

Dynamique et modélisation du stock de carbone de la Forêt Classée d'Amou-Mono au Togo

Dynamic and modelling of carbon stocks in the Amou-Mono Classified Forest in Togo

Kokou Kokouvi Bruno^{1,2,5*}, Atakpama Wouyo^{2,3}, Kombate Bimare², Egbelou Hodabalo², Koffi N'Déré Aoufoh^{2,4}, Elangilangi Molo Jacques¹, Ganyo Komla Kyky⁵, Sambieni Kouagou Raoul¹, Bogaert Jan¹, Batawila Komlan⁴

¹Ecole Régionale Postuniversitaire d'Aménagement et de Gestion Intégrée des Forêts et Territoires tropicaux, Université de Kinshasa, Commune de Lemba, - B.P. 15.373 - Kinshasa, République Démocratique du Congo

²Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Département de Botanique, Faculté des Sciences (FDS), Université de Lomé (UL), 1 BP 1515 Lomé 1, Togo

³West Africa Plant Red List Authority (WAPRLA), IUCN Species Survival Commission, Rue Mauverney 28, 1196 Gland, Switzerland

⁴Département de Foresterie, Institut National de Formation Agricole (INFA) de Tové, BP 401 Kpalimé, Togo.

⁵Institut Togolais de Recherche Agronomique / Direction de laboratoire, BP 1163 Lomé, Togo.

(*) Auteur correspondant : kokoubruno7@gmail.com

Comment citer l'article : Kokou Kokouvi Bruno, Atakpama Wouyo, Kombate Bimare, Egbelou Hodabalo, Koffi N'Déré Aoufoh, Elangilangi Molo Jacques, Ganyo Komla Kyky, Sambieni Kouagou Raoul, Bogaert Jan, Batawila Komlan (2023). Dynamique et modélisation du stock de carbone de la forêt classée d'Amou-Mono au Togo. *Rev Ecosystèmes et Paysages (Togo)*, 3(2) :1-15, e-ISSN (Online) : 2790-3230

DOI : <https://doi.org/10.59384/reco-pays.tg3211>

Reçu : 1 octobre 2023

Accepté : 15 décembre 2023

Publié : 30 décembre 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Résumé

Plusieurs aires protégées du Togo confrontées à une pression anthropique ont perdu leur capacité de protection de la biodiversité et de conservation des écosystèmes. Cette étude réalisée dans la Forêt Classée d'Amou-Mono (FCAM), une des aires protégées fortement anthropisée est une contribution à une meilleure gestion et restauration des écosystèmes forestiers au Togo. En particulier, il s'agit de : (i) estimer le potentiel et la dynamique de la séquestration du carbone entre 1986 et 2021 et (ii) évaluer l'influence des choix des modes de gestion des forêts sur le flux du carbone à l'horizon 2050. La quantification au sol du stock de carbone se sont basées sur les inventaires forestiers au sein de 102 placettes avec une forme rectangulaire de dimension 20 m x 50 m et les équations allométriques. Ces stocks de carbone ont été combinés aux classes thématiques pour générer les cartes de distribution spatiale. La dynamique du stock de carbone montre que la FCAM a connu une évolution régressive. Des actions de reboisement et de protection sont primordiales pour renforcer le potentiel de séquestration du carbone. Le gain économique prédit à l'horizon 2050 dans les forêts denses/riveraines, forêts claires/savanes boisées et champs/jachères s'élève à 1 014 911, 3 \$.

Mots clés

Balance carbone, aire protégée, Togo, séquestration de carbone, InVEST

Abstract

As a result of human pressure, several protected areas in Togo have lost their capacity to protect biodiversity and conserve ecosystems. This study in the Amou-Mono Classified Forest (FCAM), one of the protected areas under great human pressure, contributes to

better management and restoration of forest ecosystems in Togo. In particular, it aims to: (i) estimate the potential and dynamics of carbon sequestration between 1986 and 2021 and (ii) assess the influence of management choices on carbon flux by 2050. Ground-based quantifications of carbon stock were based on forest inventory data for woody species (diameter and height) within 102 sampling plots and allometric equations. These carbon stocks were combined with thematic classes to generate spatial distribution maps. Carbon stock dynamics show that FCAM has undergone a regressive evolution. Reforestation and protection measures are essential to boost carbon sequestration potential. The predicted economic gain by 2050 in dense/riparian forests, open forests/wooded savannahs and fields/fields amounts to \$1,014,911.3.

Keywords

Carbon balance, protected area, Togo, carbon sequestration, InVEST

1. Introduction

Les divers effets négatifs du changement climatique tels que le réchauffement climatique et les sécheresses extrêmes handicapent le développement durable dans le monde. Les augmentations dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dont le dioxyde de carbone (CO₂) modifient le climat global de la terre (Pachauri and Reisinger 2008). Cette augmentation des GES est induite par les changements dans les modes d'utilisation des terres : conversion des terres forestières en terres agricoles, bâtis et l'industrialisation réduisant ainsi considérablement la capacité de séquestration du carbone des écosystèmes forestiers (Baccini et al. 2017; Gibbs et al. 2018; Traoré, 2018; Walter et al. 2010; Yude Pan et al. 2011). Par conséquent, il est urgent d'élaborer un mécanisme de gestion efficace d'utilisation des terres afin de réduire les émissions des GES tout en améliorant la séquestration du CO₂. La mise en place d'un tel mécanisme nécessite des données précises sur la biomasse forestière et les stocks de carbone. Cela a suscité au cours des dernières décennies, un intérêt croissant sur les travaux d'estimation de la biomasse (Chave et al. 2005; Chave et al. 2014; Mbow 2009; Sawadogo et al. 2010), particulièrement dans les écosystèmes tropicaux. Ces derniers conservent près de la moitié du stock global du carbone (Yude Pan et al. 2011).

Au Togo, les troubles sociopolitiques des années 90 ont entraîné l'envahissement des aires protégées et la disparition de certaines d'entre elles (Djeri et al. 2001; MERF 2020; Tchamiè 1996). Ces perturbations écologiques d'ordre anthropique deviennent de plus en plus croissantes dans les domaines classés de l'Etat et réduisent leur potentiel de stockage de carbone (Dimobe et al. 2015; Kombate et al. 2023; Polo-Akpiisso et al. 2018). Les principaux facteurs responsables de la perte de la biodiversité et de l'habitat des aires protégées (APs) sont entre autres la pression foncière due à la pression démographique (Bawa 2017; Bawa et al. 2022; Koumou and Lare 2014), l'exploitation du bois énergie (Kaina et al. 2018) et surtout à l'agriculture intensive et extensive (Kombate et al. 2020). Toutes ces pressions ont contribué considérablement à la dégradation du couvert végétal, à la mise à nu des sols et dans une moindre mesure à la crise climatique.

Plusieurs études cartographiques ont eu pour cadre l'évaluation de la dynamique d'occupation du sol et la séquestration du carbone dans certaines aires protégées du Togo (Adjonou et al. 2017; Akodéwou et al. 2020; Atakpama et al. 2021; Kombate et al. 2023b; Koumou 2019; Polo-Akpiisso et al. 2020). Les études ayant pris en compte la dynamique du carbone des écosystèmes forestiers des APs du Togo concernent notamment la forêt classée de Missahohoe et la Forêt communautaire d'Alibi 1 (Kombate et al. 2023a; Kombate et al. 2023b). Dans un contexte de résilience au changement climatique et la réduction des émissions des GES du secteur forestier, il urge d'analyser la dynamique, de quantifier et de spatialiser son potentiel de stockage de carbone dans le temps et dans l'espace. Ceci permettra de comprendre la productivité des formations végétales afin de mettre en œuvre des pratiques et des politiques de gestion environnementale plus adaptées (Babbar et al. 2021; Clec'h et al. 2013).

L'étude a pour cadre la FCAM qui s'étend sur une superficie d'environ 12780,578 ha. C'est une des aires protégées de la région des Plateaux, longée par le fleuve Mono qui est le principal bassin versant (zone humide d'importance internationale). Une étude récente a démontré que cette Forêt Classée est totalement fragmentée. Quel est l'état de dégradation de la FCAM ? Quel est le flux des gaz à effet de serre (CO₂) généré par l'anthropisation dans la FCAM ?

Cette étude contribue à la gestion durable et à la restauration des aires protégées au Togo. Plus spécifiquement, elle vise à : (i) analyser la dynamique de séquestration du carbone forestier de la FCAM entre 1986 et 2021 et (ii) modéliser la dynamique du carbone dans la FCAM à l'horizon 2050.

2. Matériel et Méthode

2.1 Description de la Forêt classée d'Amou-Mono (FCAM)

La FCAM se retrouve dans la zone écologique III du Togo (Ern 1979). D'une superficie de 12 780,578 ha, elle s'étend à cheval sur les préfectures d'Ogou, Moyen-Mono et Haho entre 1°22,8 E et 1°30,0 E de longitude et entre 7°8,4 N et 7°15,8 N de latitude (Figure 1). Initialement classée par arrêté n° 771 du 21 octobre 1953, la FCAM a été requalifiée de façon consensuelle puis redélimitée et érigée en zone de gestion de ressources naturelles (catégorie VI) par arrêté N° 003/MERF/CAB du 02 février 2005.

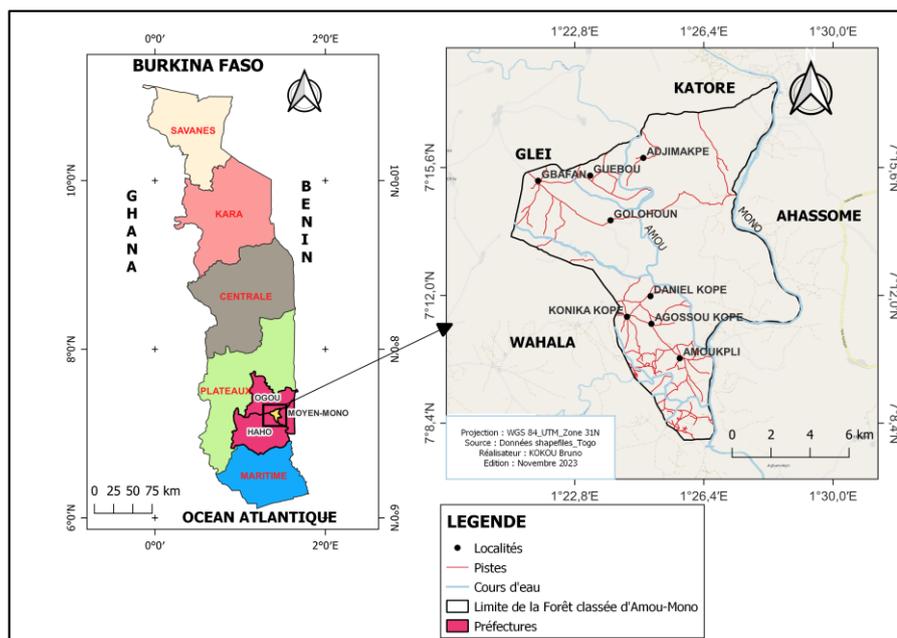


Figure 1. Localisation de la Forêt Classée d'Amou-Mono (FCAM) au Togo.

La FCAM jouit d'un climat soudano-guinéen (Akouehou et al. 2017) marqué par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La petite saison pluvieuse s'étend de septembre à octobre et la grande saison pluvieuse va d'avril à juillet. La petite saison sèche couvre deux à trois mois, d'août à septembre et la grande saison sèche s'étend de novembre en mars. Le relief de la FCAM est une pénéplaine atteignant moins de 400 m d'altitude avec des pentes variant entre 3 et 8 %. Elle est dominée par la plaine alluviale de Mono (Akouehou et al. 2017). Le réseau hydrographique relativement dense est issu d'écoulements des cours d'eau dont le principal est le fleuve Mono situé à l'est et constituant une limite naturelle de la FCAM. Amou, Tchila et Kra sont les plus importants cours d'eau.

2.2 Collecte des données

La carte de l'occupation du sol de l'année 2021 de la FCAM établie à l'aide du logiciel QGIS 3.16 a servi de base pour l'établissement de l'échantillonnage. Sur cette carte, une grille de maille 1 km x 1 km a été générée. Au sein de cette grille, 20 quadras ont été choisis en tenant compte de la diversité des classes de l'occupation du sol (Kombate et al. 2023b). Deux transects perpendiculaires de direction nord-sud et est-ouest se croisant au milieu de chaque quadra ont été conçus. Le long de chaque transect, les points d'inventaire équidistants de 200 m sont posés pour la collecte des données d'inventaire forestier (Atakpama et al. 2023a; Kombate et al. 2023b) (Figure 2).

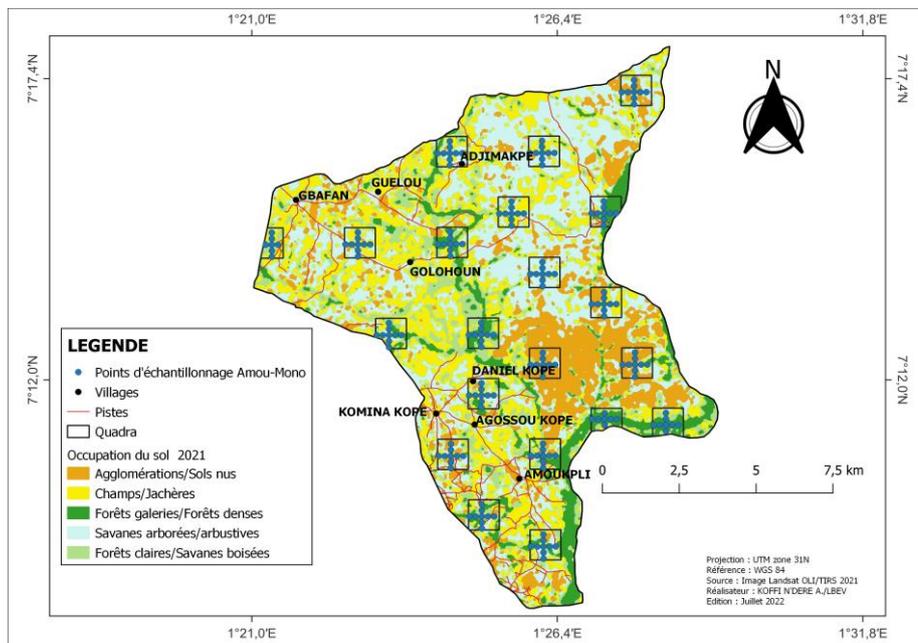


Figure 2. Répartition des points d’échantillonnage sur la carte de la végétation de 2021 de la FCAM.

Les inventaires forestiers ont été réalisés au sein des placettes rectangulaires de 20 m x 50 m (Atakpama et al. 2023b) orientées suivant le sens des transects. Les paramètres dendrométriques ont été relevés sur les ligneux dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ≥ 10 cm (Kombate et al. 2023b). La mesure du diamètre a été réalisée à l’aide d’un ruban π. Les hauteurs ont été estimées par cotation visuelle.

2.3 Traitement des données

❖ Estimation des stocks de carbone

Dans le cadre de la présente étude, seulement la biomasse ligneuse est prise en compte. Elle comprend, la biomasse aérienne et la biomasse souterraine, racinaire. Il existe plusieurs méthodes d’estimation de la biomasse d’une forêt dont la méthode non destructive et la méthode destructive. La méthode non destructive ou directe utilise des équations allométriques pour estimer la biomasse aérienne et souterraine à travers des mesures du diamètre et de la hauteur totale des arbres. Des études récentes ont rapporté que l’estimation est plus appréciable lorsqu’on prend en compte le diamètre des houppiers dans les équations allométriques (Panzou et al., 2016). Pour un individu (i), la biomasse aérienne (BAi) est calculée comme suit : $BAi (kg) = 1,929 * DHP + 0,116 * DHP^2 + 0,013 * DHP^3$ (Mbow 2009), où DHP signifie diamètre à hauteur de poitrine.

La biomasse racinaire est un important puits de carbone. Malgré son importance, peu d’informations sont disponibles, et ceci à cause de la complexité des méthodes d’extraction et du coût élevé de son évaluation. On distingue trois façons d’estimer la biomasse racinaire : par mesure in situ (méthode destructive), en appliquant le « Root-To-Shoot Ratio » ou encore à partir d’un modèle allométrique. La biomasse racinaire (BRi) est déduite de la biomasse aérienne, à partir de l’application du modèle allométrique proposé par le GIEC (Cairns et al. 1997).

$$BRi (kg) = Exp^{(-1,0587+0,8836*\ln(BAi))}$$

On estime, de façon conventionnelle, que la teneur moyenne en carbone dans la biomasse ligneuse est de 50 %. Pour évaluer le stock de carbone, le facteur d’expansion et de conversion de la biomasse par défaut (CF = 0,47) a été multiplié par la biomasse suivant les lignes directrices du GIEC en matière de bonnes pratiques. Les stocks de carbone (C) ont été également convertis en CO₂. La biomasse totale (BT) des ligneux est obtenue par addition de la biomasse aérienne et de la biomasse souterraine (Folega et al. 2020) selon l’équation ci-dessous : $BT = BA + BS$. Le stock de carbone (SC) séquestré est déterminé par la formule : $SC = BT * CF$ avec CF = 0,47 (Cairns et al. 1997). L’équivalent en CO₂ (EqC, t/ha) est calculé en multipliant le stock de carbone par 3,67 qui est le potentiel de réchauffement global (Folega et al. 2021).

❖ Evaluation de la dynamique spatio-temporelle du flux du carbone

L'approche la plus simple et largement employée pour la cartographie des services écosystémiques consiste à utiliser la cartographie d'occupation du sol comme indicateur de service écosystémique (Crouzat et al. 2017). Les cartes d'occupation de sol de la FCAM ont été segmentées en une grille régulière de mailles de 100 m de côté (1 ha) qui a été posée sur les différentes cartes d'occupation du sol des années 1986, 2000, 2013 et 2021 après leur validation à la suite de la classification supervisée. Les coordonnées géographiques de chaque parcelle et les stocks de carbone ont été utilisés comme données d'entrée et ont été ensuite extrapolés sur l'étendue de la carte d'occupation des sols en suivant le principe selon lequel à une parcelle correspond une classe de pixels et à toutes les classes de pixels identiques correspondent à des stocks de carbone évalués à l'échelle de plusieurs parcelles (Ngoufo et al., 2019). La mise en place de cette grille a consisté en une segmentation géographique régulière, appliquée aux cartes de végétation sous Qgis. La quantité de carbone a été obtenue en additionnant les stocks de carbone contenu dans chaque maille après calcul de leur superficie en les multipliant par la quantité moyenne de carbone (Mba et al., 2021). Les informations sur les quantités moyennes de carbone par unité de surface ont été combinées aux cartes d'occupation du sol dans une grille spatiale, régulière et géoréférencée. La quantité de carbone obtenue dans chacune de ces mailles dépend non seulement de la proportion, mais également du type de végétation contenu dans celle-ci. La quantité totale du carbone stocké est obtenue en additionnant le carbone contenu dans chacune des mailles correspondantes (Kombate et al. 2023b; Mba et al. 2021). Les pertes de carbone de la strate ligneuse provenant de la déforestation et de la dégradation des terres ont été évaluées en utilisant le taux moyen d'expansion spatiale de chacune des unités d'occupation et d'utilisation des terres (Ganamé et al. 2021). Le stock de carbone à l'hectare a été considéré comme constant pour chaque unité de végétation. Le stock de carbone de chaque classe d'occupation a été calculé selon la formule suivante : $SC1 = SC2 + \sum SCEu.O.S$. $SC1$ représente le stock de carbone de l'année initiale ; $SC2$, le stock de l'année finale et $SCEu.O.S$, le stock de carbone perdu suite à la dégradation et de la déforestation entre l'année initiale et l'année finale.

❖ Modélisation du stock de carbone à l'horizon 2050

Pour évaluer la dynamique tendancielle du carbone à l'horizon 2050, le modèle InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) de stockage et de séquestration du carbone a été utilisé. Les données d'entrée sont les cartes d'occupation du sol (2013, 2021 et 2050) et le stock de carbone de 2021. Ces paramètres permettent d'estimer la quantité de carbone actuellement stockée dans un paysage ou la quantité de carbone séquestrée au fil du temps, c'est-à-dire en 2050 soit en scénario d'aménagement ou scénario d'anthropisation. Des données additionnelles telles que la valeur marchande ou sociale du carbone séquestré et son taux de variation annuel, ainsi qu'un taux d'actualisation sont utilisés pour estimer la valeur de ce service. Le pool de carbone est un réservoir de carbone représenté par un tableau en format CSV (séparateur, point-virgule). Ce tableau comporte des données sur le carbone stocké dans le pool fondamental tel que la biomasse aérienne, biomasse souterraine, biomasse totale et stock de carbone pour chaque unité d'occupation de sol. Les données de stock de carbone pour la classe bâtis et sol nus sont considérées comme égales à 0 (Issiaka et al. 2020). Les données économiques sont constituées du prix par tonne métrique du carbone élémentaire. La réduction du marché dans le prix du carbone et le taux annuel de variation du prix du carbone (Issiaka et al. 2020). Pour l'estimation de la valeur totale de séquestration du carbone, il est recommandé des estimations de valeur basées sur les coûts des dommages associés à la libération d'une tonne supplémentaire de carbone, c'est-à-dire le coût social du carbone (CSC). L'estimation du CSC utilisé est en référence aux travaux de Tol (2009), soit 130 dollars américains. Une valeur par défaut de 7 % est l'un des taux d'actualisation du marché recommandés par le gouvernement américain pour l'évaluation des coûts-avantages des projets environnementaux.

3. Résultats

3.1. Potentiel du stock de carbone et dynamique spatio-temporelle de la FCAM

3.1.1. Caractérisation structurale

L'analyse du tableau 1 montre globalement une décroissance des valeurs de la densité, du diamètre moyen et de la surface terrière des formations fermées (forêts denses/riveraines) vers celles plus ouvertes (champs/jachères). Dans les forêts denses/riveraines et les forêts claires/savanes boisées, la densité est respectivement de 81 arbres/ha et de 64 arbres/ha. Dans les savanes arborées/arbustives, elle est d'environ 37 arbres/ha. La valeur de la section des arbres est fluctuante dans les galeries forestières avec une valeur de 9,65 m²/ha. La plus faible valeur est enregistrée dans les champs et les jachères. Le diamètre moyen proche de tous les arbres de la FCAM est de 18,16 cm.

Tableau 1. Paramètres structuraux des unités de végétation de FCAM

UV	N (arbres/ha)	G (m ² /ha)	Dg (cm)
FD/R	81,3	9,65	29
FC/SB	64,1	5,76	20,12
SA/SA	32,6	4,05	17,34
CJ	23,2	0,12	6,2

N : Densité ; G : Surface terrière ; Dg : Diamètre moyen ; UV : Unité de végétation ; FD/R : Forêt dense/riveraine ; FC/SB : Forêt claire/Savane boisée ; SA/SA : Savane arborée/Savane arbustive ; CJ : Champs et jachères

3.1.2. Biomasse du carbone de la FCAM

La biomasse ligneuse totale produite par les arbres dans la FCAM avoisine 62 036,826 tonnes, soit une quantité totale de carbone séquestrée de 28 252,25 tonnes. La quantité de biomasses et le stock du carbone sont plus importants dans les formations forestières (Tableau 2). Les forêts denses/riveraines ont la plus grande capacité de stockage de carbone avec 7,36 t/ha et biomasse aérienne totale de 15,67 t/ha. Les savanes arborées/arbustives ont une biomasse de 4,75 t/ha et une capacité de séquestration de carbone de 2,23 t/ha. Les champs/jachères ont les plus faibles contributions.

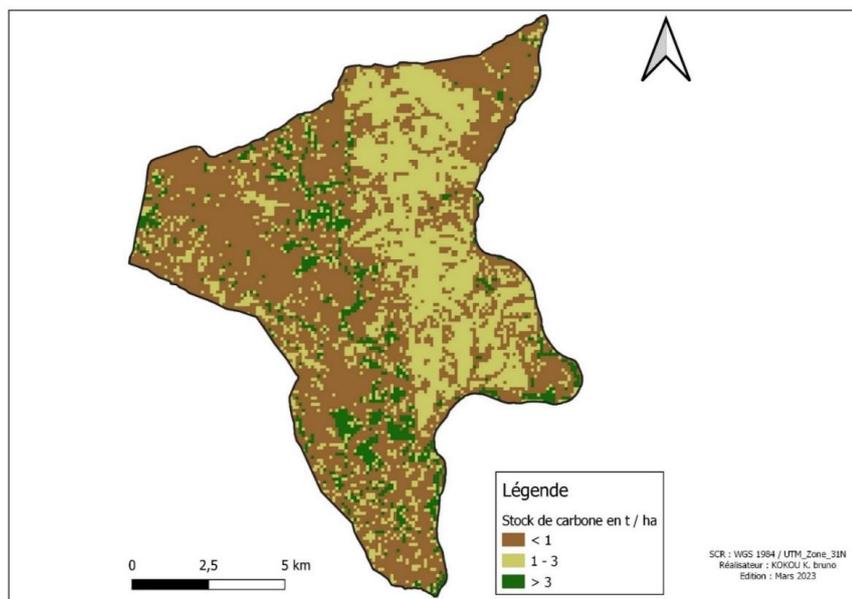
Tableau 2. Quantités de biomasses et de carbone des unités d'occupation de sol de la FCAM

UV	Ba (t/ha)	Br (t/ha)	Bt (t/ha)	Ct (t/ha)
FD/R	11,16	4,51	15,67	7,36
FC/SB	6,54	2,8	9,34	4,39
SA/SA	3,16	1,58	4,75	2,23
CJ	0,85	0,45	1,6	0,61

Ba : Biomasse aérienne ; Br : Biomasse souterraine ; Bt : Biomasse totale ; Ct : Carbone total ; UV : Unité de végétation ; FD/R : Forêt dense/riveraine ; FC/SB : Forêt claire/Savane boisée ; SA/SA : Savane arborée/Savane arbustive, CJ : Champs et jachères.

3.1.3. Distribution spatiale du stock de carbone de la FCAM

Les mensurations forestières ont permis d'estimer environ 28 252,28 t de carbone séquestré par les écosystèmes forestiers de la FCAM. La valeur de carbone stockée varie entre 0 et 7,4 tC.ha⁻¹ (Figure 2). Les valeurs sont nulles au niveau des bâtis/sols nus. Les plus fortes valeurs sont obtenues dans les forêts denses/riveraines (7,4 tC.ha⁻¹) et forêts claires/Savanes boisées (5 t.ha⁻¹). Les savanes arborées/arbustives et les champs/jachères enregistrent la plus faible quantité. L'analyse du test de Khi carré ($p < 2,2e-16$) montre que les stocks de carbone varient significativement entre les unités d'occupation et d'utilisation des terres.

**Figure 3.** Spatialisation du carbone dans la forêt classée d'Amou-Mono en 2021

3.1.4. Dynamique du stock de carbone entre 1986 et 2021

L'analyse de la dynamique du stock de carbone montre que la FCAM a connu une évolution régressive (Figure 4). En 1986, cette forêt a séquestré au total 63340,72 t de carbone. Au cours de cette période, ce sont les forêts denses/riveraines qui ont séquestré plus de carbone (29783,38 t) suivies des forêts claires/boisées (28948,74 t).

En 2000, cette forêt a connu une régression en termes de séquestration de carbone (54768,55 t). Les plus grandes quantités de carbone sont séquestrées par les forêts claires et forêts denses respectivement 21615,75 et 26578,5 t. Toutefois, les savanes arborées et les champs/jachères ont séquestré moins.

En 2013, la quantité totale de carbone estimée dans la FCAM est de 38 569,69 tC. La contribution est plus marquée dans les forêts claires/Savanes boisées et savanes arborées/arbustives et moindre dans les forêts denses/riveraines et les champs/jachères (Figure 5). Contrairement à l'année 2021, c'est-à-dire 35 ans plus tard, la FCAM a connu une régression en termes de séquestration de carbone (28 948,74 tC de perte de carbone). Globalement la capacité de séquestration la plus importante en 2021 s'observe dans les savanes arborées/arbustives (10 697,65 tC).

L'analyse statistique de Khi 2 ($p < 2,2e-16$) révèle une différence significative entre les taux de séquestration de carbone entre les classes d'occupation du sol et les années. La conversion des terres entre 1986 et 2021 a occasionné une émission d'environ 28 252,24 tC dans la FCAM.

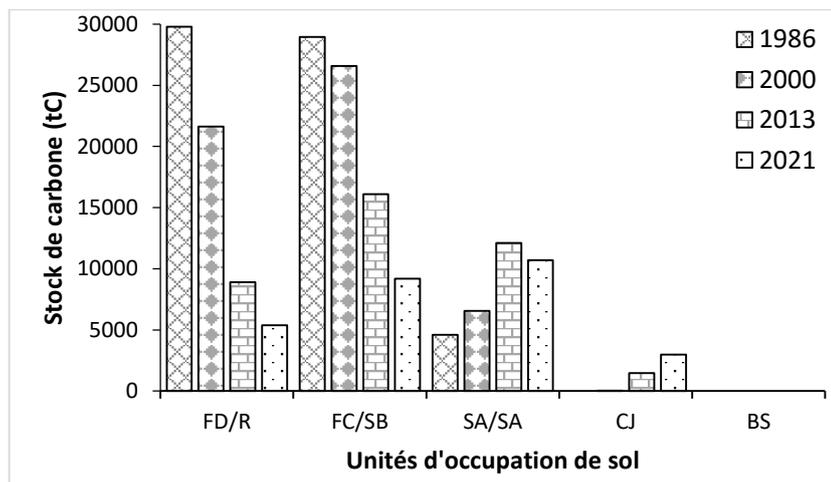


Figure 4. Stock de carbone des occupations de sol de l'écosystème de la FCAM

FD/R : Forêt dense/riveraine ; FC/SB : Forêt claire/Savane boisée ; SA/SA : Savane arborée/Savane arbustive ; CJ : Champs et jachères et BS ???

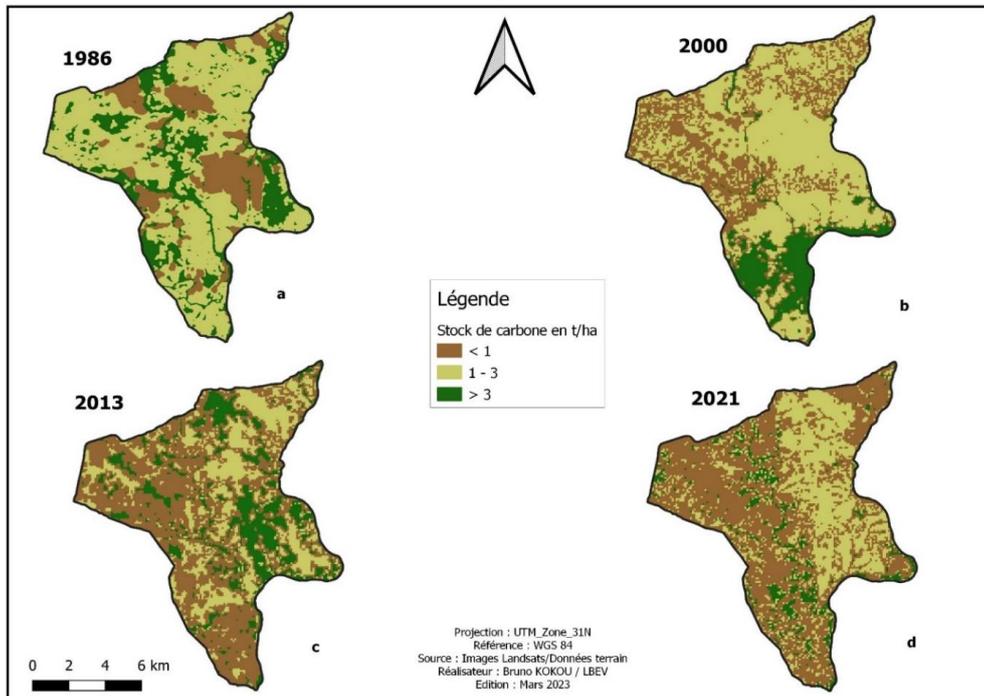


Figure 5. Évolution spatiale de la dynamique du carbone dans la FCAM

3.1.5. Changements dans la dynamique de carbone entre 1986 et 2021

La conversion d'une formation dense vers une formation anthropisée se traduit par des pertes de carbone (Tableau 4). La figure 6 présente la spatialisation du flux de carbone entre 1986 et 2000, 2000 et 2013 et entre 2013 et 2021. Entre 1986 et 2000, les plus grosses pertes de carbone sont enregistrées au niveau des forêts denses/riveraines (8 686 tC soit environ une perte de 620 tC/an). Par contre, les savanes arborées/arbustives ont perdu seulement 87 tC, soit 6,21 tC/an.

Entre 2000 et 2013, la perte de carbone au niveau des classes d'occupation de forêts denses/riveraines et forêts claires/Savanes boisées est de 10514tC et 10484tC, soit environ 808 tC/an et 806, 46 tC/an respectivement. Par contre les savanes arborées/arbustives et Champs/Jachères ont perdu respectivement 738 tonnes et 3 tonnes soit environ 57 tC/an et 0,25 tC/an.

Entre 2013 et 2021, les forêts claires/savanes boisées ont enregistré les grosses pertes (9023 tonnes soit environ 1127,88 tC/an). Les savanes arborées/arbustives et les champs/jachères ont enregistré une perte de 3650 tonnes et 70 tonnes, soit environ 456 tC/an et 9 tC/an respectivement.

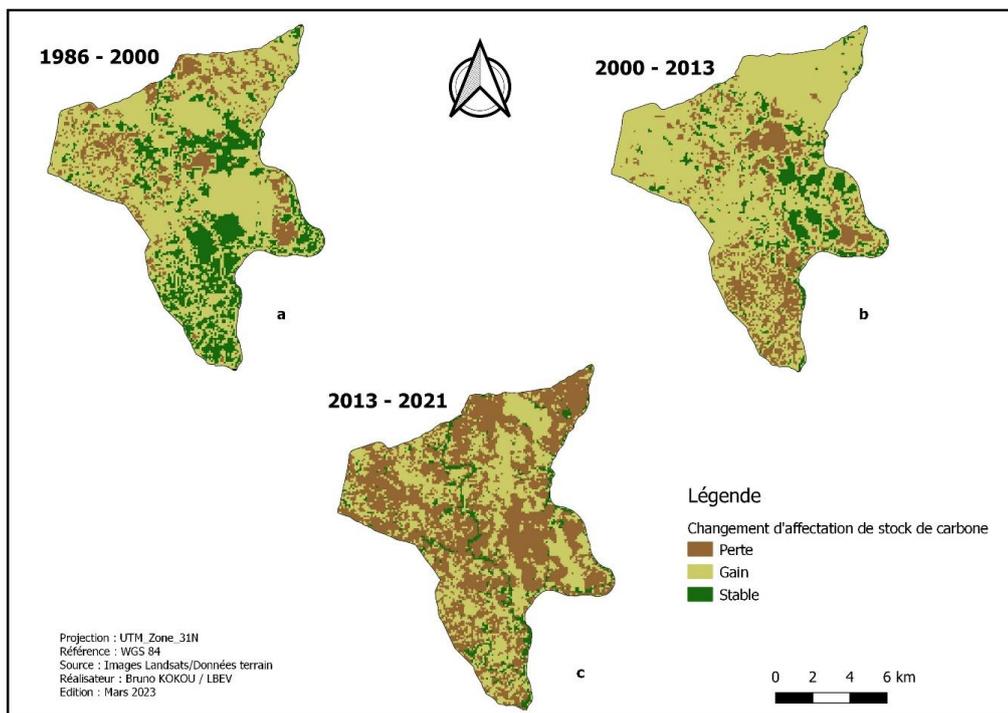


Figure 6. Changements d’affectations des stocks de carbones aériens de la FCAM

Tableau 4. Changement d’affectation et flux de stock de carbone aérien de la FCAM

Année	Unité d'occupation	Changement d'affectation de stock de carbone		
		Perte (t)	Gain (t)	Stable (t)
1986 - 2000	FD/R	8688,6	965,54	11179,66
	FC/SB	5832,8	3263,38	13669,34
	SA/Sa	86,07	7318,21	712,7
	CJ	0	0	0
	Total	14607,46	11547,13	25561,7
2000 - 2013	FD/R	10514,28	1020,6	6699,06
	FC/SB	10488	2413	9612,8
	SA/Sa	738,41	291	3485,35
	CJ	3,19	2,37	98,8
	Total	21743,41	3726,2	19895,29
2013 - 2021	FD/R	1601,6	1068,24	3894,11
	FC/SB	9023,8	3537,39	1675,75
	SA/Sa	3698,67	269,64	5006,5
	CJ	70,4	18	826,3
	Total	14394,42	4893,27	11402,66

FD/R : Forêt dense/riveraine ; FC/SB : Forêt claire/Savane boisée ; SA/SA : Savane arborée/Savane arbustive, CJ : Champs et jachères, Bâties et sol nus

3.2. Modélisation de la dynamique du carbone dans la FCAM à l’horizon 2050

La quantité de stock de carbone dans la FCAM à l’horizon 2050 est fonction du modèle d’aménagement (Figure 7). Elle varie entre 0 et 10 697,65 tC en 2021 contre 0 et 7 957,065 t en 2050 avec le modèle d’anthropisation et va de 0 à 15214,97tC avec le modèle d’aménagement. Le modèle d’aménagement prédit une augmentation (27 807,01 tC) contre une régression dans le modèle d’anthropisation (- 8 157,525 tC).

Entre 2021 et 2050, toutes les unités d’occupation de sol connaîtront une variation de leurs stocks de carbone. Les types d’occupation du sol qui stockeront plus de carbone sont les forêts claires/savanes boisées et forêts denses/riveraines (Tableau 5). Dans

le modèle d'aménagement, les forêts claires/savanes boisées, les forêts denses et les savanes arborées connaîtront une augmentation de 6 023 tC, 1 729 tC, et 1 382 tC respectivement. Les champs/jachères connaîtront une perte de -1 328 tC. Les forêts denses/riveraines, les forêts claires/savanes boisées et savanes arborées/arbustives connaîtront une perte de -2 644,34 tC, -4 116,03 tC et -2 740,58 tC dans le modèle d'anthropisation. Seuls les champs/jachères connaîtront un accroissement (+1 343,43 tC). Le stock de carbone restera stable au niveau des bâtis et sols nus (0 tonne).

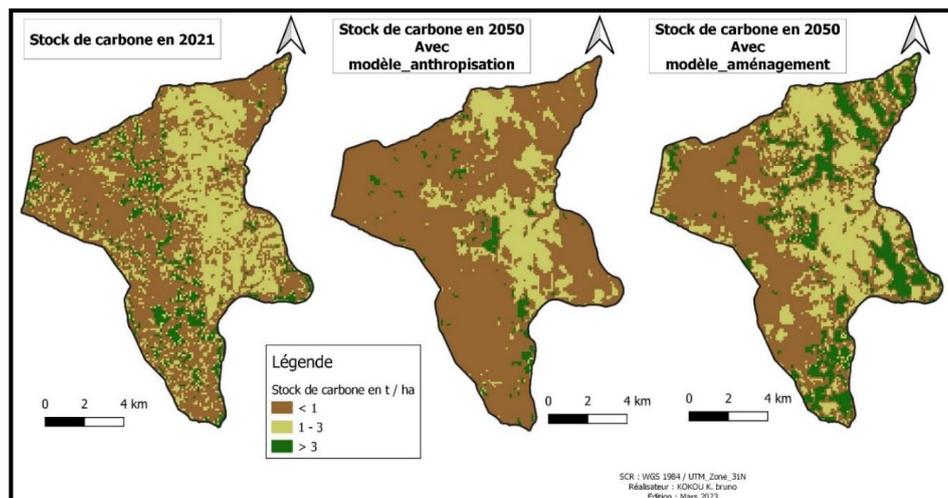


Figure 7. Stock de carbone en 2021 et en 2050

Tableau 5. Variation du stock de carbone en tC entre 2021 et 2050 en fonction du modèle d'aménagement

Unités Occupation	2021	2050_Anthropisation	2050_Aménagement
FD/R	5384,78	2740,44	7114,4
FC/SB	9191,55	5075,52	15214,97
SA/SA	10697,65	7957,065	12079,66
CJ	2978,26	4321,69	1650,22
BS	0	0	0
Total (en tonne)	28252,24	20094,715	36059,25

FD/R : Forêt dense/riveraine ; FC/SB : Forêt claire/Savane boisée ; SA/SA : Savane arborée/arbustive ; CJ : Champs et jachères ; BS : Bâtis et sols nus ; t : tonne

3.3. Valeur économique du flux du carbone entre 2021 et 2050

La valeur économique du carbone total en 2021 dans la FCAM est estimée à 3 672 791,2 \$ (2 203 674 720 F CFA) et celle de 2050 en modèle d'anthropisation et d'aménagement serait respectivement de 2 612 312,95 \$ (1 567 387 770 FCFA) et 4 687 702,5 \$ (2 818 621 500 FCFA). Le gain économique prédit à l'horizon 2050 en modèle d'aménagement dans les forêts denses, forêts claires/savanes boisées et champs/jachères s'élève à 1 014 911, 3 \$ (608.946.780 FCFA). De 2021 à 2050, la perte totale de la valeur des services écosystémiques en scénarios d'exploitation dans les galeries forestières/forêts denses, les forêts claires/savanes boisées et les savanes arborées/arbustives serait de 1 060 478,25 \$ (636.286.950 FCFA).

4. Discussion

Les formations végétales identifiées dans la FCAM présentent des caractéristiques structurales variables qui sont fonction du mode d'affectation des terres, de l'état de conservation et du niveau des pressions anthropiques exercées. Les résultats ont montré que la densité des individus ligneux augmente régulièrement des formations anthropisées aux formations naturelles fermées. Les plus fortes valeurs de la surface terrière et de densité des ligneux sont observées dans les forêts denses/riveraines et forêts claires/savanes boisées. Ces types de formations sont souvent faiblement sujettes aux perturbations anthropiques, dont le feu de végétation et la coupe illicite du bois d'œuvre et d'énergie (Kombate et al. 2019). Les fortes densités des ligneux s'expliqueraient également par les conditions naturelles, en particulier l'humidité du sol et à la densité du réseau hydrographique favorable au développement de la végétation en particulier dans les formations riveraines (Kombate et al. 2020). Par contre, les faibles densités dans les savanes arborées/arbustives et les champs/jachères sont les conséquences de la forte dégradation du couvert végétal due

aux activités anthropiques : l'agriculture, le feu de végétation et la carbonisation (Bouko et al. 2007; Kombate et al. 2020; Moumouni et al. 2017). L'installation des champs sont parfois suivie de brûlis, entraînant une destruction du couvert végétal et une perte de biomasse (Afelu et al. 2016; Mavinga et al. 2022). Cette déforestation corrélée aux activités de subsistance connexes, affecte négativement les services environnementaux (Baccini et al. 2017; Mazo et al. 2021).

La quantité totale du stock de carbone estimée dans la FCAM aurait certainement été plus élevée si l'on prenait en compte l'ensemble des types de biomasses constitutives des écosystèmes (Lescuyer and Locatelli 1999). Les résultats sur l'évaluation du stockage de carbone dans la biomasse aérienne sont directement liés à ceux des cartographies du couvert végétal. La qualité de ces cartographies dépend de la nature des images utilisées (Panzou et al. 2016). La quantité de biomasses et le stock de carbone sont inversement proportionnels au gradient de perturbation des terres. Les fortes quantités de carbone dans le paysage de la FCAM sont observées dans les forêts claires/savanes boisées et les forêts denses/riveraines. Ces résultats sont comparables à ceux de Dimobe et al. (2019) dans le parc national W au Burkina Faso. Ces taux élevés de carbone sont corrélés avec les paramètres dendrométriques, notamment le diamètre et la hauteur du fut.

La dynamique du stock de carbone des écosystèmes forestiers de la FCAM au cours des 35 dernières années montre une régression du stock de carbone suivant le gradient de perturbation croissante des terres. La déforestation du couvert végétal de la FCAM est à l'origine de la diminution de la quantité de carbone stockée par les écosystèmes de la FCAM. Les pressions anthropiques diverses ont entraîné une diminution de la capacité de séquestration de carbone. Ce impact de la pression d'utilisation des terres sur la capacité de séquestration de carbone des écosystèmes dans les aires protégées du Togo et de la sous-région ouest-Africaine (Kombate et al. 2023a; Kombate et al. 2023b; Qasim et al. 2016). Les plus faibles valeurs du stock de carbone enregistrées dans les écosystèmes les plus dégradés de la FCAM, notamment les champs, concordent avec les travaux de Balima et al. (2021) au Burkina-Faso. Ces derniers ont montré que la conversion des espaces boisés (ou forêts) en terre agricole réduit le potentiel de séquestration du carbone. D'autres travaux également ont montré que l'expansion agricole constitue le principal facteur de déforestation et de perte de stock de carbone des écosystèmes (Anobla and N'Dja 2016; Egbelou et al. 2021; Folega et al. 2021; Kombate et al. 2022; Kombate et al. 2019). Ces différentes observations pourraient permettre de confirmer l'hypothèse selon laquelle les peuplements forestiers non perturbés demeurent les principaux réservoirs et puits de carbone (Balima et al. 2021; Islam and Winkel 2017).

L'analyse de la dynamique de carbone montre une régression des stocks de carbone dans le paysage de la FCAM durant ces 35 dernières années. Cette diminution serait due aux activités anthropiques. Toutefois, la capacité globale de séquestration du carbone de la FCAM est nettement inférieure à celle de la forêt classée des Monts-Kouffe au Centre Bénin qui est de 11 858 947,25 tC (Zakari et al. 2022) et supérieure à celle de la réserve scientifique de Lamto en Côte-d'Ivoire (Gueulou et al. 2020) avoisinant 10 050 tC en 1986, puis 18 962,15 tC en 2017. Cette différence pourrait être due d'une part à la superficie de la zone d'étude, aux conditions climatiques et d'autre part le mode de gestion de ces différentes aires protégées. Ainsi, la réduction de la déforestation et de la dégradation des écosystèmes forestiers s'impose pour réduire les émissions de carbone provenant de la dégradation des terres (Balima et al. 2021). Par conséquent, la séquestration totale du carbone sur l'ensemble des types de végétation dans la FCAM (2,48 tC/ha) est inférieure à celle trouvée par Kombaté et al. (2022) dans la forêt classée de Missahohoe. Cette variation du stock de carbone serait due à la distribution de la surface terrière et de la densité des ligneux à l'hectare. En outre, le maintien et la conservation durables des écosystèmes non perturbés sont nécessaires pour accroître la capacité de séquestration du carbone des forêts (Gibbs et al. 2010).

La modélisation du stock et de la séquestration du carbone dans la FCAM montre une variation spatio-temporelle du carbone entre 2021 et 2050. Cette variation est marquée par le passage du stock de 28252,24 t de carbone à 20094,715 (modèle d'anthropisation) et 36059,25 (au modèle d'aménagement). La réduction potentielle du stock de carbone de 2021 à 2050 dans le scénario d'anthropisation s'expliquerait par le phénomène des effets de bordure qui pourrait faire progresser le front agricole de la périphérie vers l'intérieur de la FCAM. Cette variation du carbone serait liée aux différents processus de conversion ou de modification au sein des unités d'occupation du sol (Terefe Tolessa et al. 2017). Des résultats similaires ont été trouvés dans la réserve de tigres de Sariska en Inde (Babbar et al. 2021). De même l'étude réalisée dans le parc W au Bénin (Ahononga et al. 2021), a prédit une perte importante de carbone à l'horizon 2035, si les activités anthropiques responsables de la dégradation précédente dans le milieu sont maintenues. Les gains de carbone entre 2021 et 2050 dans les forêts claires/savanes boisées et champs/jachères résulteraient des mesures de protection, des activités de reboisement et de restauration (Babbar et al. 2021).

Dans le cadre d'une politique REDD pour prévenir la déforestation et améliorer la séquestration du carbone, les résultats de la modélisation (modèle d'aménagement) indiquent un renforcement du stock de carbone en 2050. Le stock variera sur le plan spatial en fonction des occupations du sol de la FCAM. La prévention de la déforestation et de la dégradation forestière est un moyen pour améliorer la séquestration du carbone. La valeur économique du carbone estimée dans la FCAM est d'environ 2 612 312,95 \$ suivant le modèle anthropisation et 4 687 702,5 \$ soit 360 dollars/hectare suivant le modèle d'aménagement. Ces profits peuvent contribuer à la réduction de la pauvreté et le renforcement du tissu économique des populations riveraines des aires du Togo et contribuer à une meilleure résilience des populations face au changement climatique.

5. Conclusion

Cette étude de cartographie de la dynamique du stock de carbone met à la disposition des conservateurs un outil scientifique indispensable à la prise de décisions en vue d'une gestion durable. L'étude révèle que les pressions anthropiques perturbent la structure et le fonctionnement écologiques des écosystèmes de la FCAM. La dynamique du stock de carbone varie suivant les années et les unités d'occupation du sol. Le stock de carbone augmente suivant un gradient décroissant de perturbation des unités d'occupation du sol. Les écosystèmes moins perturbés stockent plus de carbone que les écosystèmes anthropogènes. Les analyses ont montré qu'en scénario d'anthropisation, la forêt perdra sa capacité de séquestration de carbone et va séquestrer moins à l'horizon 2050 qu'en 2021. Par contre, en scénario d'aménagement, elle augmentera en matière de carbone séquestré compte tenu des mesures de protection et de restauration des écosystèmes. Sans mesures de gestion, le scénario d'exploitation sans aménagement simule un taux de déforestation de 11 % d'ici à 2050, avec une perte considérable des forêts claires/boisées. Cependant, avec une application des mesures de gestion, cette forêt pourrait connaître une reconstitution. La modélisation du stock et de la séquestration du carbone dans la FCAM a permis de mettre en évidence l'état de conservation de la forêt et sa contribution actuelle et future à l'atténuation des gaz à effet de serre. Les cartes obtenues sont des outils de prise de décision pour les gestionnaires et les autorités nationales, les ONG et les entreprises. Une attention particulière devrait être accordée à la gestion du feu de végétation, les pratiques agricoles et l'abattage des arbres.

Remerciements

Cette étude a été entièrement financée par l'Union européenne (UE)/AGRINATURA sous le programme « Gestion durable des écosystèmes tropicaux, basée sur la connaissance ». Nos remerciements chaleureux s'adressent à l'École Régionale postuniversitaire d'Aménagement et de gestion Intégrées des Forêts et Territoires tropicaux (ERAIFT) pour l'organisation des enseignements ; au Pr. Baudouin MICHEL, Directeur de l'ERAIFT ; au Pr. Jean-Pierre MATE, Secrétaire Académique et à la Recherche pour toutes les ressources mobilisées pour la bonne réalisation de cette étude. Au Pr Jean-Paul RUDANT, pour les conseils et orientations ; au Ministère chargé de l'Environnement du Togo qui a donné l'autorisation d'accès à la Forêt Classée d'Amou-Mono, facilité et accompagné les équipes lors des inventaires. Au Ministère de l'Enseignement Supérieur du Togo pour le soutien financier. Nous adressons enfin nos remerciements à tous ceux qui ont relu cet article et contribué à son amélioration.

Références

- Adjonou K et al. (2017) Vegetation dynamics patterns, biodiversity conservation and structure of forest ecosystems in the wildlife reserve of Togodo in Togo, West Africa *Int. J. Dev. Res.* 7:14549-14557 <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/5d6dc5e3-88f5-4c81-97dc-7a2d1a9ef376/content>
- Afelu B, Fontodji KJ, Kokou K (2016) Impact des feux sur la biomasse dans les savanes guinéo-soudaniennes du Togo *Vertigo* 16 <https://doi.org/10.4000/vertigo.17106>
- Ahononga FC, Gouwakinnou GN, Biauou SSH, Biauou S (2021) Vulnérabilité des terres des écosystèmes du domaine soudanien au Bénin de 1995 à 2015 *Bois & Forêts Des Tropiques* 346:35-50 doi: <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a36295>
- Akodéwou A, Oszwald J, Gazull L, Akpavi S, Akpagana K, Gond V, Saidi S (2020) Land Use and Land Cover Dynamics Analysis of the Togodo Protected Area and Its Surroundings in Southeastern Togo, West Africa *Sustainability* 12:1-23 doi:<https://doi.org/10.3390/su12135439>
- Akouhou SG et al. (2017) Plan d'aménagement et de gestion de l'aire protégée de Amou-Mono:269
- Anobla AOMM, N'Dja JK (2016) Dynamique de la végétation de Bamo et stocks de carbone dans la mosaïque de végétation *Eur. Sci. J.* 12:359-374 doi:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n18p359>
- Atakpama W, Agbetanu WKM, Atara LL, Biauou S, Batawila K, Akpagana K (2021) Biodiversité et gestion des feux de végétation dans la réserve de faune d'Abdoulaye au Togo *Synthèse* 27:51-64 <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/220715>
- Atakpama W, Egbelou H, Yandja M, Kombate B, Afelu B, Batawila K, Akpagana K (2023a) Vulnérabilité de la flore de la Forêt Classée de Missahohoe au feu de végétation *Ann. Rech. For. Algérie* 13:37-53 <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/592/13/1/219328>
- Atakpama W, Kombate B, Klevor KJA, Folega F, Batawila K, Akpagana K (2023b) Feu de végétation et diversité des formations végétales du Parc National Fazao-Malfakassa au Togo *Rev. Écosyst. Pay.* 03:48-65 doi:<https://doi.org/10.59384/recopays2023-3-1>
- Babbar D, Arendran G, Sahana M, Sarma K, Raj K, Sivadas A (2021) Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India *Journal of cleaner production* 2021 v.278:pp. 123333 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123333>

- Baccini A, Walker W, Carvalho L, Farina M, Sulla-Menashe D, Houghton R (2017) Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss *Science* 358:230-234 doi:10.1126/science.aam5962 doi: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam5962>
- Balima LH, Kouamé FNG, Bayen P, Ganamé M, Nacoulma BMI, Thiombiano A, Soro D (2021) Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa *Envi. Chal.*:2-9 doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100123>
- Bawa A (2017) Mutations des périphéries urbaines au sud du Togo: des espaces ruraux à l'épreuve du peuplement et de la marchandisation des terres *Sci. Terre*:239 p <https://agritrop.cirad.fr/591671/>
- Bawa DM, Folega F, Atato A, Diwediga B, Wala K, Akpagana K (2022) Écologie et anthropisation des habitats naturels de trois micros bassins versants adjacents du centre du Togo *Rech. Agron.* 20:15-41 <https://www.researchgate.net/publication/360067021>
- Bouko BS, Sinsin B, Soulé BG (2007) Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin *Tropicicultura* 25: 221-227 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131174489>
- Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner GA (1997) Root biomass allocation in the world's upland forests *Oecologia* 111:1-11 doi:<https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Chave J et al. (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests *Oecologia* 145:87-99 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave J et al. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees *Glob Chang Biol* 20:3177-3190 doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clec'h SL, Dufour S, Oswald J, Grimaldi M, Jégou N (2013) Spatialiser des services écosystémiques, un enjeu méthodologique et plus encore Spatialiser les services écosystémiques:205-223 https://hal.inrae.fr/hal-02537115/file/Livre_mardi_ecoserv_hdef_2021.pdf
- Crouzat É, Byczek C, Lasseur R, Cordonnier T, Longaretti P-Y, Lavorel S (2017) Cartographier les services écosystémiques : quelles données, quels modèles, quelles incertitudes ? Exemple autour du bassin de vie de Grenoble *Env. Urb.* 11 <https://doi.org/10.7202/1050487ar>
- Dimobe K, Kuyah S, Dabré Z, Ouédraogo A, Thiombiano A (2019) Diversity-carbon stock relationship across vegetation types in W National park in Burkina Faso *For. Ecol. Man.* 438:243-254 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.027>
- Dimobe K, Ouédraogo A, Soma S, Goetze D, Porembski S, Thiombiano A (2015) Identification of driving factors of land degradation and deforestation in the Wildlife Reserve of Bontioli (Burkina Faso, West Africa) *Glob. Ecol. Cons.* 4:559-571 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2015.10.006>
- Djeri EO, Djangba T, Sewa AA, Ouro-Landjo S, Albada A (2001) Situation des Ressources Génétiques Forestières du Togo Note Thématique sur les Ressources Génétiques Forestières:25
- Dourma M et al. (2017) La forêt classée d'Atakpamé : diversité, typologie, séquestration de carbone et activités anthropiques *J Rech Sci Univ Lomé (Togo)* 19:29-45 <https://www.ajol.info/index.php/jrsul/article/view/167464>
- Egbelou H, Atakpama W, Dourma M, Folega F, Akpagana K (2021) Dynamique spatio-temporelle et flore de la forêt d'Aboudjokopé au Togo *Synthèse* 27:37-50 <https://www.ajol.info/index.php/srst/article/view/220712>
- Ern H (1979) Die Vegetation Togos, Gliederung, Gefährdung, Erhaltung *Willdenowia* 9:295-315 doi:10.2307/3995654 <https://www.jstor.org/stable/3995654>
- Folega AA, Folega F, Woegan AY, Wala K, Akpagana K (2021) Dynamique des émissions de gaz à effet de serre liées au secteur foresterie et autres affectations des terres (FAT) dans le paysage du socle Eburnéen au Togo *Rev Écosyst. Pay. (Togo)* 01:58-72 https://lbev-univlome.com/wp-content/uploads/2022/01/05-Folega-et-al.-dec_2021.pdf
- Folega F, Kombate B, Konate D, Kanda M, Wala K, Akpagana K (2020) Inventaire et séquestration de carbone de la végétation de l'emprise urbaine de la ville de Dapaong, Togo *Rev. Esp. Géol. Soc. Mar.* 41:273-289 <https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/download/23515/12549>
- Ganamé M, Bayen P, Ouédraogo I, Balima LH, Thiombiano A (2021) Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems *Trees For. People* 4:3-15 doi:<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- Gibbs HK, Plevin RJ, O'hare M, Jones AD, Torn MS (2018) Greenhouse Gas Emissions from Biofuels' Indirect Land Use Change Are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated *Environ. Sci. Technol.* 44:8015-8021 <https://doi.org/10.1021/es101946t>
- Gibbs HK, Ruesch AS, Achard F, Clayton MK, Holmgren P, Ramankutty N, Foley JA (2010) Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:16732-16737 <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>

- Gueulou N, Douffi KG-c, Soro Y, Kone M, Bakayoko A (2020) Evaluation de la couverture forestière et du stock de carbone forestier de la réserve scientifique de Lamto (Côte d'Ivoire) *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 28:682-689 https://www.researchgate.net/profile/Nina_Gueulou/publication/341412916
- Islam SN, Winkel J (2017) Climate Change and Social Inequality DESA Working Paper 152:1-32
- Issiaka NT, Arouna O, Moumouni Issifou Y, Tente BA, Thomas O, Imorou Toko I (2020) Modélisation du stock de carbone dans le parc national du W au Bénin *Rev. ACAREF* 2:359-375 <https://revues.acaref.net/wp-content/uploads/sites/3/2020/11/Nourou-TOKO-ISSIKA-TAP.pdf>
- Kaina A, Wala K, Koumantiga D, Folega F, Akpagana K (2018) Impact de l'exploitation du bois-énergie sur la végétation dans la préfecture de Tchaoudjo au Togo *Rev. Géol. Univ. Ouagadougou* 1:69-88
- Kombate A, Folega F, Atakpama W, Dourma M, Wala K, Goïta K (2022) Characterization of Land-Cover Changes and Forest-Cover Dynamics in Togo between 1985 and 2020 from Landsat Images Using Google Earth Engine *Land* 11:1889 doi:<https://doi.org/10.3390/land11111889>
- Kombate B et al. (2023a) Dynamique de l'occupation de sol et modélisation du carbone de la Forêt Communautaire d'Alibi I *Ann. Rech. For. Algérie* 12:13-26 <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/592/13/1/219326>
- Kombate B et al. (2023b) Structure et modélisation du carbone de la Forêt Classée de Missahohoé au Togo *AJLP-GS* 6:42-61 doi:<https://revues.imist.ma/index.php/AJLP-GS/article/view/35320/19253>
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Atakpama W, Wala K, Akpagana K (2020) Spatio-temporal dynamics and habitat fragmentation within a central region of Togo *Agri. Sci. Res. J.* 10:291-305 https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Kombate+B%2C+Dourma+M%2C+Folega+F%2C+
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Woegan AY, Akpagana K (2019) Structure et potentiel de séquestration de carbone des formations boisées du Plateau Akposso en zone sub-humide au Togo *Afrique Sci* 15:70-79 <http://www.afriquescience.net/AS/15/7.pdf>
- Koumou Z (2019) Suivi des feux de végétation dans le parc national Fazao Malfakassa et ses terroirs riverains par imagerie satellitaire MODIS et landsat *Rev Sc Env Univ* 16:125-142 <https://hal.science/hal-02973742/>
- Koumou Z, Lare LY (2014) Impact de la tenure foncière sur la structure, la densité et le fonctionnement des ligneux dans les agrosystèmes en pays Tem (Togo) *Rev Sc Env Univ, Lomé (Togo)* 11:85-104 <https://hal.science/hal-01564388/>
- Lescuyer G, Locatelli B (1999) Rôle et valeur des forêts tropicales dans le changement climatique *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 260:5
- Mavinga MS, Kinkela SC, Lukoki LF, Binzangi KL (2022) Conséquences environnementales et écologiques de l'agriculture itinérante sur brûlis dans les environs du Territoire de Lukula *Int. J. Innov. Appl. Stud.* 36:142-147 <https://www.proquest.com/openview/a23360d67295a5496216b8bf41f9085b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2031961>
- Mazo I, Arouna O, Imorou IT (2021) Land use and variability of woody biomass in North Benin *AJLP-GS* 4:391-405 <https://ageconsearch.umn.edu/record/334446>
- Mba BMM, Gwenaëlle Pennober, Christophe Revillion, Philippe Rouet, David G (2021) Estimations, à partir de séries d'images Landsat, des évolutions de stocks de carbone de différentes formations en milieu équatorial côtier ; Cas de Libreville au Gabon *Rev. Franç. Photogram. Tél.* 223:2017-2231 doi:<https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.556>
- Mbow C (2009) Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal Doctorat d'Etat Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal <https://www.memoireonline.com/02/13/6912/c>
- MERF (2020) Niveau de Référence pour les Forêts (NERF) du Togo:56
- Moumouni YI, Arouna O, Zakari S (2017) Diversité floristique et structure des formations végétales dans le district phytogéographique du Borgou-nord au Bénin (secteur de l'arrondissement de Bagou) *Notes Sci. Hom. Soc.* 7:63-80 <https://shs.hal.science/halshs-01703053/>
- Pachauri RK, Reisinger A (2008) Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse GIEC:35 <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/CCCIC/ccc/atmosphere/data/rapport-giec.pdf>
- Panzou GJL, Doucet J-L, Loumeto J-J, Biwole A, Bauwens S, Fayolle A (2016) Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines *BASE* 20:508-522 <https://hdl.handle.net/2268/203533>
- Polo-Akpisso A et al. (2018) Habitat biophysical and spatial patterns assessment within Oti-Keran-Mandouri protected area network in Togo *Int. J. Biodiv. Conserv.* 10:214-229 doi:<https://doi.org/10.5897/IJBC2017.1139>
- Polo-Akpisso A, KperkoumaWala, Souleman O, Folega F, Akpagana K, Tano Y (2020) Assessment of Habitat Change Processes within the Oti-Keran-Mandouri Network of Protected Areas in Togo (West Africa) from 1987 to 2013 Using Decision Tree Analysis *SCI* 2:2-18 doi:<https://doi.org/10.3390/sci2010001>

- Qasim M, Porembski S, Sattler D, Stein K, Thiombiano A, Lindner A (2016) Vegetation Structure and Carbon Stocks of Two Protected Areas within the South-Sudanian Savannas of Burkina Faso *Environments* 3:3-16 doi:10.3390/environments3040025 <https://doi.org/10.3390/environments3040025>
- Sawadogo L et al. (2010) Allometric prediction of above-ground biomass of eleven woody tree species in the Sudanian savanna-woodland of West Africa *J. For. Res.* 21:475-481 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-010-0101-4>
- Tchamiè TTK (1996) Aires protégées du Togo : nécessité d'une redéfinition des stratégies de conservation et de protection de la faune *Bull Flamboyant* 39:12-15 [tps://www.google.com/search?q=Tchamiè+TTK+\(1996\)](https://www.google.com/search?q=Tchamiè+TTK+(1996))
- Terefe Tolessa, Feyera Senbeta, Moges Kidane (2017) The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia *Ecosystem Services* 23:47-54 <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.010>
- Tol RSJ (2009) The economic effects of climate change *J. Econ. Pers.* 23:29-51 <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6bf5f74222620097475933ad8ee1e9f29bddd7f5>
- Traoré S, Djomo, A. N., N'guessan, A. K., Coulibaly, B., Ahoba, A., Gnahoua, G. M., N'guessan, É. K., Adou Yao, C. Y., N'Dja, J. K., & Guédé, N. Z. (2018) Stand Structure, Allometric Equations, Biomass and Carbon Sequestration Capacity of *Acacia mangium* Wild. (Mimosaceae) in Côte d'Ivoire *Open J. For.* 8 <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- Walter L et al. (2010) Evaluation of wheat or corn dried distillers' grains with solubles on performance and carcass characteristics of feedlot steers *Canadian J. Anim. Sci.* 90:259-269 <https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1404946>
- Yude Pan et al. (2011) A large and persistent carbon sink in the world's forests *Science* 333:988-993 <https://cea.hal.science/cea-00819253>
- Zakari Soufouane et al. (2022) Potentiel de séquestration de carbone des formations forestières dans la forêt classée des Monts-Kouffé au Centre-Bénin *REGSM*:195-213 <https://revues.imist.ma/index.php/EGSM/article/download/30087/15640>