



**AgEcon** SEARCH  
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

*The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library*

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*



## STRUCTURE AND MODELING OF THE FOREST CARBONE OF THE CLASSIFIED FOREST OF MISSAHOHOÉ IN TOGO

<sup>1</sup>Bimare KOMBATE, <sup>2</sup>Wouyo ATAKPAMA, <sup>3</sup>Hodabalo EGBELOU, <sup>3</sup>Moitré YANDJA, <sup>4</sup>Anissou BAWA, <sup>2</sup>Marra DOURMA, <sup>2</sup>Komlan BATAWILA, <sup>2</sup>Koffi AKPAGANA

<sup>1</sup>Géomatique et Modélisation des Ecosystèmes (GME), Laboratoire de botanique et écologie végétale, Faculté des Sciences, Université de Lomé, [parfaitbimare@yaohoo.fr](mailto:parfaitbimare@yaohoo.fr), Lomé, Togo.

<sup>2</sup>Unité de Recherche en Systématique et Conservation de la Biodiversité, Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Université de Lomé, [wouyoatakpama@outlook.com](mailto:wouyoatakpama@outlook.com), [dourmamarra@yahoo.fr](mailto:dourmamarra@yahoo.fr), [komlanbatawila@gmail.com](mailto:komlanbatawila@gmail.com), [koffi2100@gmail.com](mailto:koffi2100@gmail.com), Lomé, Togo

<sup>3</sup>Département de Foresterie, Institut National de Formation Agricole, [victoregbelou1@gmail.com](mailto:victoregbelou1@gmail.com), [yandjamoitre@gmail.com](mailto:yandjamoitre@gmail.com), Tové, Togo.

<sup>4</sup>Laboratoire des Sciences Agronomiques et Biologiques Appliqués, Université de Kara, [anissoub@gmail.com](mailto:anissoub@gmail.com), Kara, Togo.

### ABSTRACT

#### Context and background:

Forest ecosystems have the capacity to regulate the climate as sink of carbon. This function allows them to maintain the ecological balance of the planet. Given the intensity of the ever-increasing human pressures on these ecosystems, it is urgent to quantify and spatialize their carbon storage potential in time and space in order to implement more appropriate environmental management practices and policies.

#### Goal and objectives:

The present study, which focused on the structure of woodland formations and carbon modeling of the Classified Forest of Missahohoé (CFM), intends to contribute to the sustainable management of protected areas in Togo. More specifically, it aims to: (i) determine the vegetation structure of the FCM and (ii) model the carbon in the MCF.

#### Methodology:

The methodology consisted on forest mensuration within 27 plots sized 50 m x 20 m. Dendrometric data were used to characterized the structure of the woodland formations, to estimate biomass and carbon stocks. The InVEST and MOLUSCE models combined with Landsat images was used to predict carbon sequestration for the year 2035 based on observed changes in this forest ecosystem.

#### Results:

The results of the diameter class structure reveal that these woodlands are dominated by young tree reflecting strong anthropogenic pressure namely shifting fields and illegally extraction of firewood. Between 2020 and 2035, for the whole target classified forest, a gain of 627.75 Mg of carbon is predicted. On the other hand, at the level of land use units, riparian/dense forests and tree/shrub savannahs will experience a carbon loss of -9.21% and -1.61% respectively. The economic value of the total carbon that would be sequestered in 2035 by the FCM is estimated at \$3,197,148.85. The total loss of ecosystem service value in the two land use units from 2020 to 2035 would be \$58,851.98. This study recommends restoration/reforestation as the most practical strategy for mitigating carbon loss and calls for increased access to renewable energy sources for local communities.

#### Keywords

*Structure, Carbon sequestration, MOLUSCE, InVEST, Missahohoé, Togo*

## STRUCTURE ET MODÉLISATION DU CARBONE DE LA FORÊT CLASSÉE DE MISSAHOHOÉ AU TOGO

<sup>1</sup>Bimare KOMBATE, <sup>2</sup>Wouyo ATAKPAMA, <sup>3</sup>Hodabalo EGBELOU, <sup>3</sup>Moitré YANDJA, <sup>5</sup>Anissou BAWA, <sup>2</sup>Marra DOURMA, <sup>2</sup>Komlan BATAWILA, <sup>2</sup>Koffi AKPAGANA

<sup>1</sup>Géomatique et Modélisation des Ecosystèmes (GME), Laboratoire de botanique et écologie végétale, Faculté des Sciences, Université de Lomé, [parfaitbimare@yahoo.fr](mailto:parfaitbimare@yahoo.fr), Lomé, Togo.

<sup>2</sup>Unité de Recherche en Systématique et Conservation de la Biodiversité, Laboratoire de Botanique et Ecologie Végétale, Université de Lomé, [wouyoatakpama@outlook.com](mailto:wouyoatakpama@outlook.com), [dourmamarra@yahoo.fr](mailto:dourmamarra@yahoo.fr), [komlanbatawila@gmail.com](mailto:komlanbatawila@gmail.com), [koffi2100@gmail.com](mailto:koffi2100@gmail.com), Lomé, Togo

<sup>3</sup>Département de Foresterie, Institut National de Formation Agricole, [victoregbelou1@gmail.com](mailto:victoregbelou1@gmail.com), [yandjamoitre@gmail.com](mailto:yandjamoitre@gmail.com), Tové, Togo.

<sup>4</sup>Laboratoire des Sciences Agronomiques et Biologiques Appliqués, Université de Kara, [anissoub@gmail.com](mailto:anissoub@gmail.com), Kara, Togo.

### RÉSUMÉ

Les écosystèmes forestiers ont la capacité de réguler le climat de par leur pouvoir de séquestrer du carbone atmosphérique permettant le maintien des équilibres écologiques de la planète. Face aux pressions humaines sans cesse croissantes sur ces écosystèmes, il urge de quantifier et de spatialiser leur potentiel de stockage de carbone dans le temps et dans l'espace afin de pouvoir mettre en œuvre des pratiques et des politiques de gestion environnementale plus adaptées.

La présente étude qui s'est intéressée à la structure des formations boisées et à la modélisation du carbone forestier de la Forêt Classée de Missahohoé (FCM) compte contribuer à la gestion durable des aires protégées au Togo. Plus spécifiquement, elle vise à : (i) déterminer la structure de la végétation de la FCM et (ii) modéliser la dynamique d'occupation du sol et du carbone dans la FCM à l'horizon 2035.

La méthodologie utilisée a consisté à des mensurations forestières au sein de 27 placettes de 50 m x 20 m. Les données forestières ont permis de caractériser la structure des formations boisées et d'estimer la biomasse et les stocks de carbone. Les modèles MOLUSCE et InVEST combinés des images Landsat ont permis de prédire la séquestration du carbone pour l'année 2035.

Les résultats de la structure en classes de diamètre révèlent une dominance des tiges d'arbres jeunes traduisant une forte pression anthropique notamment l'installation des champs et l'extraction illégale du bois-énergie. Entre 2020 et 2035, pour l'ensemble de ladite forêt classée, un gain de 627,75 Mg de carbone est prédit. Par contre, au niveau des unités d'occupation du sol, les galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/arbustives connaîtront une perte de carbone respectivement de -9,21 % et de -1,61 %. La valeur économique du carbone total séquestré en 2035 serait de 3 197 148,85 \$. La perte totale de la valeur des services écosystémiques dans les deux unités d'occupation du sol de 2020 à 2035 serait de 58 851,98 \$. La présente étude recommande la restauration/reboisement comme la stratégie la plus pratique d'atténuation de la perte de carbone et appelle à un meilleur accès des communautés locales à des sources d'énergies renouvelables.

### Mots clés

*Structure, séquestration de carbone, MOLUSCE, InVEST, Missahohoé, Togo*

## **1. INTRODUCTION**

Les aires protégées (AP) sont considérées comme des lieux de refuges et de conservation de la végétation (Gnoumou et al., 2020). Elles sont pourvoyeuses de plusieurs biens et services écosystémiques pour les populations environnantes dont leur quantité et leur qualité varient selon leur état de conservation (Polo-Akpisso et al., 2020 ; Kamou et al., 2017 ; Missie, 2020). Sur le plan économique, elles peuvent contribuer au budget de l'état (Missie, 2020 ; Ouédraogo et al., 2013). Leur bon état de fonctionnement augmenterait la pluviométrie et favoriserait le développement d'un microclimat qui atténuerait les îlots de chaleur. Malheureusement, les intrusions humaines menacent l'intégrité de ces services écosystémiques et hypothèquent l'avenir de ces AP (Woegan et al., 2013 ; Moumouni et al., 2019).

Au Togo, les troubles sociopolitiques des années 90 ont conduit à l'envahissement des aires protégées et à la disparition de certaines d'entre elles (Tchamie, 1994 ; Ouro Djeri et al., 2001). Ces perturbations écologiques d'ordre anthropiques qui deviennent de plus en plus croissantes dans les domaines classés de l'état entraînent une forte dégradation de la végétation et une réduction de leur potentiel de stockage de carbone (Kombate et al., 2019 ; Kombate et al., 2020b ; Moumouni et al., 2019).

Les principaux facteurs responsables de la perte de la biodiversité et de l'habitat des APs sont entre autres la pression foncière due à la pression démographique (Koumoi & Lare, 2014 ; Bawa, 2017 ; Bawa et al., 2022), l'exploitation du bois énergie (Kaina et al., 2018) et surtout à l'agriculture intensive et extensive (Kombate et al., 2020a). Toutes ces pressions d'origine humaine ont contribué considérablement à la dégradation du couvert végétal, à la mise à nue des sols et dans une moindre mesure à la crise climatique à laquelle les populations font face.

Plusieurs études cartographiques sur les aires protégées ont eu pour cadre l'évaluation de la dynamique d'occupation de sol et la séquestration du carbone (Atakpama et al., 2021 ; Akakpo et al., 2017 ; Koumoi, 2019 ; Polo-Akpisso et al., 2020). Cependant des études prévisionnelles sur la base des connaissances des paramètres existantes sont quasi-inexistantes. Or la connaissance de ces données permet de mieux planifier les actions de protection et de restauration des écosystèmes des APs.

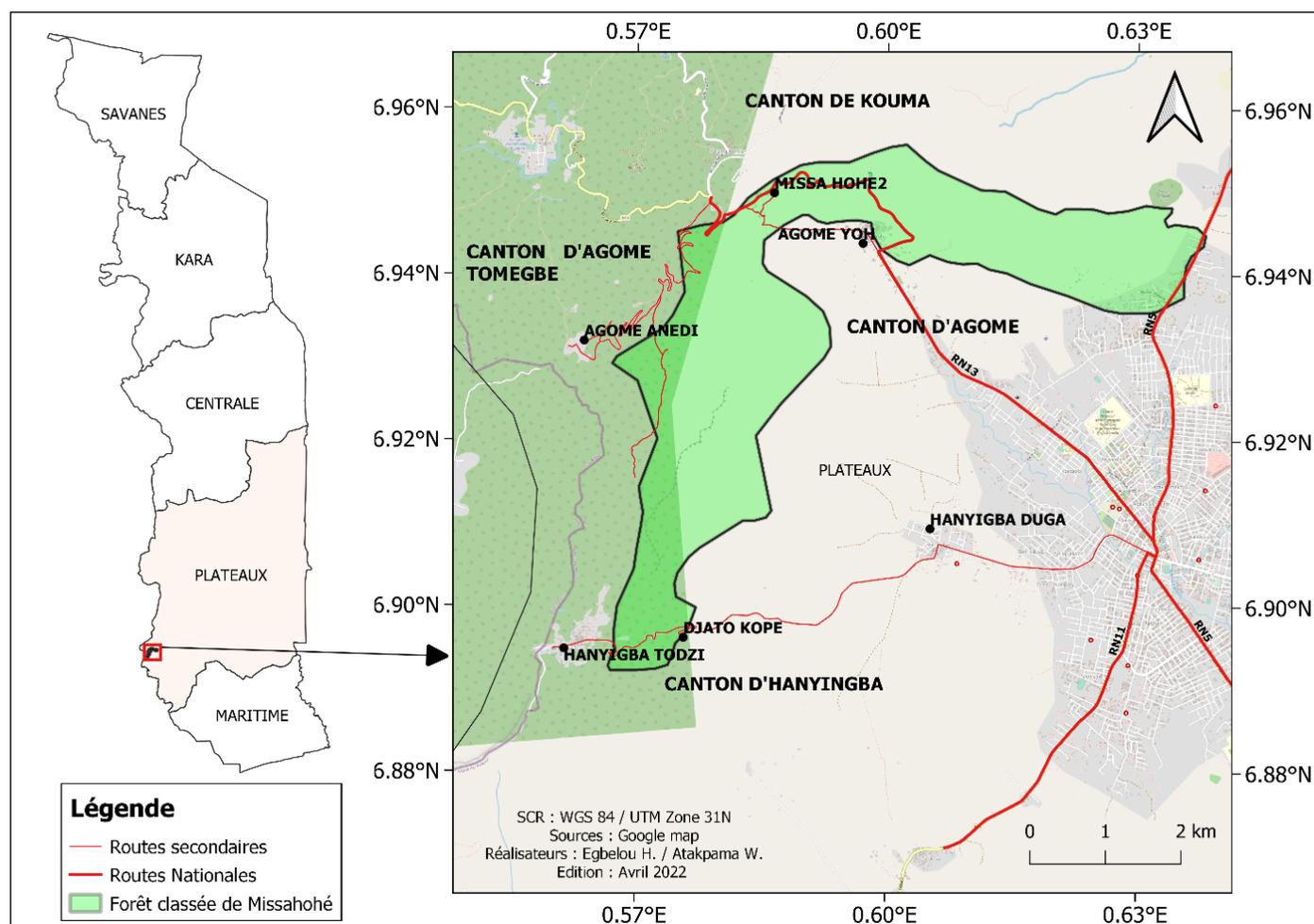
La Forêt Classée de Missahohoé (FCM), une des APs de la zone de forêts denses semi-décidues a fait l'objet d'un aménagement forestier, initié par le gouvernement togolais en collaboration avec l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) entre 199 et 2003 en vue d'une production optimale du bois d'œuvre (Sebabe, 2004). Malgré ce plan d'aménagement et la mise en place d'un partenariat entre l'état et les populations locales, cette dernière n'est toujours pas épargnée par le phénomène de la déforestation et de déboisement. Dans un contexte de changement climatique et pour éviter à l'avenir que cette forêt classée ne devienne une source nette de libération de carbone, il urge 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 boisées, la dynamique des puits et des sources de carbone afin de pouvoir mettre en œuvre des pratiques et des politiques de gestion environnementale plus adaptées (Le Clec'H et al., 2013 ; Babbar et al., 2021).

Cette étude qui prend en compte les images satellites, les équations allométriques et les données d’inventaires forestiers permettra de prédire les variabilités spatio-temporelles de la biomasse forestière. Elle compte contribuer à la gestion durable des aires protégées au Togo. Plus spécifiquement, elle vise à : (i) déterminer la structure de la végétation de la FCM et (ii) modéliser la dynamique d’occupation du sol et du carbone dans la FCM à l’horizon 2035.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Milieu d’étude

La FCM se trouve dans la préfecture de Kloto à 5 km au nord-ouest de Kpalimé sur la route Kpalimé-Tomégbé, environ 125 km de la capitale du Togo, Lomé. Elle couvre une superficie de 1450 ha d’après l’arrêté de classement n°185 – 53/EF du 18 février 1953 du Commissaire de la République du Togo (Figure 1). Considérée comme un domaine de l’État, elle est gérée par l’administration forestière. Ses objectifs spécifiques étaient axés sur deux volets : (i) la restauration et l’aménagement de la forêt classée sur une base consensuelle entre tous les partenaires concernés et (ii) la promotion des reboisements forestiers et agroforestiers de bois d’œuvre sur les terroirs riverains de la FCM. Les droits d’usage reconnus aux populations riveraines de la forêt sont le ramassage de bois morts, la recherche limitée de plantes médicinales pour usages individuels. La récolte de régimes de palmiers à huile et la chasse avec les fusils de traite pendant la période d’ouverture de chasse y sont autorisées.



**Figure 1 : Localisation de la forêt classée de Missahohé.**

Le climat est subéquatorial guinéen de montagne à une saison de pluie, de février à novembre, interrompue par une diminution des pluies en août. La zone de la FCM comprend une succession de montagnes dont l'altitude varie de 400 à 800 m, des plateaux situés au sommet et aux pieds de montagne, des escarpements très marquants avec un relief très accidenté. La végétation comprend une mosaïque de forêts mésophiles et de savanes guinéennes ainsi que des agroforêts, des champs et des jachères.

## 2.2 Collecte des données

### Inventaire forestier

Les inventaires forestiers ont été réalisés dans des placettes à équidistance de 200 m installés le long des transects d'orientation nord-sud et est-ouest (Figure 2). Le choix des transects a tenu compte de l'accessibilité et de la diversité des formations végétales. Pour ce faire les courbes de niveau et les pistes de la zone d'étude ont été projetées sur la carte d'occupation de sol de l'an 2020 préclassifiée de la FCM. Au total, 27 points d'échantillonnage ont été considérés. Au niveau de chacun de ces points, une placette unitaire de forme rectangulaire de 50 m x 20 m a été installée pour la collecte des données dendrométriques (Polo-Akpisso et al., 2015 ; Atakpama et al., 2021). Les paramètres dendrométriques ont été relevés pour des tiges d'arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, diamètre à 1,30 m du sol)  $\geq 10$  cm (Dourma et al., 2017). La mesure de la circonférence a été réalisée à l'aide d'un compas forestier. La hauteur du fût et la hauteur totale ont été déterminées par un clinomètre Suunto. Toutes les tiges dont le DHP  $< 10$  cm ont été considérés comme régénération potentielle (Dourma et al., 2017) et ne sont pas pris en compte dans ce travail.

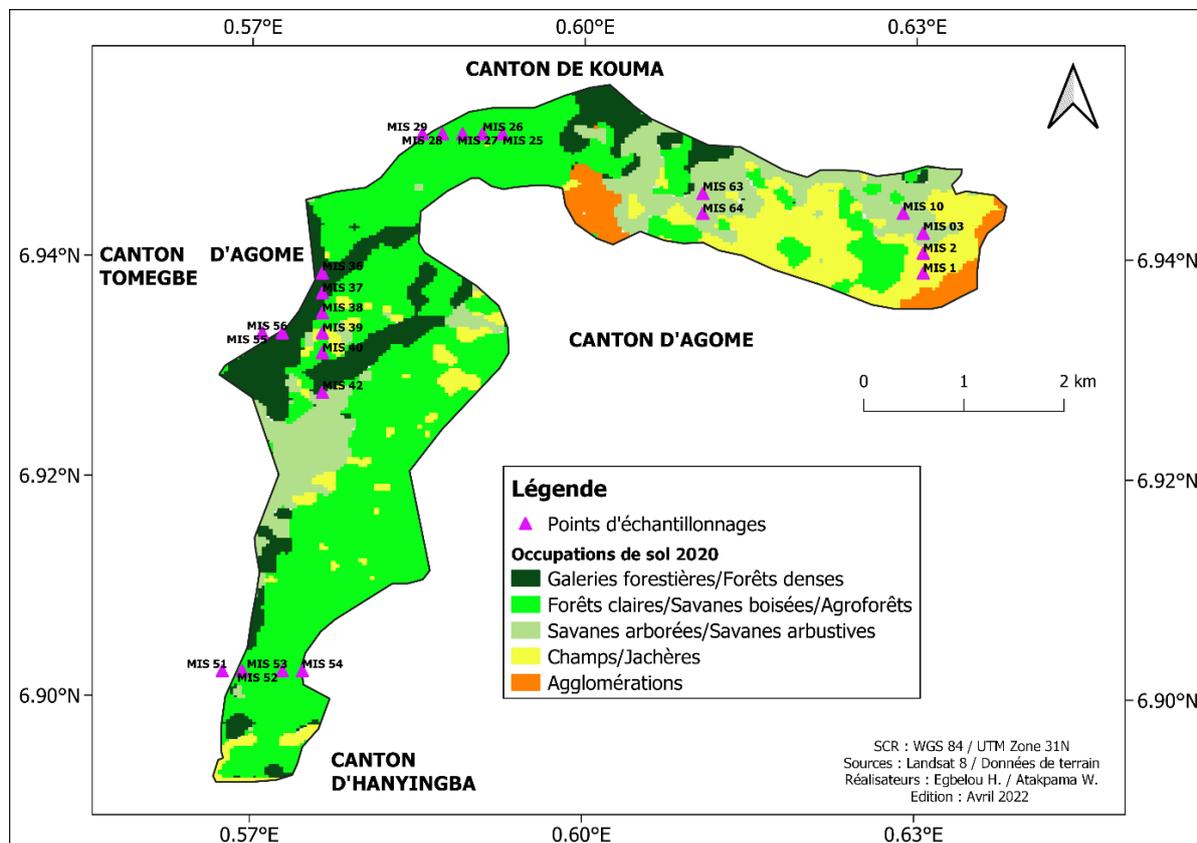


Figure 2 : Répartition des points d'échantillonnage

## Acquisition des images

L'étude de la dynamique du carbone de la FCM 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 images, le choix s'est porté sur les années 2000, 2013 (Akakpo et al., 2017) et 2020 (Tableau 1). Les images ont été téléchargées sur le site web de l'Institut d'études géologiques des États-Unis USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

**Tableau 1 : Caractéristique des images Landsat**

Année	2000	2013	2020
Type	Landsat ETM+	Landsat 8/OLI	Landsat 8/OLI
Date d'acquisition	04/02/2000	16/12/2013	03/02/2020
Path/Row	193/55	193/55	193/55

## 2.3 Traitement des données

### Structure démographique

Les données collectées ont été saisies dans le tableur Microsoft Excel. Ensuite, une matrice « relevés x espèces » a été établie sur la base de la présence/absence des espèces avec en ligne les espèces et en colonnes les relevés. La matrice élaborée a été soumise à une Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) suivant la méthode Ward's à l'aide du logiciel Community Analysis Package (CAP 2.15) (Henderson & Seaby, 2002). Au niveau de chaque groupement discriminé, la hauteur moyenne, le diamètre moyen, la densité moyenne, la surface terrière et la séquestration du carbone ont été évalués. Le biovolume, la distribution des tiges par classes de hauteur et de diamètre sont ajustés suivant les trois (3) paramètres de distribution de Weibull (Husch et al., 2003) du logiciel Minitab qui se fonde sur la fonction de densité de probabilité de Rondeux (2021). La biomasse aérienne (BA) est calculée suivant les équations allométriques classiques applicables 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). Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Minitab 16®.

- Densité totale (D) des ligneux :

$$(1) \quad D = \frac{n}{S} \times 0,0001 \quad , n = \text{nombre de pieds par relevé et } S = \text{aire de relevé en hectare.}$$

- Diamètre moyen ( $D_m$ ) des arbres (cm) :

$$(2) \quad D_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad , n = \text{nombre de pieds ; } d_i = \text{diamètre à 1,30 m de l'arbre } i$$

- Surfaces terrières (G) des ligneux :

$$(3) \quad G = \frac{\pi}{4S} \sum_{i=1}^n 0,0001 d_i^2 \quad , d_i = \text{diamètre en m à 1,30 m du sol de l'arbre } i, S = \text{aire de relevé en hectare}$$

$$(4) \quad BA = \text{EXP} [-2 187 + 0,916 \times \text{LN} (\rho \text{HD}^2)]$$

Avec  $D$  = diamètre à hauteur de poitrine (en m) ;  $\rho$  = densité spécifique du bois (en  $t/m^3$  séchée à  $103^\circ C$ ),  $H$  = hauteur totale de l'arbre (en m) et  $BA$  (en kg)

Pour les espèces dont la densité spécifique n'est pas connue, la densité moyenne  $P = 0,58 t/m^3$  est attribuée (Chave et al., 2005).

- La biomasse souterraine (BS) de chaque arbre est évaluée à partir de la biomasse aérienne suivant le modèle développé par Cairns et al. (1997) :  
(6)  $BS = EXP [-10\ 587 + 0,916 LN(BA)]$ , BS (en kg) = biomasse souterraine et BA = biomasse aérienne
- La somme de la biomasse aérienne (BA) et la biomasse souterraine (BS) donne la biomasse totale (BT en kg) :  $BT = BA + BS$ .

La biomasse est obtenue par types de formation végétale en additionnant les biomasses de tous les individus d'arbres recensés par relevé suivi d'une extrapolation à l'hectare.

- Le Stock de Carbone (SC) est déduit par la formule suivante :  
(7)  $SC = BT \times CF$ , CF = le ratio de carbone par défaut toutes espèces confondues égal à 0,47 (Folega et al., 2020).
- L'équivalent de  $CO_2$  (EqC) est déterminé par la relation  $EqC = 3,67 \times SC$  (Folega et al., 2020)

### **Évaluation de la dynamique des occupations de sol et modélisation du carbone à l'horizon 2035**

Les cartes des unités d'occupation de sol et la modélisation du carbone ont été réalisées avec les logiciels ENVI 4.7, QGIS 2.18.18 et Invest 3.9. Pour l'analyse des unités d'occupation de sol, le traitement s'est déroulé en quatre (4) phases à savoir la correction radiométrique/atmosphérique, l'extraction de la FCM, la classification et la vectorisation. La correction radiométrique/atmosphérique a consisté à la correction de l'image Landsat des trois dates par l'outil "Radiometric Correction" du logiciel ENVI. L'extraction de l'image multispectrale de la zone d'étude a consisté à découper les images prétraitées en superposant sur cette dernière le contour de la FCM. La classification s'est basée sur la connaissance du terrain, les données de vérification de terrain et les images de Google Earth. Il s'agit de l'identification visuelle d'un certain nombre d'éléments ou 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 chaque image classifiée.

Une fois la classification terminée, l'évaluation de la précision a été menée afin de valider les résultats. La matrice de confusion (en %) et deux indices de validation de classification que sont la précision globale (proportion de pixels bien classés, en %) 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 unités d'occupation du sol a été établie suivant la classification du Togo (Egbelou et al., 2021). Cinq (5) classes d'occupations du sol ont été définies : (1) les galeries forestières/forêts denses, (2) les forêts claires/savanes boisées/agroforêts (association d'arbres forestiers et de cultures pérennes telles que le caféier, l'avocatier ou d'autres arbres fruitiers), (3) les savanes arborées/arbustives, (4) champs/jachères et (5) les agglomérations.

Chaque image classifiée a été vectorisée, puis exportée dans le logiciel QGIS 2.18.18 pour le calcul des superficies des unités d'occupations de sol. Pour s'assurer de la précision de la classification, les coordonnées des points enregistrées sur le terrain avec le récepteur GPS (Global Positioning System) ont été projetées sur l'image classifiée.

Pour l'évaluation de l'évolution des unités d'occupations du sol, une matrice de transition est établie. L'évolution moyenne annuelle (T annuel, %) est calculée selon la formule :  $T \text{ annuel} = [(S_f - S_i) / (S_i \times \text{durée (i-f)})] \times 100$  (1) ;  $S_i$  = Superficie initiale de l'occupation du sol,  $S_f$  = 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 2035, deux étapes ont été entreprises dans le logiciel QGIS 2.18.18 grâce à l'extension MOLUSCE. Le système de projection des données d'entrée est le WGS 84/UTM Zone 31N. La première étape a consisté à introduire les cartes des unités d'occupation de sol du début (2000) et de la fin (2013) dans MOLUSCE. Les facteurs environnementaux tels que le DEM, carte de pente et la carte d'aspect (terrain) ont été utilisés 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 FCM de 2020 est établi. L'occupation de sol de référence de 2020 et le coefficient de kappa ont été utilisés pour évaluer l'efficacité du modèle. La deuxième étape a consisté à faire la projection à l'horizon 2035 après vérification du modèle à l'horizon 2020.

Pour évaluer la dynamique du carbone à l'horizon 2035, le modèle InVEST de stockage et de séquestration du carbone a été utilisé. Les données d'entrées sont les cartes d'occupation du sol (2000, 2020 et 2035) et le stock de carbone de 2020. Ces paramètres permettent d'estimer la quantité de carbone actuellement stockée dans un paysage ou la quantité de carbone séquestrée au fil du temps. 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 utilisées 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 Agglomérations sont considérées comme égale à 0.

Les données économiques sont constituées du prix par tonne métrique du carbone (prix donné en monnaie par tonne métrique de carbone élémentaire), la réduction du marché dans le prix du

carbone (une valeur entière en pourcentage qui reflète la préférence de la société pour les avantages immédiats par rapport aux avantages futurs) et le taux annuel de variation du prix du carbone (une valeur entière en % qui ajuste la valeur du carbone séquestré en fonction de l'impact des émissions sur les dommages attendus liés au changement climatique, qui évolue dans le temps.) (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). Par exemple, l'estimation du CSC utilisé à partir des travaux de Tol (2009) est de 130 dollars américains de 2010. 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. Si le taux est fixé à 0 %, les valeurs monétaires ne sont pas actualisées (Issiaka et al., 2020).

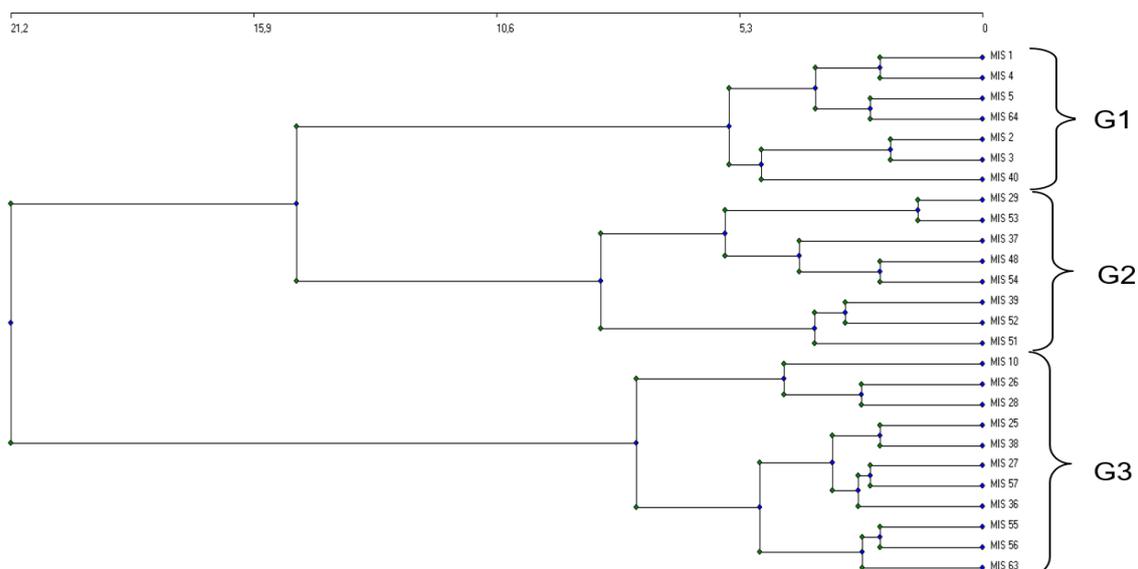
Après exécution du modèle, les résultats sont constitués d'éléments suivants :

- **report\_[Suffix].html** : ce fichier présente un résumé de toutes les données calculées par le modèle. Il comprend également des descriptions de tous les autres fichiers de sortie produits par le modèle, c'est donc un bon point de départ pour explorer et comprendre les résultats du modèle. Comme il s'agit d'un fichier HTML, il peut être ouvert avec n'importe quel navigateur Web.
- **tot\_c\_cur\_[Suffix].tif/tot\_c\_fut\_[Suffix].tif/tot\_c\_redd\_[Suffix].tif** : Rasters montrant la quantité de carbone stockée en Mg dans chaque pixel pour les scénarios actuel, futur et REDD. Il s'agit de la somme de tous les pools de carbone fournis par le tableau biophysique.
- **delta\_cur\_fut\_[Suffix].tif/delta\_cur\_redd\_[Suffix].tif** : Rasters montrant la différence de carbone stocké entre le paysage futur/REDD et le paysage actuel. Les valeurs sont en Mg par pixel. Dans cette carte, certaines valeurs peuvent être négatives et d'autres positives. Les valeurs positives indiquent le carbone séquestré, les valeurs négatives indiquent le carbone qui a été perdu.
- **npv\_fut\_[Suffix].tif/npv\_redd\_[Suffix].tif** :\*\* Rasters montrant la valeur économique du carbone séquestré entre les dates actuelles et futures/du paysage REDD. Les unités sont exprimées en devise par pixel.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1. Typologie des formations végétales boisées de la FCM

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) suivant la méthode de Ward's a permis de discriminer trois (3) groupements de relevés au seuil de 15,7 % suivant la distance Euclidien (Figure 3). Il s'agit des : mosaïques de savanes, jachères et champs (G1), agroforêts (G2) et forêts denses et galeries forestières (G3).



**Figure 3 : Classification Hiérarchique Ascendante des relevés de la FCM.**

**Légende :** **G1** = Mosaïques osaiques de savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs, **G2** = Forêts claires/savanes boisées/agroforêts, **G3** = Galeries forestières/forêts denses.

### 3.2 Structure démographique des formations ligneuses de la FCM

Les densités d'arbres les plus élevées ont été observées au niveau des galeries forestières/forêts denses (93 tiges/ha) et des forêts claires/savanes boisées/agroforêts (73 tiges/ha). Une densité de 35 tiges/ha a été observée au niveau du mosaïques savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs. Les groupes G3 et G1 ont les plus gros diamètres moyens estimés respectivement à 73,50 cm et 56,48 cm. Quant au groupe G2, le diamètre moyen est estimé à 51,79 cm. La hauteur moyenne maximale a été obtenue dans le groupe G2 (13,55 m). Les groupes G3 et G1 ont une hauteur moyenne respective de 12,92 m et 11,14 m. La surface terrière la plus élevée a été obtenue dans les galeries forestières/forêts denses (57,26 m<sup>2</sup>/ha). Elle est de 33,13 m<sup>2</sup>/ha et de 12,57 m<sup>2</sup>/ha respectivement dans les forêts claires/savanes boisées/agroforêts et galeries forestières/forêts denses (Tableau 2). Les analyses statistiques (ANOVA) réalisées avec le logiciel Minitab 16 montrent qu'il y a une différence significative (P<0,05) pour les classes de diamètre entre les 3 groupes. Par contre, il n'y a pas de différence significative pour les autres paramètres comme Hm, D, G (Tableau 2).

**Tableau 2 : Caractéristiques structurales des formations boisées étudiées**

Formations	D (tiges/ha)	Dm (cm)	Hm, (m)	G (m <sup>2</sup> /ha)
SA/Sa/J/C (G1)	35±2	56,48±38,11	11,14±4,6	12,57±3,96
FC/SB/A (G2)	73±3	51,79±56,48	13,55±4,19	33,13±4,54
GF/FD (G3)	93±3	73,50±49,85	12,92±5,68	57,26±3,05
ANOVA	0,185	0,028	0,986	0,442

**Légende :** SA/Sa/J/C = Mosaïques de savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs ; FC/SB/A = Forêts claires/savanes boisées/agroforêts ; GF/FD = Galeries forestières/forêts denses.

La répartition des ligneux par classes de diamètre montre une structure en « cloches » dans les mosaïques savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs (G1) et les galeries

forestières/forêts denses (G3). Le coefficient de forme de distribution de Weibull des classes de diamètre est respectivement de 1,25 et 1,16 ( $1 < C < 3,6$ ) avec une grande représentativité des individus de diamètres [60 - 70[ pour le groupe G1 et de diamètres supérieur à 90 cm (>90) pour le groupe G3. Cette structure est en « L » dans les forêts claires/savanes boisées/agroforêts (G2) (Figure 4). Le coefficient de forme de distribution de Weibull des classes de diamètres dans le groupe G2 est de 0,68 ( $c < 1$ ) traduisant ainsi une forte représentativité des jeunes individus de classe de diamètre [10 - 20[.

La répartition des tiges par classe de hauteurs ressort une allure en cloche avec le coefficient de forme « c » de la distribution de Weibull compris entre 1 et 3,6 dans les trois groupes de formations végétales de la FCM. La valeur de ce coefficient indique une distribution asymétrique positive (droite) avec une prédominance des individus de faibles hauteurs. La classe de hauteur [14 - 16[ est la plus représentée dans les groupes G1 et G3. Quant au groupe G2, la classe de hauteur la plus représentée est [10 - 12[ (Figure 5).

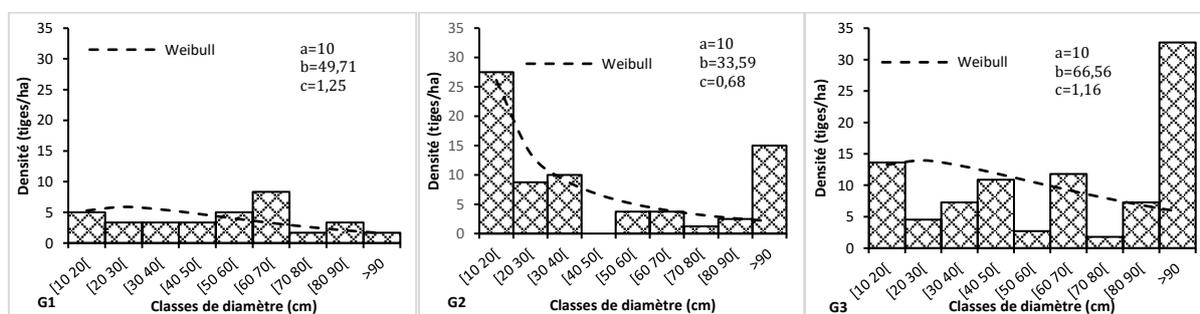


Figure 4 : Structures en classes de diamètre des formations végétales de la FCM

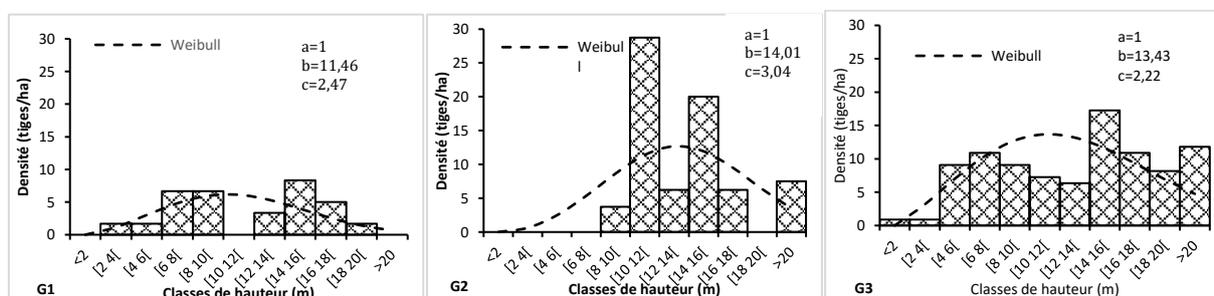


Figure 5 : Structures en classes de hauteur des formations végétales de la FCM

### 3.3 Précision de la classification

L'évaluation de la précision des classifications à partir de la matrice de confusion, de la précision globale et du coefficient de Kappa est présenté dans le tableau 3. Ces coefficients indiquent que les classifications ont été bien réalisées.

Tableau 3 : Précision de la classification des images Landsat 2000, 2013 et 2020

	2000				
	A	C/J	FC/SB/Af	GF/FD	SA/Sa
A	89,53	8,7	0	0	0
C/J	9,78	84,42	0	0	15,93
FC/SB/Af	0	0	94,58	3,93	0,09
GF/FD	0	0	5,42	93,82	1,13

SA/Sa	0,68	6,88	0	2,25	82,86
<b>Précision globale : 87,07 %, Coefficient de kappa : 0,83</b>					
<b>2013</b>					
	<b>A</b>	<b>C/J</b>	<b>FC/SB/Af</b>	<b>GF/FD</b>	<b>SA/Sa</b>
A	91,46	3,88	0	0	0,82
C/J	8,44	90,41	0,57	0	6,12
FC/SB/Af	0	0	94	3,7	0,12
GF/FD	0	0,23	4,29	93,16	5,48
SA/Sa	0,1	5,48	1,14	3,14	87,46
<b>Précision globale : 90,86 %, Coefficient de kappa : 0,88</b>					
<b>2020</b>					
	<b>A</b>	<b>C/J</b>	<b>FC/SB/Af</b>	<b>GF/FD</b>	<b>SA/Sa</b>
A	91,05	8,12	0	0,13	1,15
C/J	8,67	87,39	2,34	0,13	3,08
FC/SB/Af	0	1,28	84,29	12,95	0,19
GF/FD	0	0	13,2	86,4	1,15
SA/Sa	0,28	3,21	0,17	0,39	94,42
<b>Précision globale : 98,59 %, Coefficient de kappa : 0,95</b>					

**Légende :** SA/Sa/J/C = Mosaiques de savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs ; FC/SB/A = Forêts claires/savanes boisées/agroforêts ; GF/FD = Galeries forestières/forêts denses.

### 3.4 Occupation du sol de la FCM

Cinq (5) classes d'occupation du sol ont été discriminées. Il s'agit de : les savanes arborées/arbustives, les galeries forestières/forêts denses, les forêts claires/savanes boisées/agroforêts, les champs/jachères et les agglomérations (Figure 6). Le tableau 4 représente les superficies des unités d'occupation du sol.

**Tableau 4 : Évolution annuelle des superficies**

Unités d'occupation du sol	Superficie					
	2000		2013		2020	
	ha	Proportion (%)	ha	Proportion (%)	ha	Proportion (%)
A	2,79	0,19	18,64	1,26	50,96	3,44
C/J	255,33	17,22	151,48	10,21	206,84	13,98
FC/SB/Af	432,86	29,20	443,13	29,88	764,40	51,66
GF/FD	333,62	22,50	358,25	24,15	215,57	14,57
SA/Sa	457,93	30,89	511,65	34,50	241,96	16,35

**Légende :** SA/Sa : savanes arborées/arbustives, GF/FD : galeries forestières/forêts denses, FC/SB/Af : forêts claires/savanes boisées/agroforêts, C/J : champs/jachères et A : agglomérations, ha : hectare.

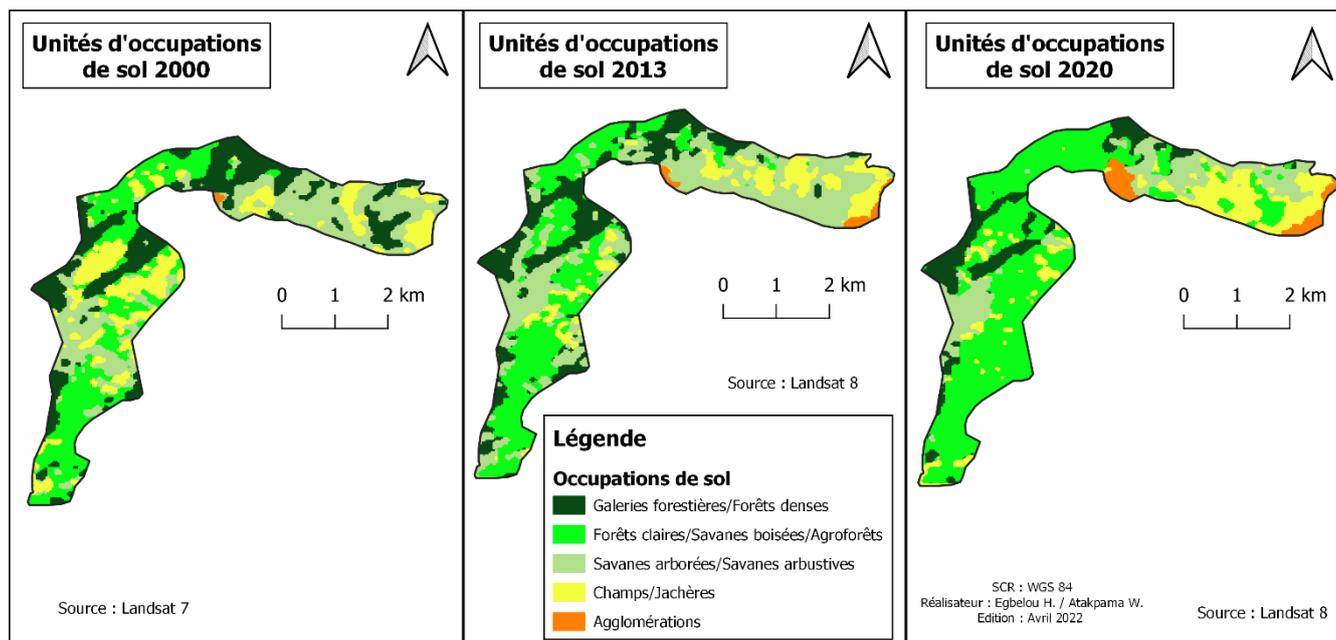


Figure 6 : Occupations du sol de la FCM en 2000, 2013 et 2020

### 3.5 Modélisation du carbone dans la FCM

#### Spatialisation du carbone

Le stock et la séquestration du carbone dans la forêt classée de Missahohoé ont été estimés pour l'année 2020 et ensuite modéliser à l'horizon 2035 (Figure 7). L'analyse de la figure 7 montre une variation du stock de carbone dans la FCM à l'horizon 2035.

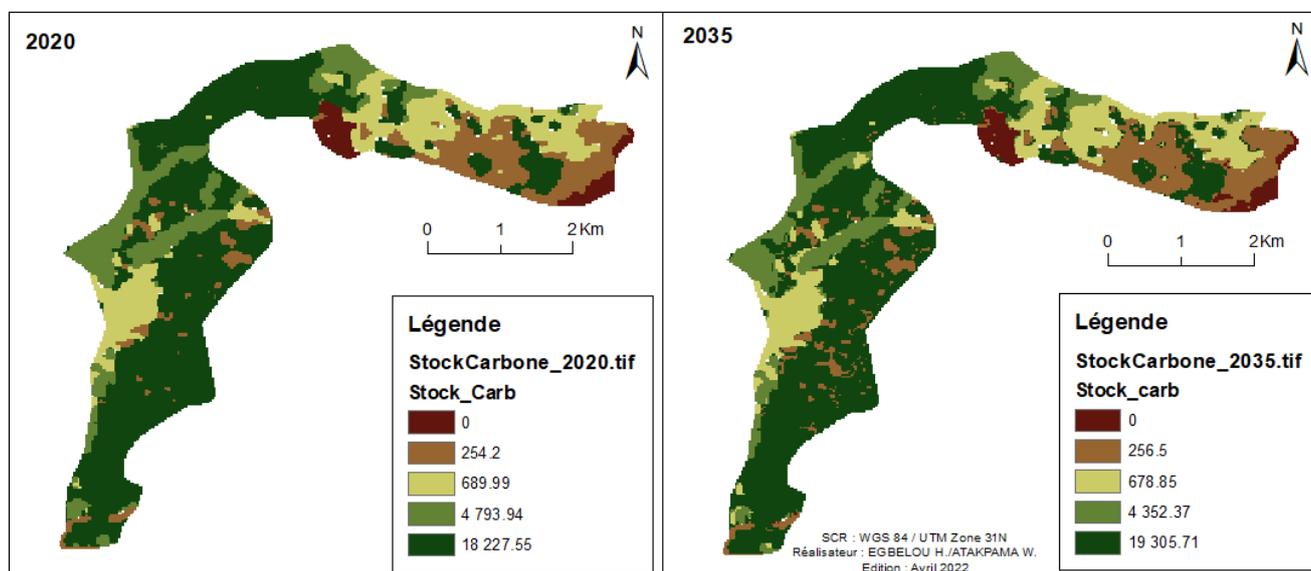


Figure 7 : Stock de carbone en 2020 et en 2035

Le stock de carbone varie entre 0 et 18227,55 Mg en 2020 contre 0 et 19305,71 Mg en 2035. A l'horizon 2035, le stock carbone connaîtra une augmentation (627,74 Mg). Les occupations de sol qui stockent plus de carbone sont les forêts claires/savannes boisées/agroforêts et galeries forestières/forêts denses (Tableau 5).

**Tableau 5: Variation du stock de carbone entre 2020 et 2035 par occupations de sol**

Quantité de carbone 2020			
Occupation	Valeur/Pixel	Nombre de pixels	Stock de carbone (Mg)
A	0	654	0
C/J	0,08219	3093	254,2050
FC/SB	1,8718	9738	18227,5588
GF/FD	1,7115	2801	4793,9444
SA/Sa	0,2652	2602	689,9957
Quantité de carbone 2035			
Occupation	Valeur/Pixel	Nombre de pixels	Stock de carbone (Mg)
A	0	350	0
C/J	0,0822	3121	256,5063
FC/SB/Af	1,8718	10314	19305,7139
GF/FD	1,7115	2543	4352,3743
SA/Sa	0,2652	2560	678,8582

**Légende :** SA/Sa : Savanes arborées/arbustives, GF/FD : Galeries forestières/forêts denses, FC/SB/Af : Forêts claires/savanes boisées/agroforêts, C/J : Champs/jachères et A : Agglomérations, Mg : Mégagramme

Il ressort de l'analyse du tableau 5 qu'entre 2020 et 2035, toutes les unités d'occupations de sol connaîtront une variation de leur stock de carbone. Les forêts claires/savanes boisées/agroforêts et champs/jachères connaîtront une augmentation de leur carbone respectivement de 1078,15 Mg et 2,30 Mg. Les galeries forestières/forêts denses et savanes arborées/arbustives connaîtront une perte de leur carbone respectivement de -441,57 Mg et -11,13 Mg. Le stock de carbone reste stable au niveau des agglomérations (0 Mg).

#### Valeur économique du carbone séquestré entre 2020 et 2035

La valeur économique du carbone total en 2020 est estimée à 3 115 541,5 \$ et celle de 2035 serait de 3 197 148,85 \$. Le gain économique prédites à l'horizon 2035 dans les forêts claires/savanes boisées/agroforêts et champs/jachères s'élève à 81607,33 \$. De 2020 à 2035, la perte totale de la valeur des services écosystémiques dans les galeries forestières/forêts denses et les savanes arborées/arbustives serait de 58 851,98 \$.

#### 4. DISCUSSION

Les formations végétales identifiées dans la FCM 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 galeries forestières/forêts denses et forêts claires/savanes boisées/agroforêts. Elles sont principalement dues au fait que ces types de formation sont faiblement sujettes aux feux de végétation et à la coupe illicite du bois d'œuvre (Kombate et al., 2019). Les faibles proportions de surfaces terrières et de densités dans les savanes arborées/arbustives sont les conséquences de la forte dégradation du couvert végétal de ces formations due aux pressions anthropiques (Bouko et al., 2007). Les fortes densités des ligneux dans les galeries forestières/forêts denses et forêts claires/savanes boisées/agroforêts seraient dues aux conditions naturelles en particulier l'humidité du sol et à la densité du réseau hydrographique favorables au développement de la végétation (Kombate et al.,

2020b ; Issa et al., 2015). La faible valeur de la densité des ligneux et des surfaces terrières obtenues dans les mosaïques de savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs s'explique par la mise en cultures des formations végétales (Moumouni et al., 2017 ; Kombate et al., 2020b).

Les formations végétales du FCM présentent une distribution diamétrique en « cloches » dans les mosaïques savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs et les galeries forestières/forêts denses. Cette distribution asymétrique positive est caractéristique des peuplements avec prédominance d'individus de faible diamètre (Husch et al., 2003). La structure est en « L » dans les forêts claires/savanes boisées/agroforêts traduisant la prédominance des individus de petits diamètres. Cette structure est similaire à celle des formations boisées de la forêt communautaire de Amavénou située dans la même zone écologique au Togo (Atakpama et al., 2017). Il s'agit d'une structure correspondante aux formations stables avec une diminution graduelle des densités des classes de diamètres. Cependant, l'absence d'une des classes de diamètres et la réduction peu successive et graduelle des classes montre l'impact anthropique sur ces formations. Ceci ressort dans la distribution des classes de hauteurs où l'on note la quasi-absence des premières classes de diamètres en particulier dans les plus anthropogènes par comparaison aux galeries forestières et forêts denses supposées moins anthropogènes. Ces différentes activités anthropiques impactent la dynamique d'occupation du sol et le pouvoir de séquestration du carbone des formations boisées.

La biomasse ligneuse des écosystèmes terrestres dépend des processus tels que la photosynthèse, la respiration, la décomposition et la combustion des bois morts émanant des activités anthropiques (Babbar et al., 2021). Dans la FCM, l'extension des agglomérations et la diminution des superficies des galeries forestières/forêts denses ont modifié la structure démographique des formations végétales boisées. Les défriches pour l'installation des champs sont parfois suivies de brûlis, entraînant une destruction du couvert végétal et une perte de biomasse (Mavinga et al., 2022 ; Afelu et al., 2016). Cette déforestation corrélée aux activités de subsistances connexes, affecte négativement les services environnementaux (Mazo et al., 2020 ; Baccini et al., 2017).

Les paramètres dendrométriques qui permettent d'évaluer la biomasse ligneuse (densité, surface terrière et biovolume) varient dans la FCM en fonction des formations végétales ligneuses. Ces paramètres constituent un bon outil d'appréciation de la maturité d'une formation végétale (Kombate et al., 2019) et peuvent être affectés lors des perturbations anthropiques (Mazo et al., 2020). La faible densité et de surface terrière dans les mosaïques savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs prouvent à suffisance que ces formations sont perturbées entraînant des pertes nettes de carbone. La modélisation spatiale du stock et de la séquestration du carbone dans la FCM ressort une variation du carbone entre 2020 et 2035 avec un indice de Kappa supérieur à 80 % traduisant un meilleur pouvoir prédictif du modèle (Ahononga, 2020). Des résultats similaires ont été trouvés dans la réserve de tigres de Sariska en Inde (Babbar et al., 2021). Cette variation du carbone serait liée aux différents processus de conversions ou de modifications au sein des unités d'occupation du sol (Tolessa et al., 2017). Les gains de carbone entre 2020 et 2035 qui s'élèvera à 81607,33 \$ sur le marché carbone dans les forêts claires/savanes boisées/agroforêts et champs/jachères résulteraient de la croissance des forêts dues aux mesures de protection prises et aux activités de reboisement. Ce résultat sera réel si des mesures de protection et de gestion sont

maintenues pour favoriser une augmentation du potentiel de stockage (De Madron et al., 2011 ; Babbar et al., 2021).

La faible évaluation des services écosystémiques notamment le stock de carbone dans les mosaïques savanes arborées/savanes arbustives/jachères/champs serait en partie liée aux activités agricoles et aux changements d'utilisation des terres (Folega et al., 2021) due à la réduction de la densité des arbres sur pied. Les pertes de carbone dans les galeries forestières/forêts denses et les savanes arborées/arbustives résultent de leur déforestation et de leur dégradation/perturbation pour l'installation de nouveaux champs (Baccini et al., 2017 ; Kombate et al., 2019). Des études similaires réalisées au Bénin par Ahononga (2020) ont conclu qu'entre 2005 et 2015, les changements dans l'utilisation des terres ont induit une perte de carbone. Ce même auteur estime qu'à l'horizon 2035, si la tendance est maintenue, un taux de perte supplémentaire de carbone devrait intervenir. Cette perte est imputable à l'anthropisation des terres forestières en référence à plusieurs études dans la sous-région (Bellassen et al., 2008 ; Mazo et al., 2021 ; Ahononga et al., 2021 ; Ouedraogo et al., 2019 ; Loubota Panzou et al., 2016 ; Ago et al., 2015 ; Babbar et al., 2021 ; Liu et al., 2022) ce qui entraînera des pertes monétaires estimées à 58 851,98 \$.

## **5. CONCLUSION**

L'étude révèle que les pressions anthropiques perturbent la structure et le fonctionnement écologiques des écosystèmes de la FCM. La destruction des formations naturelles due aux systèmes culturels entraîne une perte de carbone dans l'atmosphère ; ce qui perturberait le cycle de carbone et contribuerait à la variabilité climatique. La présente étude pourrait servir de base pour compenser en terme monétaire les émissions évitées de carbone qui s'élève à 81607,33 \$. La FCM pourrait être utilisée comme une zone de séquestration de carbone et servir de référence pour les projets REDD+.

## **6. REMERCIEMENT**

Nos remerciements au Ministère chargé de l'Environnement et aux agents des eaux et forêts pour les facilitations et l'accompagnement sur le terrain lors de la collecte des données. Merci aussi aux évaluateurs pour la contribution à l'amélioration du manuscrit.

## **7. FINANCEMENT**

Cette étude a reçu le financement Programme d'appui à la lutte contre le changement climatique au Togo (PALCC-AMCC+ Togo) sur financement de l'Union européenne dont nous exprimons notre gratitude.

## **6. RÉFÉRENCES**

- Afelu, B. ; Fontodji, K.J. & 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.
- Ago, E. ; Agbossou, K.E. ; Ozer, P. & Aubinet, M. (2015). Mesures des flux de CO<sub>2</sub> et séquestration de carbone dans les écosystèmes terrestres ouest-africains (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 20, pp.1-15.
- Ahononga, F. ; Gouwakinnou, G.N. ; Biaou, S.S. & Biaou, S. (2021). Vulnérabilité des terres des écosystèmes du domaine soudanien au Bénin de 1995 à 2015. *Bois et Forêts des Tropiques*, 346, pp.35-50.

- Ahononga, F.C. (2020). Affectations des terres et impacts sur les services écosystémiques des domaines soudanien et soudano-guinéen du Bénin. In *Faculté des Sciences, Département de Botanique*, 211. Bénin: Univ. Parakou.
- Akakpo, K.M. ; Quensièrè, J. ; Gadal, S. ; Kossi, A. & Kokou, K. (2017). Caractérisation et dynamique spatiale de la couverture végétale dans les aires protégées du Togo : étude par télédétection satellitaire de la forêt classée de Missahoé dans la région des plateaux. *Revue internationale de géomatique, aménagement et gestion des ressources*, 1, pp.181-194.
- Atakpama, W. ; Agbetanu, K.M.W. ; Atara, L.L. ; 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, pp.51-64.
- Atakpama, W. ; Folega, F. ; Azo, A.K. ; 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, pp.59-82.
- Babbar, D. ; Areendran, 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*, 278, pp.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, pp.230-234.
- 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. 239. France: Université Montpellier.
- Bawa, D.M. ; 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. *Recherche Agronomique*, 20, pp.15-41.
- 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, pp.43.
- Bouko, B.S. ; Sinsin, B. & Soulé, B.G. (2007). Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes au Bénin. *Tropicultura*, 25, pp.221-227.
- Cairns, M.A. ; Brown, S. ; Helmer, E.H. & Baumgardner, G.A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, pp.1-11.
- Chave, J. ; Andalo, C. ; Brown, S. ; Cairns, M.A. ; Chambers, J.Q. ; 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, pp.87-99.
- De Madron, L.D. ; Bauwens, S. ; Giraud, A. ; Hubert, D. & Billand, A. (2011). Estimation de l'impact de différents modes d'exploitation forestière sur les stocks de carbone en Afrique centrale. *Bois & Forêts des Tropiques*, 308, pp.75-86.
- Dourma, M. ; Soou, E. ; Amana, E.K. ; 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, pp.29-45.
- 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, pp.37-50.
- Folega, A.A. ; Folega, F. ; Woegan, Y.A. ; 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 Écosystèmes et Paysages*, 1, pp.58-72.

- 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. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, 41/42, pp.273-280.
- Gnoumou, A. ; Salfo, S. & Thiombiano, A. (2020). Les groupements végétaux de la réserve de la Comoé-Léraba: caractérisation et impact des sols sur leur distribution. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 14, pp.3168-3187.
- Henderson, P.A. & Seaby, R.M. (2002). Community analysis package 2.15 (CAP) Ltd. IRC House, Pennington, Lymington, SO418GN, UK.
- Husch, B. ; Beers, T. & Kershaw, J. (2003). *Forest Mensuration*. London: 4<sup>th</sup> ed, Ronald Press Company, John Wiley & Sons, Inc,
- Issa, I. ; Wala, K. ; Dourma, M. ; Atakpama, W. ; Woegan, Y.A. ; Folega, F. ; Batawila, K. & Akpagana, K. (2015). Typologie et structure de *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (Meliaceae) sur les Monts Défalé (préfecture de Doufelgou). In *1er colloque Scientifique Internationale de l'Université de Kara*, ed. L'Harmattan, E., 99-110. Kara, Togo.
- Issiaka, N.T. ; Arouna, O. ; Moumouni Issifou, Y. ; Tente, B.A. ; Thomas, O. & Imorou Toko, I. (2020). Modélisation du stock de carbone dans le parc national du W au Bénin. *Revue de l'ACAREF*, 2, pp.359-375.
- 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, pp.69-88.
- Kamou, H. ; Nadjombe, P. ; Gbogbo, A.K. ; Yorou, S.N. ; Batawila, K. ; Akpagana, K. & Guelly, K.A. (2017). Les champignons ectomycorrhiziens consommés par les Bassar et les Kabyè, peuples riverains du Parc National Fazao-Malfakassa (PNFM) au Togo (Afrique de l'Ouest). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 5.
- 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, pp.291 – 305.
- Kombate, B. ; Dourma, M. ; Folega, F. ; Woegan, A.Y. & 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, pp.70-79.
- Kombate, B. ; Dourma, M. ; Folega, F. ; Woegan, A.Y. ; Wala, K. & Akpagana, K. (2020b). Diversité floristique et caractérisation structurale des formations boisées du domaine Soudano-Guinéen au Centre du Togo. *Afrique SCIENCE*, 17, pp.29-43.
- Koumou, Z. (2019). Suivi des feux de végétation dans le parc national Fazao Malfakassa et ses terroirs riverains par imagerie satellitaire modis et landsat. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 1, pp.125-142.
- Koumou, Z. & Lare, L.Y. (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*, 1, pp.85-104.
- Le Clec'H, S. ; Oszwald, J. ; Jegou, N. ; Dufour, S. ; Cornillon, P.A. ; de Souza Miranda, I. ; Gonzaga, L. ; Grimaldi, M. ; Gond, V. & de Sartre, X.A. (2013). Cartographier le carbone stocké dans la végétation: perspectives pour la spatialisation d'un service écosystémique. *Bois & Forêts des Tropiques*, 316, pp.35-47.
- Liu, Q. ; Yang, D. ; Cao, L. & Anderson, B. (2022). Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Tropics: A Case Study of Hainan Island, China. *Land*, 11, pp.244.
- Loubota Panzou, G.J. ; Doucet, J.-L. ; Loumeto, J.-J. ; Biwolé, A. ; Bauwens, S. & Fayolle, A. (2016). Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20, pp.508-522.

- Mavinga, M.S. ; Kinkela, S.C. ; Lukoki, L.F. & Binzangi, K.L. (2022). Conséquences environnementales et écologiques de l'agriculture itinérante sur brûlis dans les environs du Territoire de Lukula. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 36, pp.142-147.
- Mazo, I. ; Arouna, O. & Imorou Toko, I. (2021). Affectation des terres et variabilité de la biomasse ligneuse au Nord-Bénin. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4, pp.391-405.
- 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 Soudianne Du Benin. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 22, pp.304-318.
- Missie, G.G. (2020). Patrimoine naturel et développement local au Congo: le cas du Parc National Conkouati-Douli. 139. *Memoire de Master, Universidade de Évora, Portugal*.
- Moumouni, Y.I. ; 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 Scientifiques, Homme et Société*, 7, pp.63-80.
- Moumouni, Y.I. ; Imorou, I.T. & Moussa, A.D. (2019). Caractérisation de la Dégradation à Travers la Diversité Floristique et la Structure de la Végétation dans le Bassin Moyen de la Sota au Nord-Bénin. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 18, pp.53-70.
- Ouédraogo, M. ; Ouédraogo, D. ; Thiombiano, T. ; Hien, M. & Lykke, A.M. (2013). Dépendance économique aux produits forestiers non ligneux: cas des ménages riverains des forêts de Boulon et de Koflandé au Sud-Ouest du Burkina Faso. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 107, pp.45-72.
- Ouedraogo, W.O. ; Gomgnimbou, A.P. ; Santi, S. ; Ilboudo, D. & Toguyeni, A. (2019). Quantification de la Biomasse et stockage du carbone du massif forestier de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Dindéresso province du Houet au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13, pp.3276-3288.
- Ouro Djeri, E. ; Djaqba, T. ; Sewa, A. ; Ouro-Landjo, S. & Albada, A. (2001). Situation des ressources génétiques forestières du Togo. In *Atelier sous-régional FAO/IPGRI/ICRAF sur la conservation, la gestion, l'utilisation durable et la mise en valeur des ressources génétiques forestières de la zone sahélienne, note thématique sur les ressources génétiques forestières, document FGR/13F, Département des forêts, FAO, Rome, Italie*, 25 p.
- Polo-Akpisso, A. ; Wala, K. ; Ouattara, S. ; Woegan, Y.A. ; Coulibaly, M. ; Atato, A. ; Atakpama, W. ; Nare, M.T. ; Tano, Y. & Akpagana, K. (2015). Plant Species Characteristics and Woody Plant Community Types within the Historical Range of Savannah Elephant, *Loxodonta africana* Blumenbach 1797 in Northern Togo (West Africa). *Annual Research & Review in Biology*, 7, pp.283-299.
- 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, pp.19.
- Rondeux, J. (2021). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. *Presses agronomiques de Gembloux*,
- Sebabe, A. (2004). Gestion environnementale de la forêt classée de Missahoe au Togo. 13.
- 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). *Cybergeog: European Journal of Geography*, 439.
- Tchamie, T. (1994). Enseignements à tirer de l'hostilité des populations locales à l'égard des aires protégées au Togo. *Unasylva*, 45, pp.22-27.
- Tol, R.S. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of economic perspectives*, 23, pp.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, pp.47-54.

Woegan, Y.A. ; Akpavi, S. ; Dourma, M. ; Atato, A. ; Wala, K. & Akpagana, K. (2013). Etat des connaissances sur la flore et la phytosociologie de deux aires protégées de la chaîne de l'Atakora au Togo: Parc National Fazao-Malfakassa et Réserve de Faune d'Alédjo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7, pp.1951-1962.

## **7. TERMES CLES ET DÉFINITIONS**

**Biomasse ligneuse** : Quantité totale de matière organique vivante aérienne dans la végétation.

**InVEST**: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs.

**Modélisation** : simulation de l'utilisation future des terres et les changements du couvert forestier.

**MOLUSCE**: Modules for Land Use Change Evaluation.