

## Article de recherche

Reçu: 10 Octobre 2022/Accepté: 17 Novembre 2022

# Dynamique de l'occupation de sol et modélisation du carbone de la Forêt Communautaire d'Alibi 1

B. Kombate<sup>1\*</sup>, W. Atakpama<sup>1</sup>, H. Egbelou<sup>2</sup>, K. Ahuide<sup>1,2</sup>, M. Dourma<sup>1</sup>, F. Folega<sup>1</sup>, K. Batawila<sup>1</sup>, K. Akpagana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de botanique et écologie végétale, département de Botanique, Faculté des Sciences (FDS), Université de Lomé (UL), 1 BP 1515 Lomé

<sup>2</sup> Département de Foresterie Institut National de Formation Agricole (INFA) de Tové, BP 401 Kpalimé, Togo

\* Auteur correspondant : [parfaitbimare@yahoo.fr](mailto:parfaitbimare@yahoo.fr).

### ملخص

في المنطقة الوسطى من توغو، يمر استخدام الأراضي ديناميكية كبيرة بسبب الأنشطة البشرية المكثفة التي تهدد خدمات النظام البيئي. تم استخدام تصنيف متعدد التواريخ لصور لاندسات من 2000 و 2013 و 2020 لقياس التغيرات في الغطاء الأرضي ومحاكاة أفق 2050 باستخدام نموذج "محاكاة الأتمتة الخلوية" لامتداد "MOLUSCE" لبرنامج QGIS 2.18. تم استخدام بيانات الغابات لتقدير مخزون الكربون للنباتات المشجرة بناءً على معادلات القياس. تم عمل نمذجة الكربون باستخدام متوسط كميات الكربون لكل وحدة مساحة مقترنة بخرائط الغطاء الأرضي. انعكست ديناميكيات الغطاء الأرضي بين عامي 2000 و 2020 بشكل رئيسي من خلال زيادة غابات المعرض / الغابات الكثيفة (6.71% إلى 24.91%) وشجرة السافانا / السافانا الشجرية (28.60% إلى 42.62%). مخزون الكربون مرتفع في المعرض / الغابات الجافة الكثيفة (103.36 tC / ha) ومنخفضة في السافانا الخشبية / الشجيرات (41.07 tC / ha). أظهر النموذج أن إجمالي مخزون الكربون الساكن في منطقة الدراسة كان 222.104.58 طن لعام 2000. 356,630.70 طنًا لعام 2020 و 291,850.55 طنًا لعام 2050. من المتوقع خسارة إجمالية قدرها 64780.16 طنًا من الكربون. قدرت الخسارة الإجمالية لقيمة خدمة النظام الإيكولوجي بحلول عام 2050 بمبلغ 8421.420.37 دولارًا أمريكيًا بسبب التعدي البشري غير القانوني والأحداث المناخية مثل الجفاف. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية الغابات المجتمعية في مكافحة الاحتباس الحراري. يمكن استخدام النتائج التي تم الحصول عليها للوصول إلى رصيد الكربون وأيضًا في إعداد خطط الإدارة البيئية وصنع السياسات البيئية من قبل الحكومة والمنظمات الأخرى.

**الكلمات المفتاحية:** مخزون الكربون، الغابات المجتمعية، استخدام الأراضي، النمذجة، توغو

### Abstract

In the Central Region of Togo, land use is undergoing significant dynamics mainly due to intense human activities jeopardizing ecosystem services. A multi-date classification of Landsat images from 2000, 2013 and 2020 was used to quantify land cover changes and simulate the 2050 horizon using the "Cellular Automata Simulation" model of the "MOLUSCE" extension of QGIS 2.18 software. Forestry data were used to estimate the carbon stock of wooded vegetation based on allometric equations. Carbon modelling was done using average carbon amounts per unit area combined with land cover maps. The land cover dynamics between 2000 and 2020 were mainly reflected by an increase in gallery forests/dense forests (6.71% to 24.91%) and tree savannas/shrub savannas (28.60% to 42.62%). Carbon stock is high in gallery/dense dry forest (103.36 tC/ha) and low in woody/shrubby savannah (41.07 tC/ha). The model revealed that total static carbon storage in the study area was 222,104.58 t for the year 2000; 356,630.70 t for the year 2020 and 291,850.55 t for the year 2050. Between 2020 - 2050, a total loss of 64 780.16 t of carbon is predicted. The total loss of ecosystem service value by 2050 was estimated to be \$8,421,420.37 due to illegal human encroachment and climatic events such as droughts. This study highlights the importance of community forests in combating global warming. The results obtained could be used for accessing carbon credit and also in the preparation of environmental management plans and environmental policy making by the government and other organizations.

**Keywords:** carbon stock, community forest, Land use, modelling, Togo

### Résumé

Dans la Région Centrale du Togo, l'occupation des terres connaît une dynamique importante principalement due aux activités humaines intenses mettant en péril les services écosystémiques. La classification multi-date des images Landsat de 2000, 2013 et 2020 a permis de quantifier les changements d'occupation du sol. Une simulation de l'occupation du sol à l'horizon 2050 est réalisée grâce au modèle « Cellular Automata Simulation » de l'extension « MOLUSCE » du logiciel QGIS 2.18. Le stock de carbone des formations végétales boisées a été estimé à partir des données forestières en se basant sur les équations allométriques. La modélisation du carbone s'est réalisée à partir des quantités moyennes de carbone par unité de surface combinée aux cartes d'occupation du sol. La dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2020 est traduite essentiellement par une progression des galeries forestières/forêts denses (6,71 % à 24,91 %) et des savanes arborées/savanes arbustives (28,60 % à 42,62 %). Le stock de carbone est élevé dans les galeries/forêts denses sèches (103,36 tC/ha) et faibles dans les savanes boisées/arbusives (41,07 tC/ha). La modélisation a révélé que le stockage statique total du carbone dans la zone d'étude était de 222 104,58 t pour l'année 2000 ; 356 630,70 t pour l'année 2020 et 291 850,55 t pour l'année 2050. Entre 2020 -2050, une perte totale de 64 780,16 t de carbone est prédite. La perte totale de la valeur des services écosystémiques à l'horizon 2050 a été estimée à 8 421 420,37 \$ en raison de l'empiètement humain illégal et des événements climatiques tels que les sécheresses. Cette étude souligne l'importance des forêts communautaires dans la lutte contre le réchauffement climatique. Les résultats obtenus pourraient être utilisés pour l'accès au crédit carbone, dans la préparation des plans de gestion de l'environnement et dans l'élaboration des politiques environnementales menées par le gouvernement et d'autres organisations.

**Mots clés :** Forêt communautaire, modélisation, Occupation du sol, stock de carbone, Togo.

## 1. Introduction

Les écosystèmes offrent plusieurs services qui sont cruciaux pour le bien-être et la survie de l'humanité (Reid et al. 2005 ; Atakpama et al. 2018). Cependant, ces services écosystémiques (SE) sont soumis à de fortes pressions en raison des activités anthropiques et du changement climatique (Polo-Akpisso et al. 2020 ; Folega et al. 2022). Les changements d'utilisation et d'affectation des terres sont considérés comme l'un des facteurs responsables de la perte et de la dégradation des SE (Dimobe et al. 2017 ; Paudyal et al. 2019 ; Folega et al. 2020b ; Kombate et al. 2020a). Ces changements dans les régions tropicales peuvent causer d'énormes quantités de perte de carbone (Bellassen et al. 2008 ; Dourma et al. 2017). Or, la séquestration du carbone forestier est l'un des moyens d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Les activités humaines responsables de la régression des superficies forestières sont entre autres les changements d'affectation et d'utilisation des terres, les mauvaises pratiques culturales, le surpâturage, les feux de végétation et l'exploitation incontrôlée du bois-énergie (Diwediga et al. 2015 ; Kaina et al. 2018 ; Mamane et al. 2018 ; Atakpama et al. 2019 ; Kombate et al. 2020a ; Mensah et al. 2022). Ces activités fondées sur les modes de subsistance des populations entraînent une déforestation parfois irréversible qui a un impact sur les SE notamment sur la capacité des écosystèmes forestiers à emmagasiner le carbone (Polasky et al. 2011 ; Diwediga et al. 2012).

Au Togo, bien que n'étant pas un pays forestier, les rares formations végétales naturelles existantes subissent de fortes pressions anthropiques (Kombate et al. 2020a ; Polo-Akpisso et al. 2020) à des fins agricoles et bois-énergie (Diwediga et al. 2012 ; Diwediga et al. 2015 ; Kaina et al. 2018). Ces menaces qui pèsent en général sur la diversité biologique et en particulier sur les écosystèmes forestiers amenuisent le potentiel de séquestration du carbone des formations végétales boisées avec un risque d'accentuer à l'échelle locale comme régionale des effets néfastes des changements climatiques (Kombate et al. 2019). Les conséquences qui

en découlent prennent de l'ampleur au fil des années et deviennent de facto source de vulnérabilité, de pauvreté ou de malnutrition des populations (Mbavumoja et al. 2022).

Compte tenu de l'intensité des pressions humaines sans cesse croissantes sur les écosystèmes forestiers, les populations de la préfecture de Tchamba notamment celles d'Alibi I ont érigé une forêt communautaire pour préserver les ressources naturelles essentielles pour leur subsistance. Tout comme la majorité des aires protégées et forêts communautaires (Atakpama et al. 2017 ; Folega et al. 2017a ; Mensah et al. 2022), la forêt communautaire d'Alibi 1 (FCA-1) n'est pas épargnée par les pressions agro-démographiques. Si elle est bien gérée, elle peut tout en contribuant à la génération des revenus pour la population (Atakpama et al. 2018) constituer un réservoir exceptionnel de carbone et de biodiversité. Les études existantes sur la FCA-1 se sont limitées à la détermination des taux de déforestation, à la dynamique du feu de végétation et les plantes fourragères (Dibegdina, 2021 ; Atakpama et al. 2022). Les effets futurs des changements sur l'occupation du sol et la valeur des services écosystémiques n'ont reçu aucune attention. Pourtant, la modélisation spatiale prédictive des changements d'affectation des terres et du stockage du carbone est devenue un outil nécessaire pour mieux comprendre la dynamique de l'occupation de sol et pour lutter contre le changement climatique.

La présente étude compte contribuer à la gestion durable des forêts communautaires au Togo. Plus spécifiquement, elle : (i) évalue l'état actuel de la conservation de la végétation de la FCA-1 ; (ii) prédit l'évolution des unités d'occupation de sol à l'horizon 2050 et (iii) estime son potentiel de séquestration du carbone en vue de rendre disponible les données nécessaires à la planification et à la prise de décision. Les résultats issus de la présente étude permettent de prioriser les efforts de conservation en vue d'une gestion durable des ressources naturelles de FCA-1.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Milieu d'étude

D'une superficie estimée à 5 496 ha, la FCA-1 est localisée dans la région Centrale du Togo, dans la préfecture de Tchamba et plus précisément dans le canton d'Alibi 1, à la lisière Nord de la Réserve de Faune d'Abdoulaye (Figure 1). Elle est limitée à l'Ouest par le fleuve Mono, à l'Est par la rivière Ogou et au Nord par le village d'Agbawiliga. Du point de vue phytogéographique, la FCA-1 est incluse dans la zone écologique III (Ern, 1979) principalement couverte des forêts claires, de savanes diverses, de forêts galeries et d'îlots de forêts denses (Dibegдина, 2021).

Le relief est marqué par la plaine centrale présentant un paysage en interfluve (altitude comprise entre 250 et 350 m) reposant sur le socle cristallin granito-gneissique de l'unité structurale de la plaine bénino-togolaise. Les sols rencontrés sont de types ferrugineux tropicaux. On distingue : les sols peu profonds limono-argileuse, les sols profonds sablo-limono-argileux et les sols profonds sablo-limoneux. Le régime pluviométrique est caractéristique des climats tropicaux unimodaux. La pluviométrie varie entre 1200 et 1300 mm/an avec un maximum de pluie en août. Les températures mensuelles varient entre 20 et 32 °C (avec une moyenne mensuelle de 26,5 °C).

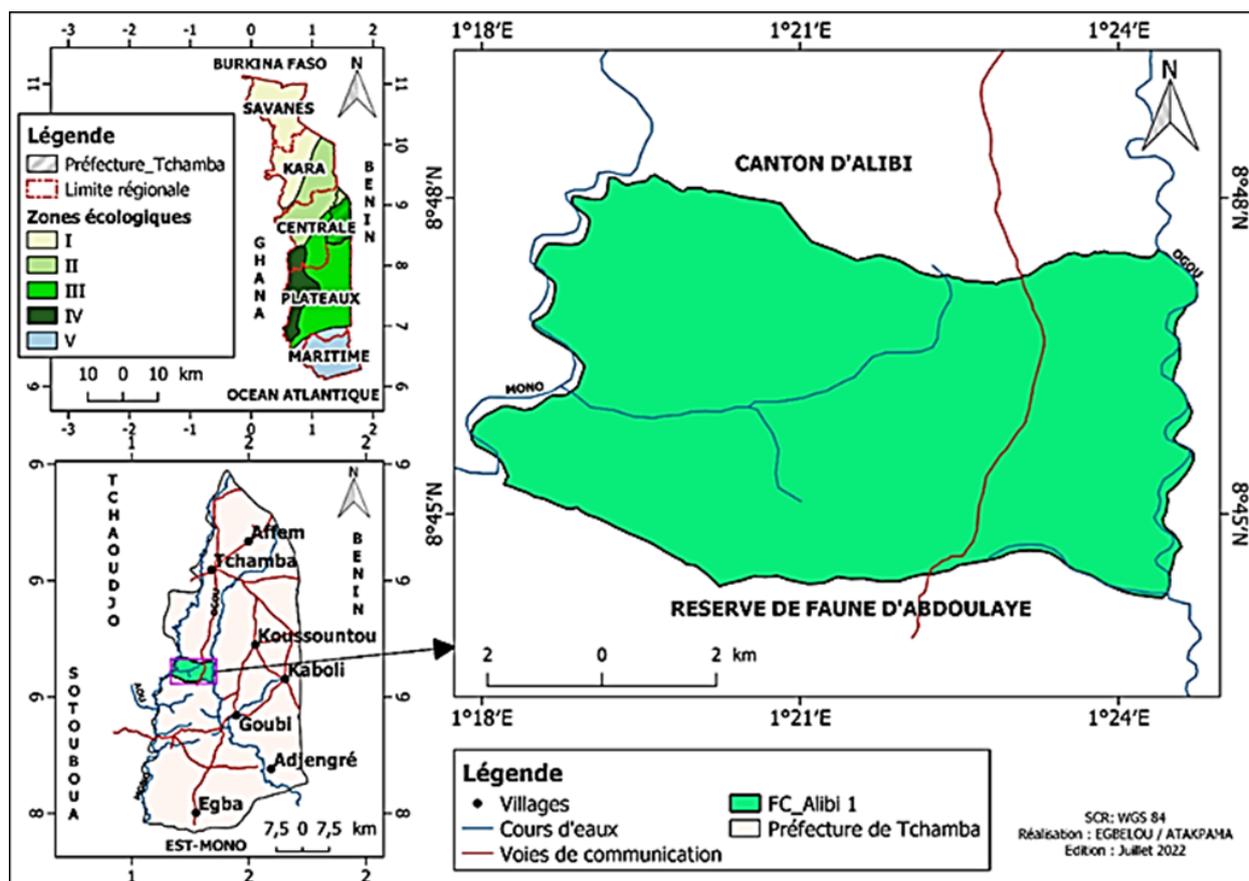


Figure 1. Localisation de la forêt communautaire d'Alibi 1 dans la Préfecture de Tchamba au Togo

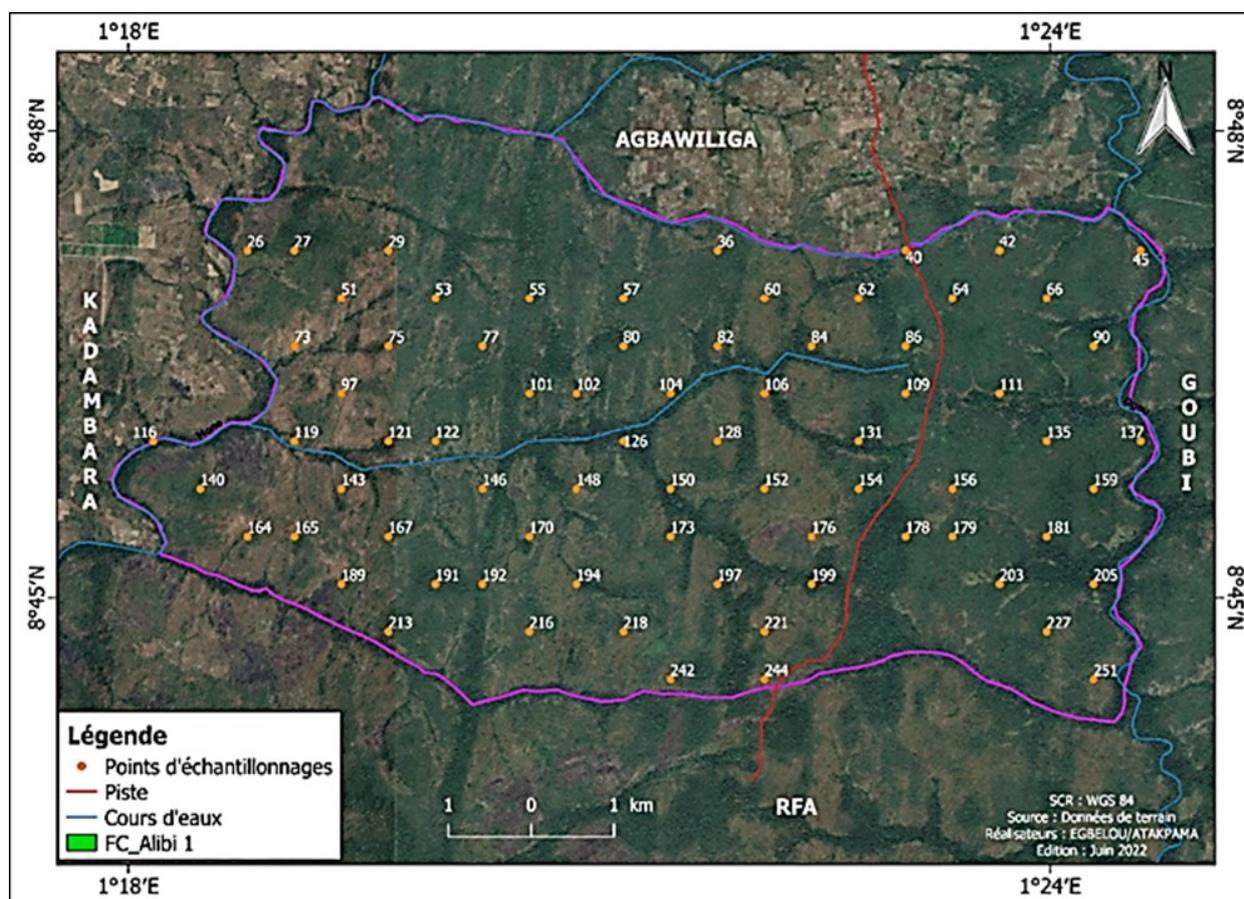


Figure 2. Répartition des points d'échantillonnage dans la FCA-1.

## 2.2. Collecte des données

### Acquisition des images

L'étude de la dynamique du carbone de la FCA-1 a été faite grâce aux données d'images Landsat 8 OLI, Landsat ETM+ et du modèle numérique d'élévation (DEM) de résolution de 30 m x 30 m. Compte tenu de la disponibilité des données, le choix des périodes s'est porté sur les années 2000, 2013 et 2020 (Tableau 1). Les images ont été téléchargées gratuitement sur le site web de l'Institut d'études

géologiques des États-Unis USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

### Données forestières

À partir du contour de la forêt communautaire d'Alibi 1, une maille de points de 500 m X 500 m est posée en se servant de l'outil QGIS. Aléatoirement, 74 points d'échantillonnage ont été retenus (Figure 2) au sein de cette maille pour les inventaires forestiers. Les placettes unitaire d'inventaires forestiers sont de 50 m x 20 m (Atakpama et

Tableau 1. Caractéristique des images Landsat

Année	2000	2013	2020
Type	Landsat ETM+	Landsat 8/OLI	Landsat 8/OLI
Date d'acquisition	04/12/2000	30/11/2013	19/12/2020
Path/Row	193/54	193/54	193/54

al. 2021). Les paramètres dendrométriques, la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, diamètre à 1,30 m du sol)  $\geq 10$  cm (Folega et al. 2017b) ont été relevés pour des tiges d'arbres. Les tiges dont le DHP  $< 10$  cm ont été considérées comme régénération potentielle et ne sont pas pris en compte dans ce travail. Les densités spécifiques du bois de chaque arbre inventorié ont été extraites d'une base de données globale (Zanne et al. 2009). Pour les espèces dont la densité spécifique n'est pas connue, il a été attribué une densité moyenne  $\rho = 0,58 \text{ t/m}^3$  (Chave et al. 2014).

### 2.3. Traitement des données

L'analyse des occupations de sol, le traitement s'est déroulée en quatre (4) phases à savoir la correction radiométrique/atmosphérique, l'extraction de la FCA-1, la classification et la vectorisation. La correction radiométrique/atmosphérique a consisté à la correction de l'image Landsat par l'outil "Radiometric Correction" du logiciel ENVI 4.7. L'extraction de l'image multi spectral de la zone d'étude a consisté à découper l'image prétraitée en superposant sur cette dernière le contour de la FCA-1. La classification s'est basée sur la connaissance du terrain notamment les données d'inventaires forestiers et les points de vérification complémentaire et les images de Google Earth. Il s'agit de l'identification visuelle d'un certain nombre d'éléments ou d'objets naturels ou artificiels qui peuvent être ponctuels, linéaires ou surfaciques sur l'image.

La composition colorée RGB 6-5-4 a été faite selon une combinaison des bandes spectrales reposant sur le principe d'affectation des bandes d'images à trois (3) plans d'affichage basé sur trois (3) couleurs primaires : rouge, vert et bleu. Après visualisation de l'image multi spectrale sous compositions colorée, le renseignement du ROI (Regions of interest) a été fait, suivi de la sélection des parcelles d'entraînement, et la description des différentes classes. Dans le but d'éliminer les petits points, trois (3) opérations de filtrage à savoir : Sieves classes (pour éliminer les pixels isolés), Clump classes (pour homogénéiser les classes) et Majority/minority/analysis (pour lisser les classes après l'opération clump classes) ont été appliquées à l'image classifiée.

Une fois la classification terminée, l'évaluation de la précision a été menée afin de valider les résultats. La matrice de confusion (%) et deux (2) indices de validation de classification que sont la précision globale (proportion de pixels bien classés, calculés en pourcentage) et l'indice de Kappa (rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés) ont été déterminés (Skupinski et al. 2009). La nomenclature des différentes classes a été établie suivant la classification du Togo. Cinq (5) classes d'occupations du sol ont été définies : (1) les galeries forestières/forêts denses, (2) les forêts claires/savanes boisées/agroforêts, (3) les savanes arborées/arbustives, (4) champs/jachères, (5) les agglomérations. Suite à la classification, l'image raster a été vectorisée, puis exportée dans le logiciel QGIS 2.18.18 pour calculer les superficies des occupations de sol.

L'évaluation de l'évolution des unités d'occupations du sol est déterminée en se servant d'une matrice de transition. L'évolution moyenne annuelle (T annuel en %) est calculée selon la formule :  $T \text{ annuel} = [(Sf - Si)/(Si \times \text{durée} (i-f))] * 100$ , Si = Superficie initiale de l'occupation du sol, Sf = Superficie finale de l'occupation du sol et Durée (i-f) = Nombre d'années écoulées entre i et f.

Afin de prédire l'occupation de sol à l'horizon 2050, deux (2) étapes ont été entreprises dans le logiciel QGIS 2.18.18 grâce à l'extension MOLUSCE (« Modules for Land Use Change Evaluation », Modules d'évaluation de la dynamique d'occupation de sol.). La première étape du modèle à consister à introduire les cartes des unités d'occupation de sol du début (2000) et de la fin (2013) dans MOLUSCE. Les facteurs environnementaux issus du DEM tels que la pente et l'aspect du terrain ont été alimentés dans le modèle pour obtenir une carte de changement de la couverture terrestre à partir de laquelle le modèle d'occupation de sol de la FCA-1 de 2020 est établi. L'occupation du sol de 2020 a été utilisée comme la carte de référence pour évaluer la performance du modèle. Le coefficient de kappa a été aussi utilisé pour évaluer l'efficacité du modèle. La deuxième étape a consisté à faire la projection à l'horizon 2050 après vérification du modèle à l'horizon 2020.

L'estimation des stocks de carbone s'est faite suivant deux (2) pools grâce aux données dendrométriques. La biomasse aérienne (BA) est calculée suivant les équations allométriques classiques ap-

**Tableau 2.** Valeurs moyennes des stocks de carbone par unités d'occupation de sol dans la FCA-1 au Togo.

Occupation de sol	Stock de carbone (t/ha)
Forêts claires/Savanes boisées	42,93
Galeries forestières/Forêts denses	103,36
Jachères	0
Savanes arborées/Savanes arbustives	41,07

plicables à la zone d'étude (Chave et al. 2005). Le calcul de la biomasse souterraine s'est fondé sur la relation de Cairns et al. (1997).

Le Stock de Carbone (SC) est déduit par la formule :  $SC = BT \times CF$ , CF = le ratio de carbone par défaut de toutes espèces confondues égal à 0,47 (GIEC, 2006). L'équivalent de CO<sub>2</sub> (EqC) est déterminé par la relation  $EqC = 3,67 \times SC$ .

Pour la spatialisation du carbone stocké, les informations sur les quantités moyennes de carbone par unité de surface (Tableau 2) ont été combinées aux cartes d'occupation du sol dans une grille spatiale, régulière et géoréférencée, qui s'étend sur toute la zone d'étude et est caractérisée par des mailles de 100 m de côté.

Pour évaluer la dynamique du carbone à l'horizon 2050, les paramètres d'entrées utilisés sont les cartes d'occupation de sol (2000, 2020 et 2050) et le stock de carbone de 2020. La modélisation du carbone s'est réalisée à partir des quantités moyennes de carbone par unité de surface combinée aux cartes d'occupation du sol dans une grille spatiale, régulière et géoréférencée qui s'étend sur toute la zone d'étude et caractérisée par des mailles de 100 m de côté (Mba et al. 2022). Des données additionnelles telles que la valeur marchande ou sociale du carbone séquestré sont utilisées pour estimer la valeur de ce service. Le coût social du carbone considérée est de 130 dollars américains (Tol, 2009).

### 3. Résultats

#### 3.1. Précision de la classification des images Landsat

Pour les trois (3) images satellites classifiées, les précisions globales obtenues sont respectivement de 87,51 % (2000), 95,06 % (2013) et 95,84 % (2020) avec le coefficient de Kappa supérieur à 80 % pour les trois (3) dates (Tableau 3). On peut con-

clure que la classification est statistiquement bonne.

#### 3.2. Dynamique de l'occupation du sol de la Forêt communautaire d'Alibi 1

Entre 2000 et 2013, les galeries forestières/forêts denses et les savanes arborées/arbustives ont progressé respectivement de 155,29 % et 43,09 %. Par contre, les forêts claires/savanes boisées et jachères ont régressé respectivement de -

**Tableau 3.** Précision de la classification des images

	2000			
	GF/FD	FC/SB	SA/Sa	J
GF/FD	92,55	4,18	0	0
FC/SB	6,18	94,51	5,45	0,07
SA/Sa	1,19	1,23	77,81	2,31
J	0,08	0,08	16,74	97,63
Précision globale : 87,51 %. Coefficient de kappa : 0,83				
	2013			
	GF/FD	FC/SB	SA/Sa	J
GF/FD	95,06	2,12	1	0
FC/SB	3,29	95,42	3,30	0
SA/Sa	1,40	2,46	93,89	2,42
J	0,24	0	1,81	97,58
Précision globale : 95,06 %. Coefficient de kappa : 0,93				
	2020			
	GF/FD	FC/SB	SA/Sa	J
GF/FD	96,53	4,11	0	0
FC/SB	2,79	93,89	1,48	0
SA/Sa	0,68	2	96,44	1,59
J	0	0	2,08	98,41
Précision globale : 95,84 %. Coefficient de kappa : 0,94				

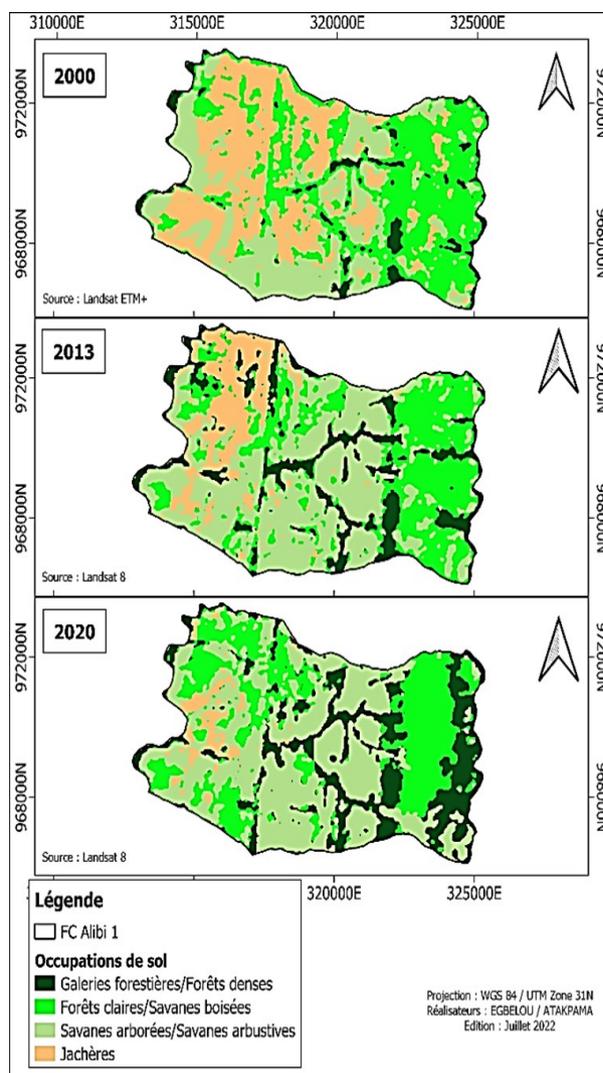
18,64 % et -58,53 %. La même tendance a été observée de 2013-2020. Les galeries forestières/forêts denses et les savanes arborées/arbustives ont progressé respectivement de 45,46 % et 4,18 %. Par contre, les forêts claires/savanes boisées et jachères ont régressé respectivement de -3,41 % et -74,61 % (Tableau 4, Figure 3).

L'analyse de la matrice de transition (Tableau 5) ressort une importante modification des unités

**Tableau 4 :** Évolution annuelle des superficies

Occupation de sol		FC/SB	GF/FD	J	SA/Sa
2000	Ha	2402,36	427,47	1717,14	1821,50
	%	37,72	6,71	26,96	28,60
2013	Ha	1954,44	1091,29	712,03	2606,44
	%	30,71	17,15	11,19	40,95
2020	Ha	1887,88	1587,42	180,75	2715,46
	%	29,63	24,91	2,84	42,62

d'occupation de sol entre 2000 et 2020. Les galeries forestières/forêts denses se sont dégradées au profit des forêts claires/savanes boisées (4,04 %), savanes arborées/arbustives (2,13 %) et des jachères (0,24 %). Les forêts claires/savanes boisées se sont végétalisées (43,76 %) pour donner les galeries forestières/forêts denses. Elles se sont aussi dégradées pour donner les savanes arborées/arbustives (17,37 %) et les jachères (0,31 %). Les savanes arborées/arbustives se sont végétalisées pour donner des galeries forestières/forêts denses (6,87 %) et des forêts claires/savanes boisées (20,81 %). Une partie de cette occupation s'est dégradée pour donner des jachères (2,70 %). Les jachères quant à elles se sont végétalisées pour donner des galeries forestières/forêts denses (1,49 %), forêts claires/savanes boisées (29,04 %) et savanes arborées/arbustives (64,28 %). Au même moment, certaines proportions de ces unités d'oc-

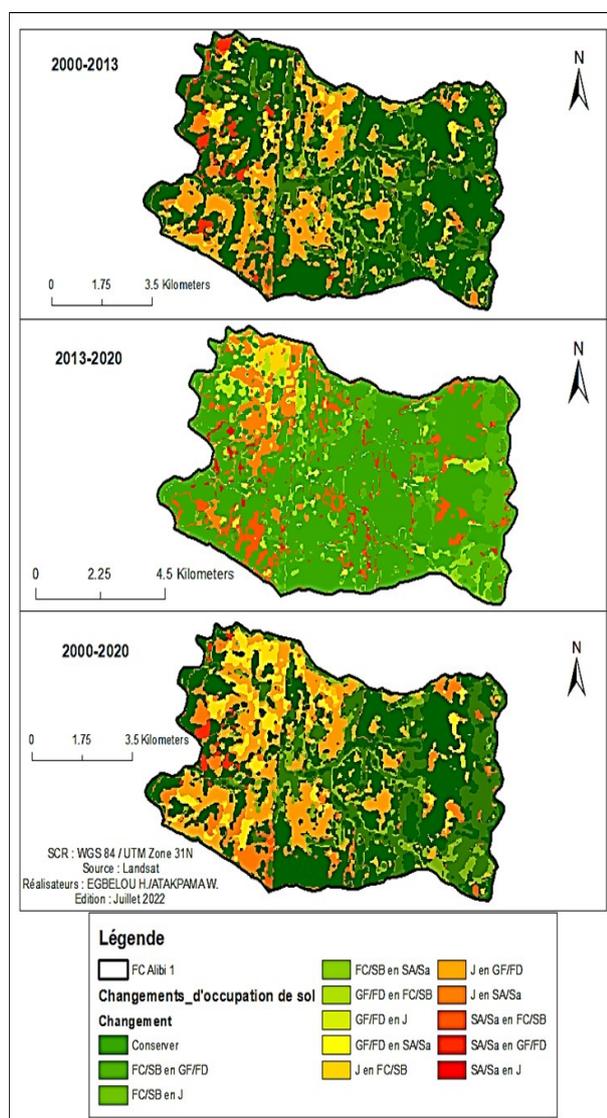


**Figure 3.** Occupations du sol de la FC d'Alibi 1 en 2000, 2013 et 2020

cupations de sol sont restées intactes (Figure 4) : galeries forestières/forêts denses (93,59 %), forêts claires/savanes boisées (38,59 %), savanes

**Tableau 5.** Matrice de transition des unités d'occupation du sol 2000-2020

Changements de	à	2020 (%)				
		GF/FD	FC/SB	SA/Sa	J	
2000 (%)	GF/FD	0,94	0,04	0,02	0,00	
	FC/SB	0,44	0,39	0,17	0,00	
	SA/Sa	0,07	0,21	0,70	0,03	
	J	0,01	0,29	0,64	0,05	



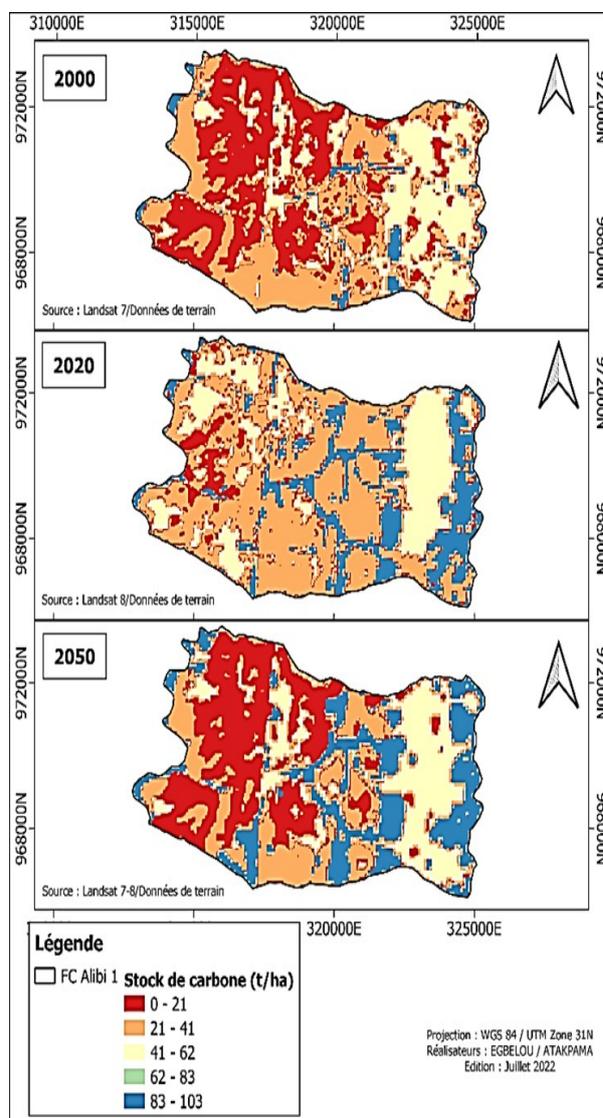
**Figure 4 :** États des occupations du sol de la FCA -1 entre 2000-2013, 2013-2020 et 2000-2020.

GF/FD : galeries forestières/forêts denses, FC/SB : forêts claires/savanes boisées, SA/Sa : savanes arborées/arbustives et J : jachères

arborées/arbustives (69,62 %) et jachères (5,19 %).

### 3.3. Stock et séquestration du carbone dans la FCA-1

L'estimation du carbone séquestré pour l'année 2000, 2020 et 2050 de la forêt communautaire



**Figure 5.** Stock de carbone prédit en 2000, 2020 et 2050 dans la FCA-1

d'Alibi 1 montre une grande variabilité spatio-temporelle (Figure 5, Tableau 6). Le stock de carbone varie entre 0 t et 222 104,58 t à l'an 2000 contre 0 t et 356 630,70 t en 2020 et 0 t et 291 850,55 t en 2050. À l'horizon 2050, le stock carbone connaîtra une régression de 64 780,16 t soit une perte de 8 421 420,37 \$.

Les forêts claires/savanes boisées ont stocké plus de carbone en 2000, les galeries forestières/

**Tableau 6.** Stock de carbone de 2000, 2020 et 2050 par unité d'occupation du sol.

Quantité de carbone 2000		
Occupation	Stock de carbone (t)	Coût (\$)
FC/SB	103 129,18	13 406 793,84
GF/FD	44 178,53	5 743 208,60
J	0,00	0,00
SA/Sa	74 796,87	9 723 593,35
Quantité de carbone 2020		
Occupation	Stock de carbone (t)	Coût (\$)
FC/SB	81 034,30	10 534 459,55
GF/FD	164 070,56	21 329 172,82
J	0,00	0,00
SA/Sa	111 525,84	14 498 359,62
Quantité de carbone 2050		
Occupation	Stock de carbone (t)	Coût (\$)
FC/SB	83 478,70	10 852 231,21
GF/FD	163 157,93	2 1 210 530,36
J	0,00	0,00
SA/Sa	45 213,92	5 877 810,04

forêts denses en 2020 et 2050 (Tableau 6). Entre 2020 et 2050, toutes les unités d'occupations de sol connaîtront une variation de leur stock de carbone (Tableau 6). Ainsi, les forêts claires/savanes boisées augmenteront leur carbone de 2 444,4 t. Les galeries forestières/forêts denses et les savanes arborées/arbustives auraient perdu respectivement de 912,63 t et de 66 311,92 t. Le stock de carbone resterait stable au niveau des jachères (0 t).

#### 4. Discussion

La présente étude a montré les possibilités qu'offre l'imagerie satellitaire pour la cartographie, la modélisation et l'analyse des changements de l'occupation du sol. La validation de la classification supervisée a été effectuée à travers la précision globale et le coefficient de Kappa en utilisant la matrice de confusion. L'estimation de la qualité de la classification est indiquée par le coefficient Kappa. Une valeur de 0,75 signifie que 75 % des pixels classés ne sont pas dus au hasard (Girard et Girard, 2010). Ce coefficient tient compte des erreurs en lignes et en colonnes de la matrice de confusion. Dans la FCA-1, la précision globale de la classification des images Landsat 2000, 2013 et 2020 est respectivement de 87,51 %, de 95,06 % et de 95,84

% avec un coefficient de Kappa de 0,83, de 0,93 et de 0,94. Les valeurs de ces deux (2) indices de précisions sont fiables et statistiquement acceptables (Pontius, 2000 ; Dimobe et al. 2017).

Dans la FCA-1, la dynamique régressive des forêts claires/savanes boisées serait due aux changements d'affectation des terres et aux activités anthropiques. Dourma et al. (2012) relevaient dans leurs études que ces types de formations végétales sont devenus la cible privilégiée d'un certain nombre d'exploitants de bois d'œuvre à cause de leurs forts potentiels en ligneux. De façon globale, l'on note une régression des formations anthropogènes dans la FCA-1. Ce résultat est comparable à celui observé dans la forêt d'Aboudjokopé dans la préfecture de l'Agou au Togo (Egbelou et al. 2021). Par contre, la majorité des études sur les aires protégées rapportent une progression des formations anthropogènes. La régression des formations forestières au profit des jachères et des champs ont été rapportées par plusieurs études de la dynamique de l'occupation du sol des aires protégées et forêts communautaires au Togo (Atsri et al. 2018 ; Polo-Akpisso et al. 2020 ; Mensah et al. 2022). La tendance reste similaire aussi dans la sous-région (Avakoudjo et al. 2014 ; Dimobe et al. 2017 ; Mamane et al. 2018 ; Mazo et al. 2020 ; Mbaiyetom et al. 2020).

Dans cette étude, on note que les changements dans les unités d'occupation du sol constituent un facteur important de la variabilité des services écosystémiques. L'augmentation du pouvoir de séquestration de carbone des galeries forestières/forêts denses pourrait être due à la reconstitution progressive du couvert végétal de ces formations, l'augmentation de la densité et du diamètre des arbres. Par ailleurs, les conditions favorables à la régénération et au développement des ligneux au sein de ces formations contribuent suffisamment à la croissance en hauteur et par conséquent à l'augmentation du stock de carbone. Par contre dans les savanes arborées/arbustives, l'on note un faible stock de carbone. La dominance des individus de faible diamètre et les faibles densités d'arbre par comparaison aux galeries forestières/forêts denses sèches justifient la faible capacité de séquestration de carbone. Par ailleurs, l'incidence fréquente du feu de végétation dans ces formations constitue un facteur de réduction de la croissance des ligneux et de la perte périodique du carbone (Atakpama et al. 2021).

L'évaluation de la dynamique spatio-temporelle de la végétation a relevé la régression des galeries forestières/forêts denses sèches et jachères/savanes arbustives au profit des savanes arborées/arbustives. Ces changements d'occupation ressortent la reconstitution de l'écosystème imputable à la politique de conservation et de restauration des aires protégées entreprise par le gouvernement et l'implication des populations riveraines dans la protection des écosystèmes de la FCA-1. Ces mesures de protection ont permis la réduction de l'intensité de feu de végétation et l'augmentation du couvert des formations denses dans la réserve de faune, une aire protégée contiguë de la FCA-1 (Atakpama et al. 2021 ; Dibegdina, 2021).

Les biens et services rendus par les forêts aux communautés riveraines sont multiples et variés. Parmi ceux-ci, la séquestration du carbone occupe une place indéniable dans les processus de régulation du climat. Elle agit également sur beaucoup d'autres services notamment le service d'approvisionnement, de contrôle de l'érosion et de maintien de la biodiversité (Aveling, 2008 ; Ahononga et al. 2020 ; Folega et al. 2022). Le réchauffement et les dérèglements climatiques actuels résultent largement d'une augmentation du rejet dans l'atmosphère de GES notamment le dioxyde de carbone

(Bourdé et al. 2022). Les simulations futures de ces GES ne cherchent pas à prédire l'avenir avec exactitude, mais permettent de localiser et de quantifier les marges de manœuvre existantes (Houet et Hubert-Moy, 2006).

Sous l'effet conjugué de la pression spatiale et agro-démographique, des changements majeurs interviendraient dans les unités d'occupation du sol de la FCA-1. Ces changements sont caractérisés par les processus de simplification et d'homogénéisation de la végétation impactent la qualité écologique des différents types de formations végétales boisées (Kombate et al. 2020a). La faible qualité écologique observée dans les savanes arborées/arbustives et les forêts claires/savanes boisées, quelle que soit la période d'étude est liée aux incendies de la végétation enregistrés dans ladite forêt communautaire et aux activités anthropiques notamment l'exploitation forestière frauduleuse. Le feu de végétation est source de perte de biomasse herbacée en réduisant la capacité de stockage de carbone dans le sol (Afelu et al. 2016 ; Atakpama et al. 2019) et de réduction de la productivité de la biomasse ligneuse (Kombate et al. 2020b ; Atakpama et al. 2021) dont la régénération et la croissance sont retardées. La variation de la biomasse et du carbone séquestré entre 2000 et 2020 est due à la distribution de la surface terrière et de la densité des ligneux (Kombate et al. 2019). Elle peut être influencée par les changements d'affectation des terres (Tolessa et al. 2017 ; Gouwakinnou et al. 2018).

Le carbone séquestré dans la FCA-1 (187,36 t/ha) est nettement supérieur aux estimations faites dans la forêt communautaire d'Agbedougbe (6,53 t/ha) dans la région des Plateaux du Togo (Folega et al. 2017a). Dans cette forêt communautaire, on note une très nette dominance des formations anthropogènes (champs/jachères) et une faible densité des ligneux par comparaison à la présente étude. L'implication des activités anthropiques dans la réduction de la densité des ligneux et de la capacité de séquestration du carbone est aussi relevée dans la forêt classée d'Atakpamé dans la région des plateaux au Togo (Dourma et al. 2017).

À l'horizon 2050, la régression de 64 780,16 t de carbone soit une perte de 8 421 420,37 \$ en terme monétaire est prédite. Cette perte pourrait être due aux événements climatiques tels que les sécheresses prolongées qui affectent le taux de

survie des formations végétales et contribuent de manière significative à la perte de la couverture forestière (Kliejunas et al. 2009). La diminution de la biomasse aurait des impacts sur l'homme et son environnement notamment sur les ressources alimentaires, la qualité de l'eau et la santé. La réduction prédite de la productivité de la biomasse au sein des galeries forestières/forêt denses sèches et des savanes arborées/arbustives sera liée à l'augmentation de la xéricité qui entrainera directement la réduction de la disponibilité de l'eau par conséquent l'humidité.

Au plan environnemental, la dynamique spatio-temporelle régressive des pluies annuelles, la récession des fréquences de jours pluvieux et l'augmentation des températures affecteront le cycle de l'eau et l'évapotranspiration. Plusieurs travaux ont montré que l'évapotranspiration tend à augmenter et à se généraliser en raison du réchauffement planétaire (Brun et Bostvironnois, 2022 ; Salas Y Méliá, 2022) avec un risque de désertification de certaines zones arides comprenant l'Afrique Subsaharienne (Kouassi et al. 2010 ; Gemenne et al. 2017). Plusieurs espèces de galeries forestières et des savanes inondables en pâtiront. La mortalité des espèces végétales impactera directement les moyens et les modes de vie des populations résidentes dépendantes des ressources forestières. En plus de la protection des écosystèmes et de la séquestration de carbone, l'une des fonctions principales des forêts communautaires est la génération des moyens de subsistance pour les communautés détentrices (Atakpama et al. 2017 ; Folega et al. 2017a ; Atakpama et al. 2018).

La mortalité des espèces et la perturbation du cycle du carbone réduiront la productivité des systèmes agraires. La réduction de la productivité des systèmes agraires couplés à l'augmentation de la population aura pour conséquence l'augmentation des besoins en produits forestiers et l'exacerbation de la pression sur les ressources forestières. Les galeries forestières sont la cible des exploitations forestières et agricoles eu égard à la disponibilité de leurs ressources, à la richesse de leur sol et à la disponibilité de l'eau utilisée dans l'irrigation des produits maraichères et la pratique de l'agriculture de contre saison (Diwediga et al. 2012 ; Folega et al., 2020a). Il est par conséquent nécessaire de mieux protéger ces écosystèmes afin de réduire les

envasements des cours d'eau et la mortalité des ressources ligneuses riveraines.

## 5. Conclusion

L'utilisation des imageries satellitaires (2000, 2013 et 2020) a permis de réaliser la cartographie diachronique, la modélisation et l'analyse des changements de l'occupation du sol de la FCA-1. Les résultats obtenus montrent que de 2000 à 2050, la dynamique de l'occupation du sol va générer des changements des unités d'occupation du sol. Les galeries forestières/forêts denses sèches et les jachères/arbustives seront particulièrement exposées au changement avec une intensité variable. La conséquence des changements dans la dynamique de l'occupation est la fragmentation du paysage entraînant la variation et/ou la perte de la biomasse forestière. Le potentiel de séquestration de carbone varie considérablement d'une formation à une autre et d'une année à une autre. À l'horizon 2050, cette variation du carbone pourrait entraîner une perte de 64 780,16 t de carbone soit 8 421 420,37 \$ en termes monétaire principalement due aux événements climatiques tels que les sécheresses prolongées. Sur l'ensemble de la FCA-1, les estimations de carbone séquestré (187,36 t/ha) semblent être négligeables pour supprimer les effets du changement climatique aux regards des besoins globaux, mais cela contribue de façon significative à l'atténuation. Si rien n'est fait pour limiter la perte des forêts et l'émission du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, cela engendrerait des coûts économiques supplémentaires sur le budget de l'état étant donné que les pertes de couverture forestière ont un impact direct sur l'homme et son environnement.

## Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le cadre du Mécanisme Forêt Paysan sous financement de la FAO (LoA-LBEV\_2021). Elle s'inscrit également dans le Programme d'appui à la lutte contre le changement climatique au Togo (PALCC-AMCC+ Togo) sur financement de l'Union européenne.

## Références

- Afelu B, Fontodji KJ, Kokou K (2016). Impact des feux sur la biomasse dans les savanes guinéo-soudaniennes du Togo. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 16 (1).
- Ahononga F, Gouwakinnou G, Biaou S, Ahouandjinou O, Biaou S, Sonounameto R (2020). Facteurs d'affectation des terres et effets sur les services écosystémiques et la biodiversité: Synthèse bibliographique. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), 30 (02): 51-63.
- Atakpama W, Agbetanu KMW, Atara LL, Biaou S, Batawila K, Akpagana K (2021). Biodiversité et gestion des feux de végétation dans la réserve de faune d'Abdoulaye au Togo. Rev. Sci. Technol., Synthèse, 27 (1): 51-64.
- Atakpama W, Amegnaglo KB, Afelu B, Folega F, Batawila K, Akpagana K (2019). Biodiversité et biomasse pyrophytes au Togo. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, 19 (3).
- Atakpama W, Asseki E, Kpemissi Amana E, Koudegnan C, Batawila K, Akpagana K (2018). Importance socio-économique de la forêt communautaire d'Edouwossi-copé dans la préfecture d'Amou au Togo. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 6 (1): 55-63.
- Atakpama W, Folega F, Azo AK, Pereki H, Mensah K, Wala K, Akpagana K (2017). Cartographie, diversité et structure démographique de la forêt communautaire d'Amavénou dans la préfecture d'Agou au Togo. Rev. Géog. Univ. Ouagadougou, 2 (6): 59-82.
- Atakpama W, Tchiritema B, Batawila K, AKPAGANA K (2022). Disponibilité et usage des plantes fourragères de la série de pâturage de la Forêt Communautaire d'Alibi 1 au Togo. Rev Écosystèmes et Paysages, 1 (3): Sous presse.
- Atsri HK, Konko Y, Cuni-Sanchez A, Abotsi KE, Kokou K (2018). Changes in the West African forest-savanna mosaic, insights from central Togo. PLoS one, 13 (10): e0203999.
- Avakoudjo J, Mama A, Toko I, Kindomihou V, Sinsin B (2014). Dynamique de l'occupation du sol dans le Parc National du W et sa périphérie au nord-ouest du Bénin. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 8 (6): 2608-2625.
- Aveling C (2008). La contribution de la biodiversité dans le maintien des produits et services forestiers. In: De Wasseige C., Devers D., De Marcken P., Eba'a Atyi R., Nasi R. & Mayaux P. (eds.) Les forêts du Bassin du Congo : Etat des forêts 2008. p 163-178. Office des publications de l'Union européenne.
- Bellassen V, Crassous R, Dietzsch L, Schwartzman S (2008). Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone. Etude Climat, 14 (202): 43.
- Bourdé A, Ronchi L, Amizet L (2022). Catastrophes climatiques: hier, aujourd'hui et demain. Médecine de Catastrophe-Urgences Collectives, 6 (3): 186-187.
- Brun É, Bostvironnois L (2022). Impacts du changement climatique à l'échelle mondiale: principaux enseignements du dernier rapport du groupe de travail II du GIECeds. Annales des Mines-Responsabilité et environnement. p 17-20.
- Cairns MA, Brown S, Helmer EH, Baumgardner GA (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia, 111 (1): 1-11.
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, Fölster H, Fromard F, Higuchi N, Kira T (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia, 145 (1): 87-99.
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WB, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global change biology, 20 (10): 3177-3190.
- Dibegdina M (2021). Dynamique du feu de végétation et de l'occupation du sol du complexe Abdoulaye-Alibi 1, INFA de Tové, Tové, Togo.
- Dimobe K, Goetze D, Ouédraogo A, Forkuor G, Wala K, Porembski S, Thiombiano A (2017). Spatio-temporal dynamics in land use and habitat fragmentation within a protected area dedicated to tourism in a Sudanian savanna of West Africa. Journal of Landscape Ecology, 10 (1): 75-95.
- Diwediga B, Batawila K, Wala K, Hounkpè K, Gbogbo AK, Akpavi S, Taton T, Akpagana K (2012). Exploitation agricole des berges : une stratégie d'adaptation aux changements climatiques destructrice des forêts galeries dans la plaine de l'Oti. African Socio. Rev., 16 (1): 77-99.
- Diwediga B, Wala K, Folega F, Dourma M, Woegan YA, Akpagana K, Le QB (2015). Biophysical and anthropogenous determinants of landscape patterns and degradation of plant communities in Mo hilly basin (Togo). Ecological Engineering, 85: 132-143.
- Dourma M, Souu E, Amana EK, Atakpama W, Folega F, Polo-Akpisso A, Wala K, Akpagana K (2017). La forêt classée d'Atakpamé : diversité, typologie, séquestration de carbone et activités anthropiques. Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé, 19 (3): 29-45.

- Dourma M, Wala K, Guelly KA, Bellefontaine R, Deleporte P, Akpavi S, Batawila K, Akpagana K (2012). Typologie, caractéristiques structurales et dynamique des faciès forestiers fragiles à Isoberlinia spp. en vue de leur gestion au Togo. *Bois et forêts des tropiques*, 313 (3): 19-34.
- Egbelou H, Atakpama W, Dourma M, Folega F, Akpagana K (2021). Dynamique spatio-temporelle et flore de la forêt d'Aboudjokopé au Togo. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, 27: 37-50.
- Ern H (1979). Die Vegetation Togos, Gliederung, Gefährdung, Erhaltung. *Willdenowia*, 9: 295-315.
- Folega F, Atakpama W, Pereki H, Djiwa O, Dourma M, Abreni K, Wala K, Akpagana K (2017a). Potentialités écologiques et socio-économiques de la forêt communautaire d'Agbedougbe (Région des Plateaux-Togo). *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, 19 (2): 31-50.
- Folega f, Datche-danha ke, Akim folega a, Woegan ay, Wala k, Akpagana k (2022). Diversité des services écosystémiques et utilisation des terres dans le paysage du socle Eburnéen au Togo. *Revue Nature et Technologie*, 14 (2): 61-75.
- Folega F, Diwediga B, Guuroh R, Wala K, Akpagana K (2020a). Riparian and stream forests carbon sequestration in the context of high anthropogenic disturbance in Togo. *Mor. J. Agri. Sci.*, 1: 39-49.
- Folega F, Kombate B, Konate D, Kanda M, Wala K, Akpagana K (2020b). Inventaire et séquestration de carbone de la végétation de l'emprise urbaine de la ville de Dapaong, Togo. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 41/42: 273-280.
- Folega F, Pereki H, Woegan A, Dourma M, Atakpama W, Maza M, Akpagana K (2017b). Caractérisation écologique de la Forêt Communautaire d'Edou-wossi-Cope (Région des Plateaux-Togo). *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, 19 (3): 47-61.
- Gemenne F, Blocher JMD, De Longueville F, Vigil Diaz Telenti S, Zickgraf C, Gharbaoui D, Ozer P (2017). Changement climatique, catastrophes naturelles et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 41 (3).
- GIEC (2006). Guide pour l'inventaire national des gaz à effet de serre : agriculture, foresterie et autre usage des terres, Institute for Global Environmental Strategies Hayama, Japan.
- Girard M-C, Girard C-M (2010). Traitement des données de télédétection-2e éd.: Environnement et ressources naturelles. Dunod.
- Gouwakinnou GN, Biaou S, Biaou SSH, Houéto FO (2018). Effet des changements d'occupation des terres sur le flux du carbone: un exemple des forêts classées de l'Alibori-Supérieur et de Ouénou-Bénou au Bénin. In: Orekan O.A.V., Mertens B, Ahononga C.F. & Tente H.A.B., eds. *Actes de la conférence scientifique internationale OSFACO: Images satellitaires pour un meilleur aménagement des territoires et une gestion durable de la biodiversité*, Campus universitaire d'Abomey-Calavi, Bénin. p 193-2010.
- Houet T, Hubert-Moy L (2006). Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton in considering landscape trajectories. *EARSeL eProceedings*, 5 (1): 63-76.
- 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. *Revue de Géographie de l'Université de Ouagadougou*, 7 (7): 69-88.
- Kliejunas JT, Geils BW, Glaeser JM, Goheen EM, Hennon P, Kim M-S, Kope H, Stone J, Sturrock R, Frankel SJ (2009). Review of literature on climate change and forest diseases of western North America, Albany.
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Atakpama W, Wala K, Akpagana K (2020a). Spatio-temporal dynamics and habitat fragmentation within a central region of Togo. *Agricultural Science Research Journal*, 10 (11): 291 – 305.
- 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 (2): 70-79.
- Kombate B, Dourma M, Folega F, Woegan AY, Wala K, Akpagana K (2020b). Diversité floristique et caractérisation structurale des formations boisées du domaine Soudano-Guinéen au Centre du Togo. *Afrique SCIENCE*, 17 (6): 29-43.
- Kouassi AM, Kouamé KF, Koffi YB, Dje KB, Paturel JE, Oulare S (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Mamane B, Amadou G, Barage M, Comby J, Ambouta JMK (2018). Dynamique spatio-temporelle d'occupation du sol dans la Réserve Totale de Faune de Tamou dans un contexte de la variabilité climatique (Ouest du Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12 (4): 1667-1687.
- Mazo I, Kouta S, Sogbossi E, Toko Imorou I (2020). Effet des Facteurs Anthropiques sur la Biomasse Ligneuse de la Forêt Classée de Goungoun et ses Terroirs Riverains dans la Région Soudienne Du Benin. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 22 (2): 304-318.

- Mba BMM, Pennober G, Revillion C, Rouet P, David G (2022). 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. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 223: 217-231.
- Mbaiyetom H, Tientcheu MLA, Ngankam MT, Taffo JBW, Tanougong AD (2020). Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol et du couvert végétal des parcs arborés du Département de la Nya, Sud du Tchad. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 31 (2): 370-379.
- Mbavumoya T, Ebuy AJ, Masimo KJ (2022). Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol dans la concession de l'INERA-Yangambi en République Démocratique du Congo. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 10 (1): 195-204.
- Mensah K, Folega F, Woegan YA, Atakpama W, Pereki H, Wala K, Akpagana K (2022). État et dynamique spatio-temporelle de la forêt communautaire d'Edouwossi-Copé, Région des Plateaux-Togo. *Revue Ecosystèmes et Paysages (Togo)*, 1 (1): 12-26.
- Paudyal K, Baral H, Bhandari SP, Bhandari A, Keenan RJ (2019). Spatial assessment of the impact of land use and land cover change on supply of ecosystem services in Phewa watershed, Nepal. *Ecosystem Services*, 36: 100895.
- Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson KA (2011). The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 48 (2): 219-242.
- Polo-Akpisso A, Wala K, Soulemane 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 (1): 19.
- Pontius RG (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 66: 1011-1016.
- Reid WV, Mooney HA, Cropper A, Capistrano D, Carpenter SR, Chopra K, Dasgupta P, Dietz T, Duraiappah AK, Hassan R (2005). *Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press.
- Salas Y Mélia D (2022). Les principaux enseignements du 6e rapport du groupe I du GIECeds. *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*. p 11-16.
- Skupinski G, BinhTran D, Weber C (2009). Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain –Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo: European Journal of Geography*, 439.
- Tol RS (2009). The economic effects of climate change. *Journal of economic perspectives*, 23 (2): 29-51.
- Tolessa T, Senbeta F, Kidane M (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem services*, 23: 47-54.
- Zanne AE, Lopez-Gonzalez G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J (2009). Global wood density database. Dryad Digital repository. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10255/dryad>.