation de la biomasse aérienne

L'estimation des stocks de carbone dans chaque utilisation de terres a nécessité l'utilisation des équations allométriques préexistantes de [42] pour déterminer la biomasse qui sera ensuite convertie en stock de carbone [43]. Dans cette étude, les équations allométriques locales sont retenues pour l'estimation de la biomasse, compte tenu de leur robustesse et précision élevée comparativement aux équations pantropicales [44]. L'équation allométrique de [42] développée pour l'espèce *Anacardium occidentale* a donc été utilisées pour estimer la biomasse des individus dans les différents types d'utilisation des terres discriminées. La biomasse de chaque individu a d'abord été calculée puis agrégée à l'échelle de la placette avant d'être convertie en biomasse à l'hectare. La biomasse totale de chaque unité de végétation a été obtenue en multipliant la biomasse moyenne des placettes de l'unité considérée par sa superficie exprimée en hectare, tandis que l'équation générique de [45] a été appliquée pour estimer l'AGB. Les teneurs en carbone de chacune des espèces ont également été utilisées pour convertir la biomasse en stock de carbone de chaque unité d'occupation. A cause de la diversité des unités d'occupation et de la spécificité des formations végétales au sein du paysage de la zone d'étude, la détermination de la biomasse aérienne des plantations d'anacardier a été faite suivant **l'Équation (2)** allométriques de [42] qu'il a développé dans la même zone climatique (soudano-guinéenne) que notre zone d'étude :

$$B1 = \exp [-1,85645 + 0,01656 + 2,02288 * \ln (Dbh)] \tag{2}$$

$$\text{avec, } Ba = B1 * BEFa \quad \text{et } BEFa = 1,61 \tag{3}$$

Ban : Biomasse aérienne (kg) ; *B1* : Biomasse du fût (kg) ; *D* : diamètre (cm) mesuré à 1,3m au-dessus du sol

L'Équation (3) de la biomasse totale (BT) est la somme de la biomasse aérienne (Ba) et de la biomasse souterraine (Br) de l'ensemble des individus inventoriés. Elle a été d'abord estimée par placette puis par unité de végétation après identification des placettes spécifiques à chacune d'elle. La biomasse totale a été déterminée en sommant les quantités totales de biomasse obtenue pour chaque unité de végétation. Par souci de simplification, les résultats ont été présentés en tonnes par hectare.

$$BT = \begin{cases} Ba + Br \\ \text{ou, avec } Br = Ba * R \\ Ba(1 + R) \end{cases} \tag{4}$$

R : facteur de conversion de la biomasse aérienne en biomasse souterraine. Ce facteur est égal à 0,24 [46].

➤ **Estimation du carbone total**

Pour estimer la quantité de carbone, **l'Équation (5)** intégrant le facteur de conversion proposé par [39] a été utilisé. Ce facteur de conversion a pour valeur 0,487 [47]. Ainsi, la quantité de carbone a été déduite comme suit :

$$CT = BT * 0,487 \tag{5}$$

CT : Carbone totale, *BT* : Biomasse totale.

2-2-4. Spatialisation de la biomasse forestière et du carbone séquestré

L'approche mise en œuvre consiste à construire un modèle en comparant les données NDVI et les stocks de carbone (in situ). L'objectif est d'utiliser ce modèle pour prédire les stocks de carbone uniquement à partir des données de télédétection. Les valeurs prédites sont ensuite utilisées dans un SIG pour obtenir une carte de la zone d'étude [48]. La première étape de ce processus consistait à extraire la valeur NDVI pour chaque placette. Ces valeurs ont été ajoutées à la base de données des placettes. La deuxième étape a consisté à retirer de la base de données les placettes non représentatives du peuplement dans lequel elles étaient placées ou les placettes insuffisantes pour estimer le type de strate auquel elles appartenaient. Cette approche a été choisie car elle élimine les parcelles les plus inégales tout en conservant des nombres suffisants pour le reste de l'analyse. Après cette étape de filtrage, 120 parcelles d'inventaire ont été sélectionnées pour une analyse plus approfondie. Pour cartographier la biomasse et le carbone, le NDVI a été utilisé comme variable prédictive. Ainsi, les valeurs de NDVI ont été extraites des images Sentinel 2A de 2023. Le modèle puissance a été retenue par ce qu'il présente un pouvoir explicatif plus élevé et la plus faible erreur standard après une implémentation de plusieurs modèles. Les données de NDVI ont subi deux types de transformation. La première transformation (type logarithmique) a permis de faire passer les valeurs de NDVI de l'intervalle $[-1 ; 1]$ à $[0 ; 255]$. Ainsi, les valeurs négatives ont pu être évitées dans la manipulation et la visualisation des données [4]. La deuxième transformation sera celle de [49] pour la détermination du paramètre de forme λ suivant la **Formule** :

$$B = \alpha + \beta * NDVI^\lambda + \varepsilon \text{ (Modèle puissance et ses dérivés)} \quad (6)$$

B : biomasse totale ; α , β et δ : coefficients des modèles ; ε : erreur ; NDVI : Indice de différence normalisé de végétation. Toutes les analyses seront exécutées dans le logiciel R 3.5.1 (R Core Team, 2018) et la mise en page cartographique sera faite dans ArcGis 10.4.

2-2-5. Analyse et traitement des données

L'hypothèse de normalité des données a été testée en utilisant le test de Shapiro Wilk. Les données qui ne répondaient pas aux critères de normalité ont subi une transformation logarithmique avant les analyses statistiques [50], [51]. Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a également été utilisée pour déterminer la variation du stock de carbone entre les différentes unités de végétation.

3. Résultats

3-1. Stock de biomasse aérienne dans la zone d'étude

Le stock moyen de biomasse aérien et l'erreur standard associée aux plantations d'anacardier varient de $16,03 \pm 10,19$ à $247,70 \pm 180,54 \text{ T.ha}^{-1}$ avec un intervalle de confiance de 95 %, le stock de biomasse aérienne d'anacardier étant faible ($51,41 \pm 0 \text{ T.ha}^{-1}$) dans les forêts denses et le plus élevé dans les plantations ($247,70 \pm 180,54 \text{ T.ha}^{-1}$) et les zones agroforestières ($233,57 \pm 156,44 \text{ T.ha}^{-1}$), ce qui souligne l'importance de la stratégie d'atténuation utilisant les systèmes agroforestiers dans le débat sur le changement climatique. La carte des stocks de biomasse a été générée à partir de l'équation allométriques développée par [42]. La carte de la **Figure 2** illustre les types de d'utilisation des terres et le stock de biomasse aérien des plantations d'anacardier au niveau de la zone d'étude.

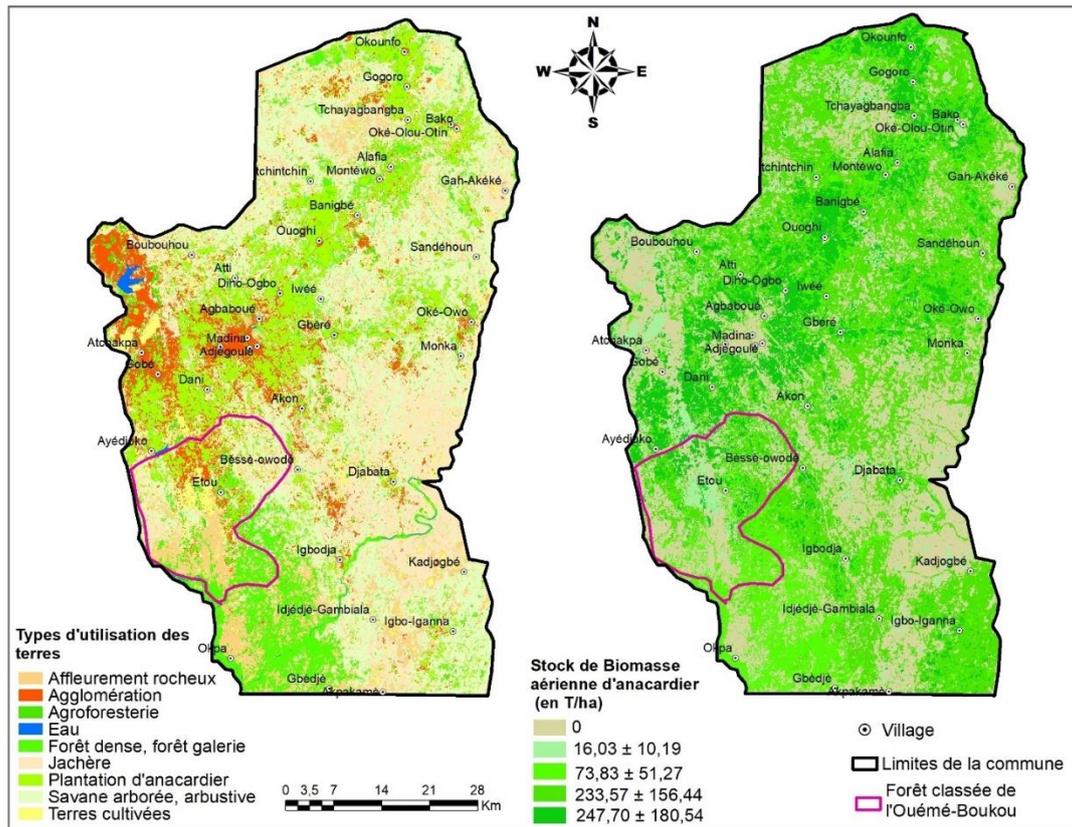


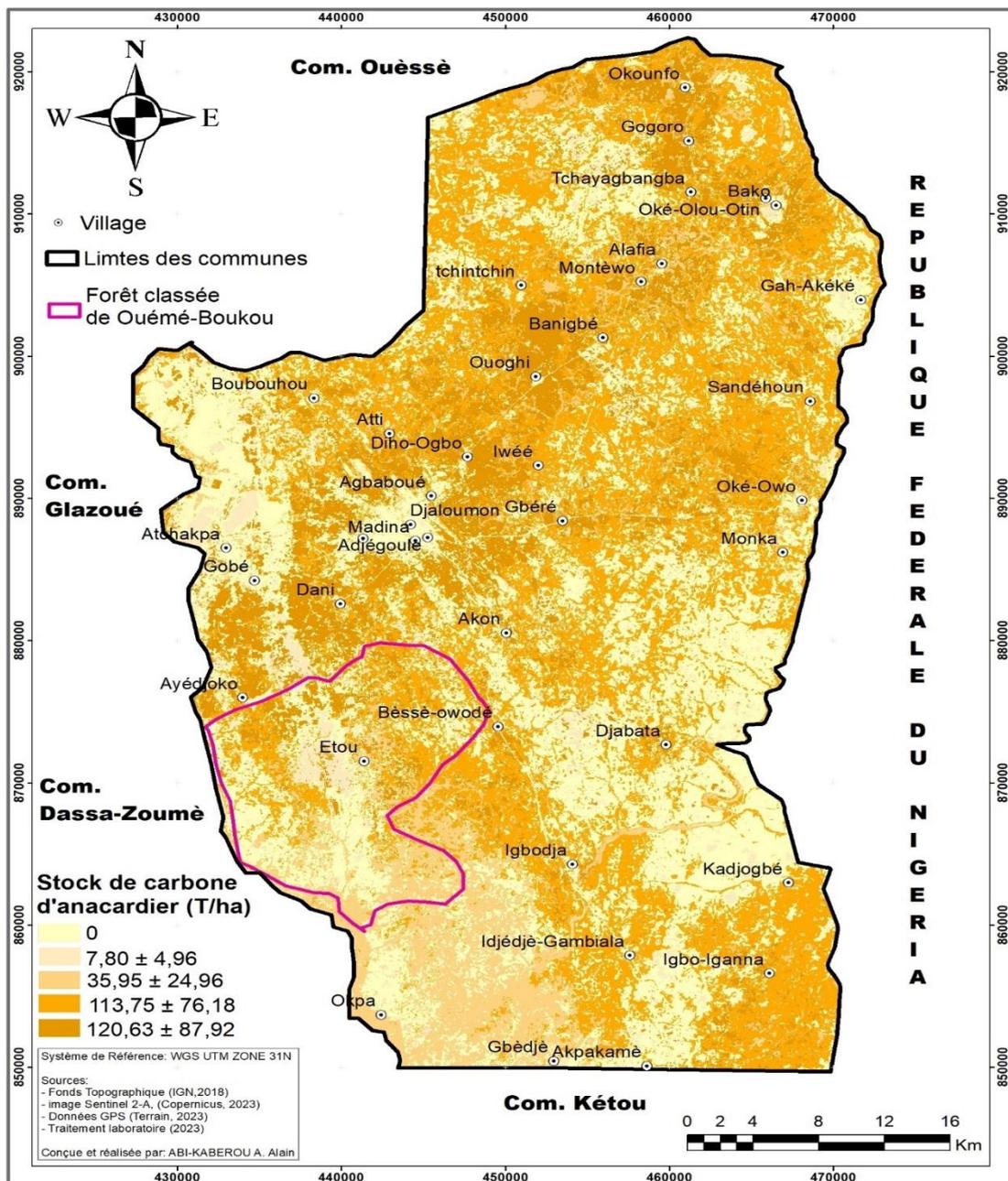
Figure 2 : Types d'utilisation des terres et le stock de biomasse aérien des plantations d'anacardier de la zone d'étude

3-1-1. Distribution spatiale du stock de carbone

Les quantités du stock de carbone aérien d'anacardier dans les unités de végétation discriminées de la zone d'étude sont plus élevées dans les plantations et les zones agroforestières. Tandis que qu'il laisse quelques traces dans les autres classes (Terres cultivées, savane arborée et arbustive et forêt dense). Les stocks de carbone dans l'utilisation des terres des plantations d'anacardiers ($120,63 \pm 87,92 \text{ t. ha}^{-1}$) et les zones agroforestières ($113,75 \pm 76,18 \text{ t. ha}^{-1}$) sont significativement différents de ceux des terres cultivées ($7,80 \pm 4,96 \text{ t. ha}^{-1}$), des savanes arborées et arbustives ($35,95 \pm 24,96 \text{ t. ha}^{-1}$) et des forêts denses ($25,03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1}$). L'analyse de la variance montre que les stocks de carbone varient significativement entre les unités d'utilisation des terres discriminées dans la zone d'étude ($F = 2,38 ; p < 0,001$). Le stock de carbone varie entre 0 à $120,63 \text{ t. ha}^{-1}$ avec une moyenne de $50,53 \pm 32,34 \text{ t. ha}^{-1}$ dans la zone d'étude (**Tableau 2**). En rapportant les stocks de carbone de l'anacardier aux superficies réelles des unités d'utilisation des terres, les zones des plantations et agroforestières donnent respectivement : ($3755655 \pm 2737393,23 \text{ t}$) et ($269617,60 \pm 180581,27 \text{ t}$) tonnes tandis que les savanes arborées et arbustives, la forêt dense et les terres cultivées donnent respectivement : ($2698876,52 \pm 1874115,58 \text{ t}$) ; ($796267,15 \pm 0 \text{ t}$) et ($80337,02 \pm 51064,93 \text{ t}$). Les valeurs nulles de carbone d'anacardier sont observées au niveau des sols nus et des surfaces rocheuses (**Figure 3**).

Tableau 2 : Stock de carbone moyen (T. ha⁻¹) et stock de carbone total (en tonne) avec les données des placettes échantillon

T/Ha	Statistique descriptive				Carbone total des placettes échantillon (tonne)
	Stock de de carbone par type d'utilisation des terres (T. ha ⁻¹)		Intervalle de confiance du stock de carbone (T. ha ⁻¹)		
Types d'utilisation des terres	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	
Terres cultivées	7,80	4,96	7,27	8,34	4771,72
Savane arborée arbustive	35,95	24,96	33,26	38,64	22161,56
Plantation d'anacardier	120,63	87,92	111,15	130,10	37405,35
Forêt dense	25,03	0	-	-	69,85
Agroforesterie	113,75	76,18	105,53	121,96	24906,95

**Figure 3 1: Distribution spatiale du stock de carbone d'anacardier de la zone d'étude**

3-1-2. Corrélations

Il ressort que la corrélation entre les stocks de carbone aérien des plantations d'anacardier et la surface terrière observée est forte ($r^2 = 0,95$). La corrélation entre le stock de carbone et le nombre d'espèces est forte et significative en ce qui concerne le carbone épigé ($r = 0,95$; $p < 0,0001$), Cette corrélation montre qu'il existe des liaisons de dépendance entre les stocks de carbone et la surface terrière (*Figure 4*).

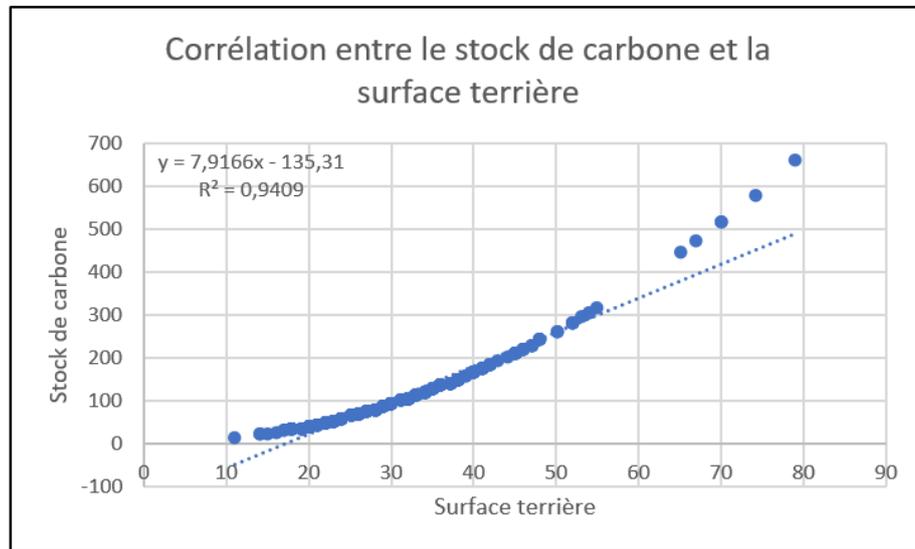


Figure 4 : *Corrélation entre la surface terrière et le stock de carbone*

4. Discussion

Dans notre zone d'étude les quantités de carbone observées dans les écosystèmes des plantations d'anacardier ($120,63 \pm 87,92 \text{ t. ha}^{-1}$) et des zones agroforestières ($113,75 \pm 76,18 \text{ t. ha}^{-1}$) étaient nettement au-delà des autres classes d'occupation du sols (terres cultivées ($7,80 \pm 4,96 \text{ t. ha}^{-1}$), des savanes arborées et arbustives ($35,95 \pm 24,96 \text{ t. ha}^{-1}$) et des forêts denses ($25,03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1}$)), ce qui confirme nos observations sur le terrain. Ces résultats sont largement supérieurs à ceux obtenus par [52] ou ils observaient $80,92 \text{ t. ha}^{-1}$ dans les plantations d'anacardiens et $13,05 \text{ t. ha}^{-1}$ dans les savanes, dans la région du nord Cameroun ainsi qu'aux résultats obtenus par [53] dans les systèmes agroforestiers de d'anacardier âgé de 20 ans ou ils observaient une quantité de 90 t. ha^{-1} . Cette différence se justifie principalement par la densité des arbres d'anacardier qui s'évalue à 269 pieds d'anacardiens/ha dans les plantations et environ 155 pieds d'anacardiens/ha dans les zones agroforestières, une autre explication pourrait être liée à la surface terrière (qui est lié au DBH) ce qui entraîne les importantes réserves de carbone dans les plantations d'anacardiens, ce qui confirme la corrélation positive significative entre la surface terrière et le stock de carbone de l'anacardier observé (*Figure 4*). Ainsi, les arbres de grands diamètres rencontrés dans les plantations et les zones agroforestières peuvent aussi expliquer la forte quantité de carbone de ces écosystèmes, comparativement au stock de carbone des terres cultivées ($7,80 \pm 4,96 \text{ t. ha}^{-1}$), des savanes arborées et arbustives ($35,95 \pm 24,96 \text{ t. ha}^{-1}$) et des forêts denses ($25,03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1}$). En effet, des travaux menés par [54] dans la réserve de Lamto ont montré que la dominance relative, la fréquence relative et la densité relative des espèces dans un milieu pourrait influencer la biomasse et de facto la quantité de carbone séquestré. Ces trois paramètres déterminent l'Indice de valeur d'importance. Cet indice écologique aurait une influence sur le stock de carbone séquestré par un peuplement. Ce qui corrobore avec les observations de

[55] qui estimaient que la quantité de carbone séquestrée par les systèmes agroforestiers dépendent de l'espèce d'arbre, de la densité, de la structure et de l'état de la plantation, de leurs fonction et de la gestion du système et [12] ont rapporté également des régions géographiques (climat, sol). Par ailleurs nos résultats corroborent avec les observations de [56], dans les plantations de *Tectona grandis* (Teck) au Panama ($120,2 \text{ t. ha}^{-1}$) et se rapprochent également de ceux obtenus par [57] dans les plantations de tecks ($90,57 \pm 28 \text{ t. ha}^{-1}$) présente dans la forêt classée du Mont-Kouffé au Bénin situé dans la même zone climatique que notre zone d'étude. Cette différence serait liée au diamètre et à l'allométrie de l'anacardier, car les anacardiens prospectés dans la zone d'étude sont dominés par les arbres de gros diamètre (qui varie de 10-120 cm). Cependant, le stock de carbone aérien d'anacardier relativement faible obtenu dans les forêts denses ($25,03 \pm 0 \text{ t. ha}^{-1}$) et les savanes arborées et arbustives ($35,95 \pm 24,96 \text{ t. ha}^{-1}$). Cela confirme la faible densité de d'anacardier observé dans ces milieu. Nos résultats corroborent avec les observations de [58] qui révèlent dans une étude menée au Sénégal que les plantations éparses, les parcs arborés et la jachère arborée stockent entre 31,8 et 52,1 t. ha⁻¹. Nos résultats se rapprochent des observations faites par [4] dans les parcs agro-forestiers du bassin de Dassari ($21,39 \pm 6,68 \text{ t. ha}^{-1}$) ceux de dans les systèmes agroforestiers à karité et à néré où ils ont trouvé dans les plantations d'anacardiens et ($20,17 \text{ t. ha}^{-1}$) tous en zone Soudanienne du Bénin. En revanche les stocks de carbone d'anacardier obtenus par [52] dans les savanes arborées ($13,05 \text{ t. ha}^{-1}$) dans la région du nord Cameroun sont inférieurs à nos observations. Les faibles quantités de biomasse et de carbone d'anacardier que nous avons observé dans ces écosystèmes (forêts denses ; savanes arborées et arbustives) seraient dû au fait du caractère naturel de ces écosystèmes (notamment les espèces ligneuses autochtones), donc sont moins riche en espèces ligneuses plantées tel que les anacardiens.

La densité de l'anacardier dans ces écosystèmes (environ 2 pieds d'anacardier/ha dans les savanes arborées et arbustives et environ 1 pied d'anacardier/ha dans les forêts denses), est très faible dû à la préservation de ces écosystèmes à cause leurs riches biodiversités. Par ailleurs cette observation dénote d'un début d'empiètement sur les écosystèmes naturels préservés qui entraînerait leurs conversions en d'autres utilisation des terres. En revanche la faible quantité de stock de carbone dans la classe des terres cultivées ($7,80 \pm 4,96 \text{ t. ha}^{-1}$) s'explique par la priorisation des cultures vivrières dans cette classe et que les parties aériennes des arbres sont exploitées rapidement et/ou amoindries par les feux accidentels mais également avec l'augmentation de l'exploitation des ressources forestières pour la production de bois et de charbon [52]. Cependant les plantations bénéficient de soins intensifs de l'homme qui les met à l'abri des feux de végétation, des animaux et des adventices. Ces formations végétales ont pour cela une structure démographique particulièrement dense avec de fortes caractéristiques structurales. La capacité de stockage du carbone de l'anacardier dans les zones agroforestières et les plantations confirme les efforts fournis par les agriculteurs pour l'installation des plantations d'anacardier en mettant en pratiques les stratégies d'atténuation du changement climatique conformément à la mise en œuvre du protocole de Kyoto. [12], ont également remarqué que les systèmes agroforestiers ont un effet indirect sur la capture du carbone en réduisant la pression sur les forêts naturelles. Selon [11], les systèmes agroforestiers ont une capacité de stockage comprise entre 12 et 228 t C/ha avec une valeur moyenne de 95 t C/ha. Les résultats issus de notre étude sont compris dans cet intervalle. Ce qui permet d'affirmer que les systèmes agroforestiers et les plantations constituent un puit de carbone et peuvent également contribuer à lutter contre les effets des changements climatiques.

5. Conclusion

Cette étude examine la contribution de différentes utilisations des terres à la séquestration du carbone d'anacardier. Les résultats indiquent que les plantations et les zones agroforestières présentent un potentiel de séquestration plus élevé que les zones de végétation naturelle et les terres cultivées. Notamment, la forêt dense et la savane montrent des capacités de stockage relativement faibles. Les variations observées s'expliquent par l'impact humain sur chaque unité de sol, avec un entretien continu des plantations et des zones agroforestières par les agriculteurs. Les systèmes agroforestiers apparaissent ainsi comme d'excellents puits de carbone, dont l'efficacité dépend de la structure et de la fonction du système de culture. En conclusion, il est recommandé de sensibiliser les populations locales à une gestion optimale des systèmes agroforestiers pour contribuer à la réduction des gaz à effet de serre, en favorisant les pratiques culturales préservant ces arbres pour améliorer la productivité des cultures associées.

Références

- [1] - GIEC. "Changements climatiques 2014", Rapport de synthèse, (2014), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- [2] - T. PEARSON, N. HARRIS, D. SHOCH, S. BROWN, "A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation", GOF-C-GOLD Report version COP22-1, (GOF-C-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands), (2005)
- [3] - G. R. VAN DER WERF, D. C. MORTON, R. S. DEFRIES, J. G. J. OLIVIER, P. S. KASIBHATLA, R. B. JACKSON, G. J. COLLATZ, J. T. RANDERSON, "CO₂ emissions from forest loss". *Nature Geosci*, 2 (2009) 737 - 8
- [4] - A. CHABI, S. LAUTENBACH, V. O. A. OREKAN, N. KYEI-BAFFOUR, "Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin". *Carbon Balance Manage*, 11 (2016) 16
- [5] - H. K. GIBBS, S. BROWN, J. O. NILES, J. A. FOLEY, "Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality". *Environ Res Lett.*, 2 (2007) 045023
- [6] - R. OLSCHESKI, P. C. BENÍTEZ, G. H. J. DE KONING, T. SCHLICHTER, How attractive are forest carbon sinks? Economic insights into supply and demand of Certified Emission Reductions. *JFE.*, 11 (2005) 77 - 94
- [7] - W. L. SILVER, R. OSTERTAG, A. E. LUGO, The Potential for Carbon Sequestration Through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands. *Restor Ecology*, 8 (2000) 394 - 407
- [8] - H. E. SCHROEDER, A. H. SCHOTZ, T. WARDLEY-RICHARDSON, D. SPENCER, T. J. V. HIGGINS, "Transformation and Regeneration of Two Cultivars of Pea (*Pisum sativum* L.)". *Plant Physiol*, 101(1993) 751 - 7
- [9] - R. K. DIXON, "Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases?", (1995) 99 - 116
- [10] - C. A. PALM, C. N. GACHENGO, R. J. DELVE, G. CADISCH, K. E. GILLER, "Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83 (2001) 27 - 42
- [11] - A. ALBRECHT, S. T. KANDJI, "Carbon sequestration in tropical agroforestry systems", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99 (2003) 15 - 27
- [12] - F. MONTAGNINI, P. K. R. NAIR, "Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems". *Agroforestry Systems*, 61 - 62 (2004) 281 - 95
- [13] - Y. MALHI, D. WOOD, T. R. BAKER, J. WRIGHT, O. L. PHILLIPS, T. COCHRANE, P. MEIR, J. CHAVE, S. ALMEIDA, L. ARROYO, N. HIGUCHI, T. J. KILLEEN, S. G. LAURANCE, et al. "The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests : BIOMASS IN AMAZONIAN FORESTS". *Global Change Biology*, 12 (2006) 1107 - 38

- [14] - G. P. ASNER, G. V. N. POWELL, J. MASCARO, D. E. KNAPP, J. K. CLARK, J. JACOBSON, T. KENNEDY-BOWDOIN, A. BALAJI, G. PAEZ-ACOSTA, E. VICTORIA, L. SECADA, M. VALQUI, R. F. HUGHES, "High-resolution Forest carbon stocks and emissions in the Amazon". *Proc Natl Acad Sci USA*, 107 (2010) 16738 - 42
- [15] - S. S. SAATCHI, N. L. HARRIS, S. BROWN, M. LEFSKY, E. T. A. MITCHARD, W. SALAS, B. R. ZUTTA, W. BUERMANN, S. L. LEWIS, S. HAGEN, S. PETROVA, L. WHITE, M. SILMAN et al. "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents". *Proc Natl Acad Sci USA*, 108 (2011) 9899 - 904
- [16] - A. BACCINI, S. J. GOETZ, W. S. WALKER, N. T. LAPORTE, M. SUN, D. SULLA-MENASHE, J. HACKLER, P. S. A. BECK, R. DUBAYAH, M. A. FRIEDL, S. SAMANTA, R. A. HOUGHTON, "Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps", *Nature Clim Change*, 2 (2012) 182 - 5
- [17] - G. J. L. PANZOU, J. L. DOUCET, J. J. LOUMETO, A. BIWOLE, S. BAUWENS, A. FAYOLLE, "Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique)". *Biotechnol Agron Soc Environ*, (2016) 508 - 22
- [18] - P. BAYEN, F. BOGNOUNOU, A. M. LYKKE, M. OUÉDRAOGO, A. THIOMBIANO, "The use of biomass production and allometric models to estimate carbon sequestration of *Jatropha curcas* L. plantations in western Burkina Faso". *Environ Dev Sustain.*, 18 (2016) 143 - 56
- [19] - A. N. DJOMO, C. D. CHIMI, "Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing". *Forest Ecology and Management*, 391 (2017) 184 - 93
- [20] - S. MENSAH, R. VELDTMAN, T. SEIFERT, "Allometric models for height and aboveground biomass of dominant tree species in South African Mistbelt forests". *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79 (2017) 19 - 30
- [21] - K. DIMOBE, J. KOUAKOU, J. TONDOH, B. ZOUNGRANA, G. FORKUOR, K. OUÉDRAOGO, "Predicting the Potential Impact of Climate Change on Carbon Stock in Semi-Arid West African Savannas". *Land*, 7 (2018) 124
- [22] - M. GANAME, "Dynamique spatio-temporelle et potentiel du stock de carbone aérien des écosystèmes forestiers du Burkina Faso", Thèse unique, Université Joseph Ki-Zerbo ; Ouagadougou, (2020) 272 p.
- [23] - C. MBOW, M. M. VERSTRAETE, B. SAMBOU, A. T. DIAW, H. NEUFELDT, "Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan-Guinean ecosystems of Southern Senegal." *Journal of Forest Research*, 19 (2014) 340 - 7
- [24] - J. CHAVE, C. ANDALO, S. BROWN, M. A. CAIRNS, J. Q. CHAMBERS, D. EAMUS, H. FÖLSTER, F. FROMARD, N. HIGUCHI, T. KIRA, J. P. LESCURE, B. W. NELSON, H. OGAWA et al. "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests". *Oecologia*, 145 (2005) 87 - 99
- [25] - S. KUYAH, G. W. SILESHI, J. NJOLOMA, S. MNG'OMBA, H. NEUFELDT, "Estimating aboveground tree biomass in three different miombo woodlands and associated land use systems in Malawi", *Biomass and Bioenergy*, 66 (2014) 214 - 22
- [26] - R. A. HOUGHTON, F. HALL, S. J. GOETZ, "Importance of biomass in the global carbon cycle: BIOMASS IN THE GLOBAL CARBON CYCLE." *J Geophys Res.*, (2009) 114
- [27] - A. N. DJOMO, A. IBRAHIMA, J. SABOROWSKI, G. GRAVENHORST, "Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa." *Forest Ecology and Management*, 260 (2010) 1873 - 85
- [28] - J. CHAVE, M. RÉJOU-MÉCHAIN, A. BÚRQUEZ, E. CHIDUMAYO, M. S. COLGAN, W. B. C. DELITTI, A. DUQUE, T. EID, P. M. FEARNSIDE, R. C. GOODMAN, M. HENRY, A. MARTÍNEZ-YRÍZAR, W. A. MUGASHA et al., Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20 (2014) 3177 - 90

- [29] - M. DJAUGA, S. KARIMOU, O. AROUNA, S. ZAKARI, A. O. MATILO, I. T. IMOROU, I. YABI, J. DJEGO, O. THOMAS, C. HOUSSOU, "Cartographie de la biomasse forestière et évaluation du carbone séquestré dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur au Centre – Bénin. *Int J Bio Chem Sci.*, 15 (2022) 2388 - 401
- [30] - S. J. GOETZ, M. HANSEN, R. A. HOUGHTON, W. WALKER, N. LAPORTE, J. BUSCH, "Measurement and monitoring needs, capabilities and potential for addressing reduced emissions from deforestation and forest degradation under REDD+". *Environ Res Lett.*, 10 (2015) 123001
- [31] - D. D. SHIRIMA, P. K. T. MUNISHI, S. L. LEWIS, N. D. BURGESS, A. R. MARSHALL, A. BALMFORD, R. D. SWETNAM, E. M. ZAHABU, "Carbon storage, structure and composition of miombo woodlands in Tanzania's Eastern Arc Mountains : Carbon storage in miombo woodlands". *African Journal of Ecology*, 49 (2011) 332 - 42
- [32] - A. STUMPF, N. KERLE, "Object-oriented mapping of landslides using Random Forests". *Remote Sensing of Environment*, 115 (2011) 2564 - 77
- [33] - M. IMMITZER, C. ATZBERGER, T. KOUKAL, "Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data". *Remote Sensing*, 4 (2012) 2661 - 93
- [34] - L. BREIMAN, Random Forests. c 2001 Kluwer Academic Publishers Manufactured in The Netherlands, (2001)
- [35] - A. LIAW, M. WIENER, "Classification and regression by randomForest". *R News*, 2 (3) (2002) 18 - 22, <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>
- [36] - J. W. ROUSSE, R. H. HAAS, J. A. SCHELL, D. W. DEERING, Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Washington DC., (1974) 309 - 17
- [37] - E. HUNTJR, B. ROCK, "Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances". *Remote Sensing of Environment*, 30 (1989) 43 - 54
- [38] - A. R. HUETE "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)". *Remote Sensing of Environment*, 25 (1988) 295 - 309
- [39] - G. GUENDEHOU, A. LEHTONEN, M. MOUDACHIROU, R. MÄKIPÄÄ, B. SINSIN, "Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa". *Southern Forests : a Journal of Forest Science.*, 74 (2012) 77 - 88
- [40] - B. S. BOUKO, B. SINSIN, B. GOURA SOULE, "Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin." *TROPICULTURA*, 25, 4 (2007) 221 - 7
- [41] - E. MBAYNGONE, A. THIOMBIANO, K. HAHN, S. GUINKO, "Structure des ligneux des formations végétales de la réserve de Pama (Sud-Est du Burkina Faso, Afrique de l'ouest)." *Flora et Vegetatio sudano-sambesica*, 11 (2008) 25 - 34
- [42] - I. BIAH, S. GUENDEHOU, C. GOUSSANOU, M. KAIRE, B. A. SINSIN, "Allometric models for estimating biomass stocks in cashew (*Anacardium occidentale* L.) plantation in Benin". *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin* (BRAB), (2018) 16 - 27
- [43] - C. MBOW, Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal, Thèse de doctorat d'État ès sciences, Université Cheick Anta Diop (UCAD), (2009) 310 p.
- [44] - A. N. DJOMO, A. IBRAHIMA, J. SABOROWSKI, G. GRAVENHORST, "Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa." *Forest Ecology and Management*, 260 (2010) 1873 - 85
- [45] - L. G. K. NAKOU, "Développement des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne des arbres en zone soudano-guinéenne au Bénin". Université d'Abomey-Calavi, (2014) 15 p.
- [46] - K. MOKANY, R. J. RAISON, A. S. PROKUSHKIN, "Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes", *Global Change Biology*, 15 (2006) 84 - 96
- [47] - A. GOUSSANOU, A. CHIKOU, C. A. OGNI, K. S. KASSA, B. HOUSSIONON, G. A. MENSAH, I. Y. A. KARIM, Synthèse des connaissances sur l'écologie et la biologie des crabes (Crustacés, Décapodes, Brachyours). *Int J Bio Chem Sci.*, 11 (2018) 2990

- [48] - I. ISSIFOU MOUMOUNI, O. AROUNA, N. TOKO ISSAKA, S. ZAKARY, M. DJAUGA, "Estimation de la variabilité de la biomasse aérienne ligneuse en forêt tropicale sèche : cas de la forêt classée de Wari-Marou au Centre-Bénin." *Revue de géographie du laboratoire Leïdi : Dynamique des territoires et développement*, (2017) 17. <hal-01688993>
- [49] - G. E. P. BOX, P. W. TIDWELL, "Transformation of the Independent Variables". *Technometrics*, 4 (1962) 531 - 50
- [50] - B. LANKOANDÉ, A. OUÉDRAOGO, J. I. BOUSSIM, A. M. LYKKE, "Natural stands diversity and population structure of *Lophira lanceolata* Tiegh. ex Keay, a local oil tree species in Burkina Faso, West Africa". *Agroforest Syst.*, 91 (2017) 85 - 96
- [51] - D. DAYAMBA, S. D'HAEN, J. D. OUEZZIN COULIBALY, J. A. KORAHIRE, "Aperçu des connaissances existantes sur l'impact des changements et variabilités climatiques sur l'économie et ses secteurs dans le contexte du Burkina Faso", (2019) ; *Climate Analytics* ; <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.10870.34887>
- [52] - D. V. AWE Diversité floristique et stocks de carbone des plantations à anacardium occidentale (anacardiaceae) dans la région du nord Cameroun : cas de Ngong, Cameroun : Université de Ngaoundéré, (2016) 137 p.
- [53] - J. LAWAL, O. ODUWOLE, T. SHITTU, A. MUYIWA, "Profitability of value addition to cashew farming households in Nigeria" *African Crop Science Journal*, (2011), <http://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/68659>
- [54] - N. N. D. GUELOU, D. OUATTARA, E. KONAN, K. GNAHORE, A. MISSA, A. BAKAYOKO, "Diversité floristique et structurale de la forêt galerie du Bandama dans la Réserve Scientifique de Lamto en Côte d'Ivoire." *Afrique Science*, 4 (2018) 452 - 439
- [55] - O. D. BELLO, A. SAIDOU, E. L. AHOTON, J. L. Y. AVALIGBÉ, A. V. EZIN, P. B. I. AKPONIKPÉ, N. AHO, "Assessment of organic carbon stock in cashew plantations (*Anacardium occidentale* L.) in Benin (West Africa)." *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, Vol. 3, Issue04, (July-August 2017) 3471 - 95
- [56] - M. KRAENZEL, A. CASTILLO, T. MOORE, C. POTVIN, "Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama". *Forest Ecology and Management*, 173 (2003) 213 - 25
- [57] - S. ZAKARI, T. TABOU, I. YABI, "Risques d'inondation et vulnérabilité de l'élevage bovin dans les communes de la vallée du Niger au Bénin", (2018) 289 - 94
- [58] - S. LIU, M. KAIRÉ, E. WOOD, O. DIALLO, L. L. TIESZEN, "Impacts of land use and climate change on carbon dynamics in south-central Senegal". *Journal of Arid Environments*, 59 (2004) 583 - 604