



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Cartographie de la biomasse forestière et évaluation du carbone séquestré dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur au Centre – Bénin

Mama DJAOUGA^{1*}, Soufiyanou KARIMOU^{1*}, Ousséni AROUNA²,
Soufouyane ZAKARI¹, Augustin OROU MATILO³, Ismaïla TOKO IMOROU¹,
Ibouraïma YABI⁴, Julien DJEGO⁵, Omer THOMAS¹ et Christophe HOUSSOU⁴

¹Laboratoire de Cartographie, (LaCarto), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 10 BP 1082
Cotonou, Cadjèhoun, Bénin.

²Laboratoire de Géosciences, de l'Environnement et Applications (LaGEA), Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), 03 BP 304 Abomey, Bénin.

³Centre d'Etudes, de Recherches et de Formation Forestières (CERF), Direction Générale des Eaux,
Forêts et Chasse (DGEFC), 06 BP 3126 Cotonou, Bénin.

⁴Laboratoire Pierre PAGNEY, "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE),
UAC, BP 922, Abomey-Calavi, Bénin.

⁵Laboratoire d'Écologie Appliquée (LEA), UAC, 01 BP 526 Cotonou, Bénin.

*Auteur correspondant ; E-mail : maloud75@gmail.com / karimoubares@gmail.com; Tél.: (+229) 96 20 46 49

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Fonds National de la Recherche Scientifique et de l'Innovation Technologique (FNRSIT) pour avoir financé le présent travail à travers le projet cartographie de la biomasse forestière et évaluation du carbone séquestré par les aires protégées du Bénin (Projet PCB).

Received: 05-08-2021

Accepted: 29-11-2021

Published: 31-12-2021

RÉSUMÉ

La forêt classée de l'Ouémé supérieur au Centre-Bénin est un potentiel puits de carbone en dépit des pressions d'origines anthropiques qui menacent la plupart des écosystèmes forestiers. Cette recherche visait à cartographier la biomasse forestière et le stock de carbone séquestré par les formations végétales de la forêt classée de l'Ouémé supérieur au Bénin. A cet effet, un inventaire forestier a été réalisé dans 73 placeaux circulaires de 18 m de rayon suivant le protocole de l'Inventaire Forestier National (IFN). Les principales données collectées étaient le diamètre et la hauteur des arbres. Les images landsat OLI-TIRS de 2018 à travers le NDVI ont été utilisées en combinaison avec les données de l'inventaire forestier *in situ* pour la spatialisation de la biomasse et du carbone séquestré. Les résultats obtenus ont révélé que la biomasse totale produite par les arbres dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur, avoisine 13 035 694 tonnes avec une quantité totale de carbone séquestrée évaluée à 6 348 383 tonnes. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone ont montré de plus fortes quantités de biomasse et de carbone séquestré à l'intérieur de la forêt classée comparativement aux périphéries surtout les zones qui sont situées le long des routes aménagées. Il est alors important d'entreprendre les actions de conservation des formations forestières en vue d'accroître leur potentiel de séquestration de carbone dans l'atténuation des effets des changements climatiques au Bénin.

© 2021 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Carbone séquestré, inventaire forestier, NDVI, changement climatique, forêt classée de l'Ouémé supérieur au Bénin.

Mapping of forest biomass and assessment of sequestered carbon in the forest reserve of upper Ouémé in Central Benin

ABSTRACT

The Upper Ouémé gazetted forest in Central Benin is a potential carbon sink despite the anthropogenic pressures that threaten most forest ecosystems. This research aims to map the forest biomass and carbon stock sequestered by plant communities in the Upper Ouémé classified forest in Benin. To this end, a forest inventory was carried out in 73 circular plots of 18 m radius following the protocol of the National Forest Inventory (IFN). The main data collected were tree diameter and height. The 2018 OLI-TIRS landsat images through NDVI were used in combination with the in situ forest inventory data for the spatialization of biomass and sequestered carbon. The results obtained show that the total biomass produced by trees in the Upper Ouémé classified forest is around 13 035 694 tonnes with a total amount of sequestered carbon estimated at 6 348 383 tonnes. The spatial distribution of biomass and carbon shows higher amounts of biomass and carbon sequestered inside the gazetted forest compared to the periphery, especially in areas that are located along developed roads. It is therefore important to undertake conservation actions in forest in order to increase their carbon sequestration potential in mitigating the effects of climate change in Benin.

© 2021 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Sequestered carbon, forest inventory, NDVI, climate change, upper Ouémé classified forest in Benin.

INTRODUCTION

Les forêts concentrent environ 80% des stocks globaux de carbone ligneux aérien et jouent un rôle important dans le cycle du carbone global (Houghton, 2005 ; Laporte et al., 2010). L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, comme le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O), participe au réchauffement climatique actuel à la surface de la terre. Cette situation préoccupe bon nombre de chercheurs à l'échelle internationale (Loubota Panzou et al., 2016) et se traduit par la signature de plusieurs accords, conférences et conventions comme la convention cadre des Nations - Unies pour les Changements Climatiques (CCNUCC), la conférence des parties (CoP21) à Paris en 2015 sur le climat (Pascal et Peter, 2015).

En effet, dans les écosystèmes forestiers, le carbone est stocké dans la biomasse vivante (biomasse aérienne et biomasse souterraine), le bois mort, la matière organique du sol et la litière (GIEC, 2003 ; Loubota Panzou et al., 2016). En dehors de leurs rôles de conservation de la biodiversité, d'approvisionnement en services

écosystémiques, la capacité de ces écosystèmes forestiers à piéger le carbone de l'atmosphère et à le stocker est essentiel pour la mise en œuvre des stratégies d'atténuation des changements climatiques et notamment le mécanisme de réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation (IPCC, 2007 ; FAO, 2009). Dans cette logique, plusieurs travaux de recherche ont porté sur les estimations de la biomasse forestière et le potentiel de séquestration de carbone des écosystèmes de par le monde (Feldpausch et al., 2012 ; Mugasha et al., 2013 ; Fayolle et al., 2013 ; Ngomanda et al., 2014 ; Chave et al., 2014).

La plupart de ces travaux repose sur les méthodes basées sur les parcelles des inventaires forestiers utilisant des équations allométriques pantropicales (Brown et al., 1989 ; Chave et al., 2004 ; Feldpausch et al., 2012 ; Chave et al., 2014) et tropicales (Kuyah et al., 2012a ; Mugasha et al., 2013 ; Fayolle et al., 2013 ; Ngomanda et al., 2014). Grâce à ces méthodes, il est possible de combiner les données de la télédétection pour spatialiser les estimations de la biomasse forestière et le stock de carbone afin de produire des cartes à différentes échelles (Goetz et al., 2009 ; Clark et al., 2012 ; Bastin et al., 2014).

Au Bénin, les travaux réalisés portent sur l'estimation de la biomasse aérienne et du stock de carbone des arbres de *Lophira lanceolata* (Adjéran et al., 2020), l'estimation du stock de carbone organique dans les plantations d'*Acacia auriculiformis* (Kooke et al., 2019), la modélisation des stocks de carbone du sol (Guendehou et al., 2014) ; l'établissement du bilan carbone des mangroves des zones humides (Ajonina, 2013) ; l'évaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à *Vitellaria paradoxa* et à *Parkia biglobosa* en région soudanienne du Bénin (Saïdou et al., 2012). Peu de travaux de recherche se sont focalisés sur les données combinées de terrain *in situ* et de la télédétection pour la spatialisation de la biomasse forestière et du stock de carbone au Bénin. De telle méthode peut permettre de détecter la variation de la contribution des écosystèmes forestiers à la séquestration du carbone dans l'espace et dans le temps au regard de l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre induite par les activités humaines.

La forêt classée de l'Ouémé supérieur au Centre-Bénin, est un potentiel puits de carbone en dépit des pressions d'origine anthropique qui menacent la plupart des écosystèmes forestiers. Elle est caractérisée par une diversité de formations végétales et représente ainsi un cadre idéal pour les recherches scientifiques. L'objectif de cette recherche était de cartographier la biomasse forestière et le stock de carbone de la forêt classée de l'Ouémé supérieur dans le cadre de la mise en œuvre d'un projet de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation et à la dégradation des écosystèmes forestiers (REED+).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Milieu d'étude

La forêt classée de l'Ouémé supérieur est située au nord Bénin dans la zone de transition soudano-guinéenne (White, 1986 ; Adomou et al., 2011). Géographiquement, elle est localisée entre les parallèles 9°11' et 9°47'

de latitude nord et entre les méridiens 1°58' et 2°28' de longitude est et se trouve à cheval entre les communes de Djougou (Département de la Donga), de N'Dali et de Tchaourou (Département du Borgou) (Figure 1). Cette forêt a été classée par l'administration coloniale sur une superficie de 177 542 ha selon l'arrêté n° 4310 SE du 27 juillet 1952. Le climat est de type tropical sec et est caractérisé par une succession dans l'année de deux saisons dont une saison des pluies et une saison sèche de durée approximativement égale avec une pluviosité annuelle d'environ 1200 mm. Les types de formations végétales qu'on y rencontre sont diversifiés mais on note une absence de forêts denses humides semi-décidues et un enrichissement des forêts claires et des formations savanicoles soudanaises. La faune abritant cette forêt est variée et diversifiée.

Méthodes de collecte des données

Dispositif expérimental

Un échantillonnage a été réalisé dans les placeaux permanents de 18 m de rayon précédemment installés pour le compte de l'Inventaire Forestier National en 2006 (IFN, 2006). L'inventaire systématique par échantillonnage statistique terrestre sur la base d'une grille de 15 km x 15 km, basée sur la projection « UTM » de l'ellipsoïde de référence WGS 1984, Zone 31N, a été retenu. A chaque sommet de cette grille, se trouve une unité d'échantillonnage permanente (Figure 2). Les unités d'échantillonnage non permanent ont été choisies dans un rayon de 1 km du placeau permanent. Ces placeaux permanents et non permanents de l'IFN (2006) ont été complétés par des placeaux de mêmes dimensions installés de façon aléatoires. Au total 73 placeaux ont été installés (Tableau 1).

Données collectées

Deux catégories de données ont été collectées. Il s'agit des données planimétriques et celles d'inventaire forestier. Les données planimétriques concernent les images landsat

OLI-TIRS de 2018. Elles ont été obtenues à travers le lien www.earthexplorer.usgs.gov. En ce qui concerne les données d'inventaire, elles ont été collectées dans les placeaux précédemment installés et ont concerné le type de formation végétale en place, le diamètre (DBH \geq 10 cm) et la hauteur des arbres respectivement avec le ruban pi et le clisimètre. Dans le cas où il y a des contreforts ou des racines échasses, le diamètre a été mesuré au-dessus d'eux en fonction des recommandations faites par Clark et al. (2001).

Traitement des données

Méthodes d'estimation de la biomasse forestière

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

$$B_T = \begin{cases} B_a + B_r \\ \text{ou} \\ B_a (1 + R) \end{cases} \quad \text{Avec } B_r = B_a * R$$

R : facteur de conversion de la biomasse aérienne en biomasse souterraine. Ce facteur est égal à 0,24 (Mokany et al., 2006).

Détermination de la biomasse aérienne (B_a)

A cause de la diversité et de la spécificité des formations végétales au sein de la forêt classée de l'Ouémé supérieur, la détermination de la biomasse aérienne a été faite suivant plusieurs modèles allométriques.

✓ Pour les espèces de forêt dense et galerie forestière

L'équation allométrique de Chave et al. (2014) a été utilisée pour l'estimation de la biomasse aérienne des espèces ligneuses

présentes dans ces unités de végétation. Cette équation est la suivante :

$$B_{af} = 0,0673 * (\rho D^2 H)^{0,976}$$

Avec B_{af} : Biomasse aérienne en kg, D : Diamètre mesuré à hauteur de poitrine (cm), H : Hauteur totale (m) et ρ : Densité spécifique (g/cm^3)

✓ Pour les espèces de forêt claire, de savane et de jachère

L'équation allométrique de Nakou et al. (2016) a été utilisée pour l'estimation de la biomasse forestière des espèces ligneuses présentes dans ces unités de végétation. Elle se présente comme suit :

$$B_{as} = 10,1859 * 10^{-5} * D^{2,1949} * H^{0,5317} * \rho^{1,3553}$$

B_{as} : Biomasse aérienne (tonne) ; D : diamètre (cm) mesuré à 1,3 m au-dessus du sol, H : Hauteur totale (m), ρ : Densité spécifique moyenne de l'espèce (t/m^3)

✓ Pour certaines espèces en plantation au Bénin

La biomasse aérienne des espèces comme *Tectona grandis* et *Anacardium occidentale* a été calculée en multipliant la biomasse fût par le facteur d'expansion de la biomasse (BEF).

✓ Pour l'espèce *Tectona grandis*

L'équation proposée par Guendehou et al. (2012) a été utilisée pour estimer la biomasse aérienne des individus de l'espèce. L'équation choisie est de la forme :

$$B = \exp[-2,1209 + 0,0409 + 2,4871 * \ln(D)]$$

; $B_{at} = B * BEF_t$ Avec $BEF_t = 1,38$

B_{at} : Biomasse aérienne (kg) ; B : Biomasse du fût (kg) ; D : diamètre (cm) mesuré à 1,3 m au-dessus du sol

✓ Pour l'espèce *Anacardium occidentale*

L'équation de Biah et al. (2018) a été utilisée pour l'estimation de la biomasse aérienne. L'équation choisie est de la forme :

$$B_1 = \exp[-1,85645 + 0,01656 + 2,02288 * \ln(D)]$$

; $B_{an} = B_1 * BEF_a$ Avec $BEF_a = 1,61$

B_{an} : Biomasse aérienne (kg) ; B_l : Biomasse du fût (kg) ; D : diamètre (cm) mesuré à 1,3m au-dessus du sol

Estimation du carbone total

L'estimation de la quantité du carbone total a été faite à partir du facteur de conversion proposé par Guendehou et al. (2012). Ce facteur de conversion a pour valeur 0,487 (Goussanou et al., 2018). Ainsi, la quantité de carbone total a été déduite de la manière suivante :

$$C_T = B_T \times 0,487$$

Avec C_T : carbone total et B_T : biomasse totale
Spatialisation de la biomasse forestière et du carbone séquestré

Pour cartographier la biomasse et le carbone, le NDVI a été utilisé comme variable prédictive. Ainsi, les valeurs de NDVI ont été extraites des images landsat OLI-TIRS de 2018. Le modèle puissance a été retenu par ce qu'il présente un pouvoir explicatif plus élevé

et la plus faible erreur standard après une implémentation de plusieurs modèles. Les données de NDVI ont subi deux types de transformation. La première transformation (type logarithmique) a permis de faire passer les valeurs de NDVI de l'intervalle [-1 ; 1] à [0 ; 255]. Ainsi, les valeurs négatives ont pu être évitées dans la manipulation et la visualisation des données (Chabi et al., 2016). La deuxième transformation était celle de Box-Tidwell (1962) pour la détermination du paramètre de forme λ suivant la formule :

$$B = \alpha + \beta * NDVI^\lambda + \varepsilon \text{ (Modèle}$$

puissance et ses dérivés)

B : biomasse totale ; α , β et δ : coefficients des modèles ; ε : erreur ; NDVI : Indice de différence normalisé de végétation.

Toutes les analyses ont été exécutées dans le logiciel R 3.5.1 (R Core Team, 2018) et la mise en page cartographique a été faite dans ArcGis 10.3.

Tableau 1 : Nombre de placeaux par unité de végétation.

Unité de végétation	Nombre de placeaux installés
Forêt galerie	1
Forêt dense sèche	1
Forêt claire et savane boisée	23
Savane arborée	32
Savane arbustive	9
Plantation	4
Jachère	3
Total	73

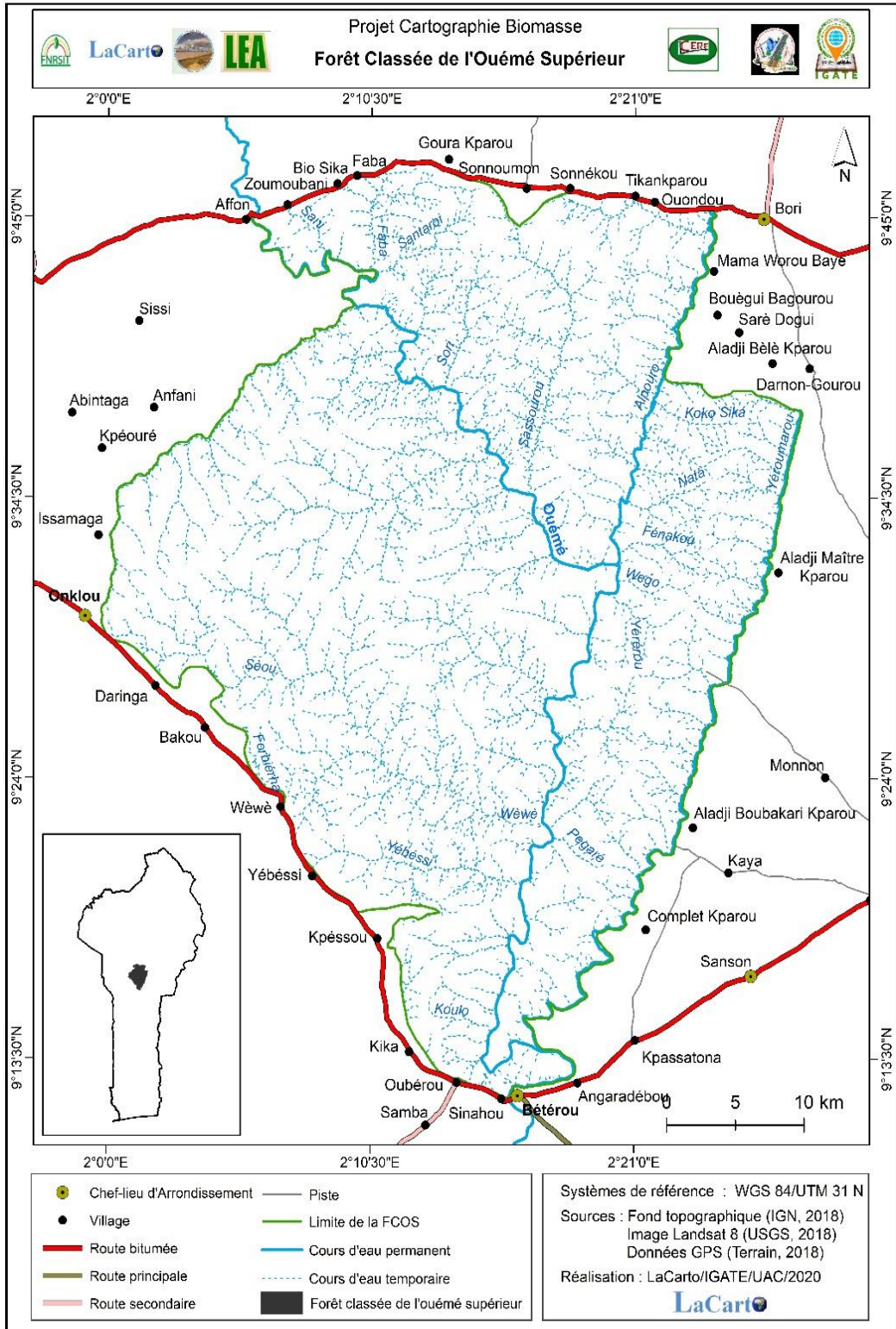


Figure 1 : Localisation géographique de la forêt classée de l'Ouémé supérieur.

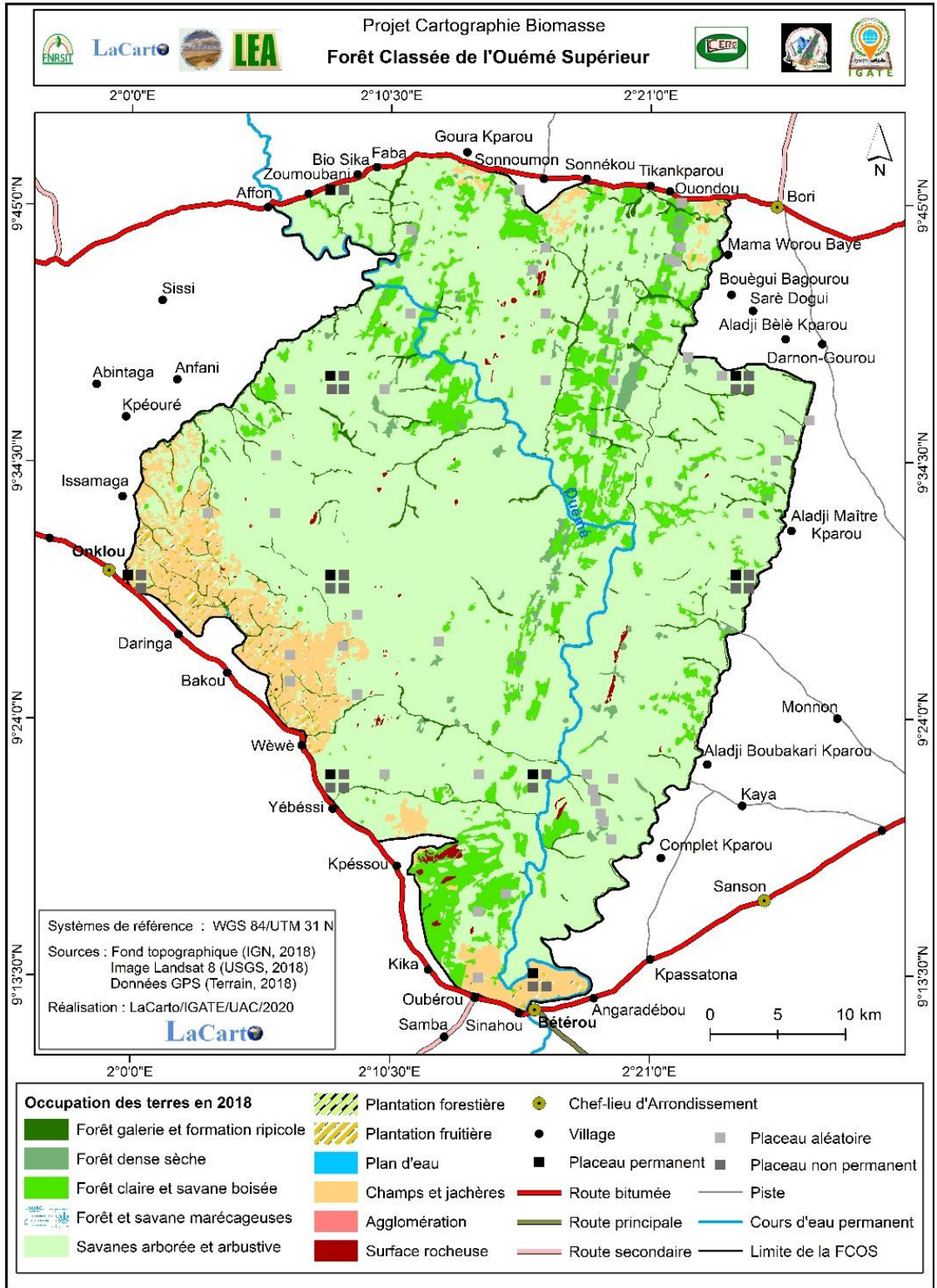


Figure 2 : Spatialisation des plateaux dans de la forêt classée de l'Ouémé supérieur.

RÉSULTATS

Biomasse forestière et carbone séquestré par unité de végétation

Les données d'inventaire ont révélé que la biomasse totale produite par les arbres de la forêt classée de l'Ouémé supérieur avoisine 13 035 694 tonnes. La quantité totale de carbone séquestrée a été évaluée à 6 348 383 tonnes. Le tableau 2 présente les valeurs de biomasse et de carbone par unité de végétation de la forêt classée de l'Ouémé supérieur.

De façon globale, la biomasse forestière totale produite par unité de végétation dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur est de $67,54 \pm 35,25$ t/ha avec une quantité moyenne de carbone séquestré de $32,89 \pm 17,16$ t/ha. Les formations forestières (forêts galerie, dense sèche et claire) sont celles qui assurent une plus grande production de biomasse et de séquestration de carbone dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur (Tableau 2). Parmi les formations savaniques, seules les savanes boisées accumulent une quantité de biomasse ($89,53 \pm 24,55$ t/ha) largement au-dessus de la moyenne ($67,54 \pm 35,25$ t/ha) notée pour l'ensemble de la forêt classée (Tableau 2).

Cartographie de la biomasse et du carbone de la forêt classée de l'Ouémé supérieur

La spatialisation de la biomasse et du carbone de la forêt a été faite en utilisant comme fonction de lien un modèle de régression de la forme :

$$B = -135,50 + 0,0326 * NDVI^{1,75}$$

$$(R^2 = 68,48\% \quad p = 2,2 * 10^{-16})$$

Le pouvoir explicatif du modèle de prédiction de la biomasse forestière et du carbone en fonction du NDVI indique qu'environ 68% de la variation de la biomasse et du carbone dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur sont expliquées par la variation des valeurs de NDVI. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone a montré une prédominance de plage de fortes quantités de biomasse et de carbone dans le centre-ouest et surtout dans les forêts galeries (Figures 3 et 4). Les périphéries ouest, sud, sud-ouest et nord sont caractérisées par de faibles valeurs de biomasse (Figure 3) et séquestrent ainsi moins de carbone (Figure 4) par rapport aux autres secteurs de ladite forêt.

Tableau 2 : Valeurs de biomasse et de carbone par unité de végétation de la forêt classée de l'Ouémé supérieur.

UV		Ba (t/ha)	Br (t/ha)	B _T (t/ha)	C _T (t/ha)
Forêt galerie	<i>m</i>	172,200	41,328	213,529	103,988
	<i>σ</i>	-	-	-	-
Forêt dense sèche	<i>m</i>	79,841	19,162	99,002	48,214
	<i>σ</i>	-	-	-	-
Forêt claire	<i>m</i>	93,117	22,348	115,465	56,231
	<i>σ</i>	29,098	6,984	36,082	17,572
Savane boisée	<i>m</i>	72,198	17,327	89,525	43,599
	<i>σ</i>	19,800	4,752	24,552	11,957
Savane arborée	<i>m</i>	46,056	11,053	57,109	27,812
	<i>σ</i>	12,434	2,984	15,418	7,508
Savane arbustive	<i>m</i>	27,615	6,628	34,243	16,676
	<i>σ</i>	9,144	2,195	11,339	5,522
Jachère	<i>m</i>	32,437	7,785	40,222	19,588
	<i>σ</i>	12,522	3,005	15,527	7,562
Plantation	<i>m</i>	34,882	8,372	43,253	21,064
	<i>σ</i>	31,443	7,546	38,990	18,988
Global	<i>m</i>	54,470	13,073	67,543	32,894
	<i>σ</i>	28,424	6,822	35,245	17,164

Ba : Biomasse aérienne ; Br : Biomasse racinaire ; B_T : Biomasse totale ; C_T : Carbone total ; *m* : moyenne ; *σ* : Ecart-type.

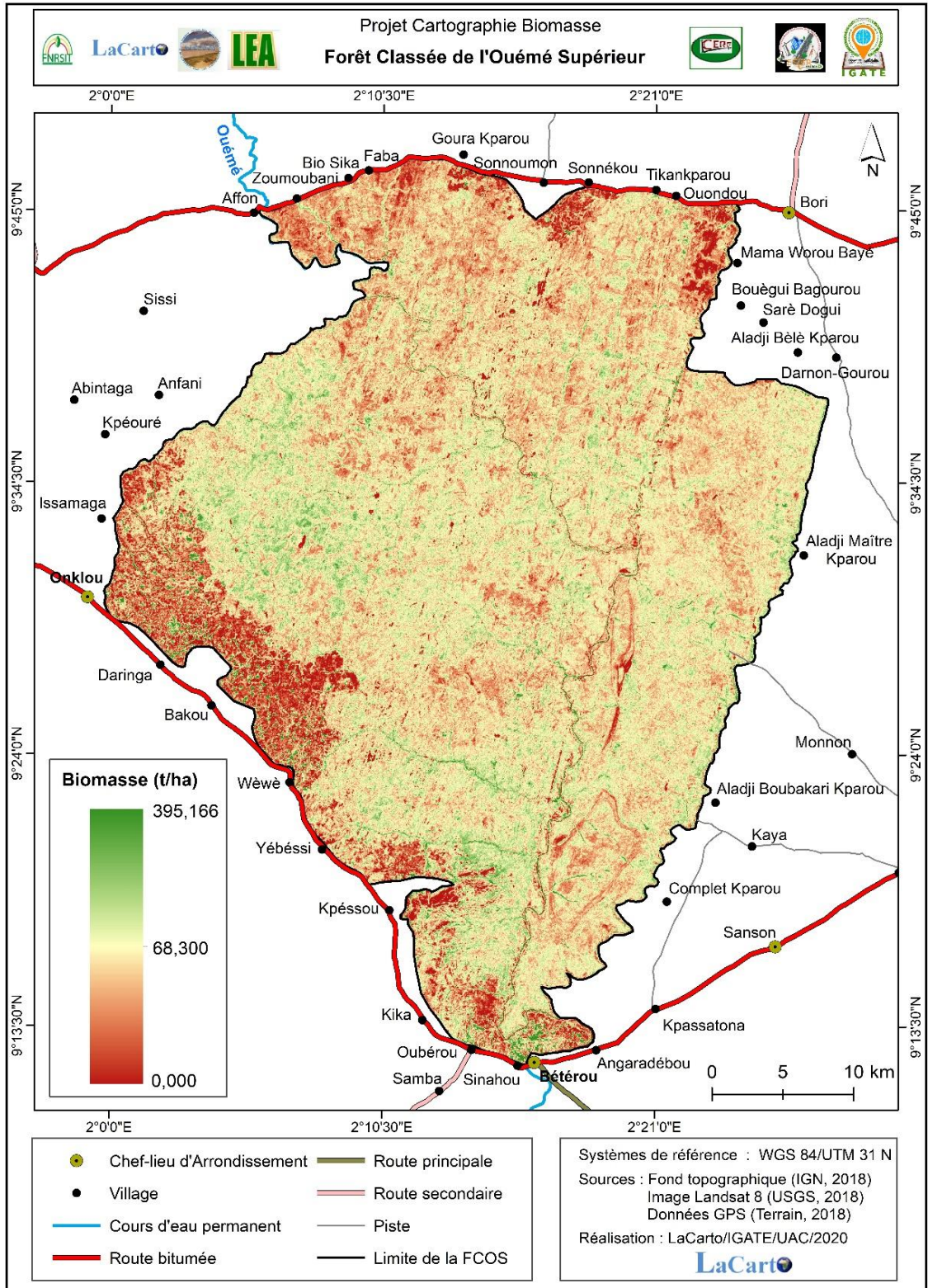


Figure 3 : Distribution de la biomasse dans la forêt classée de l’Ouémé supérieur.

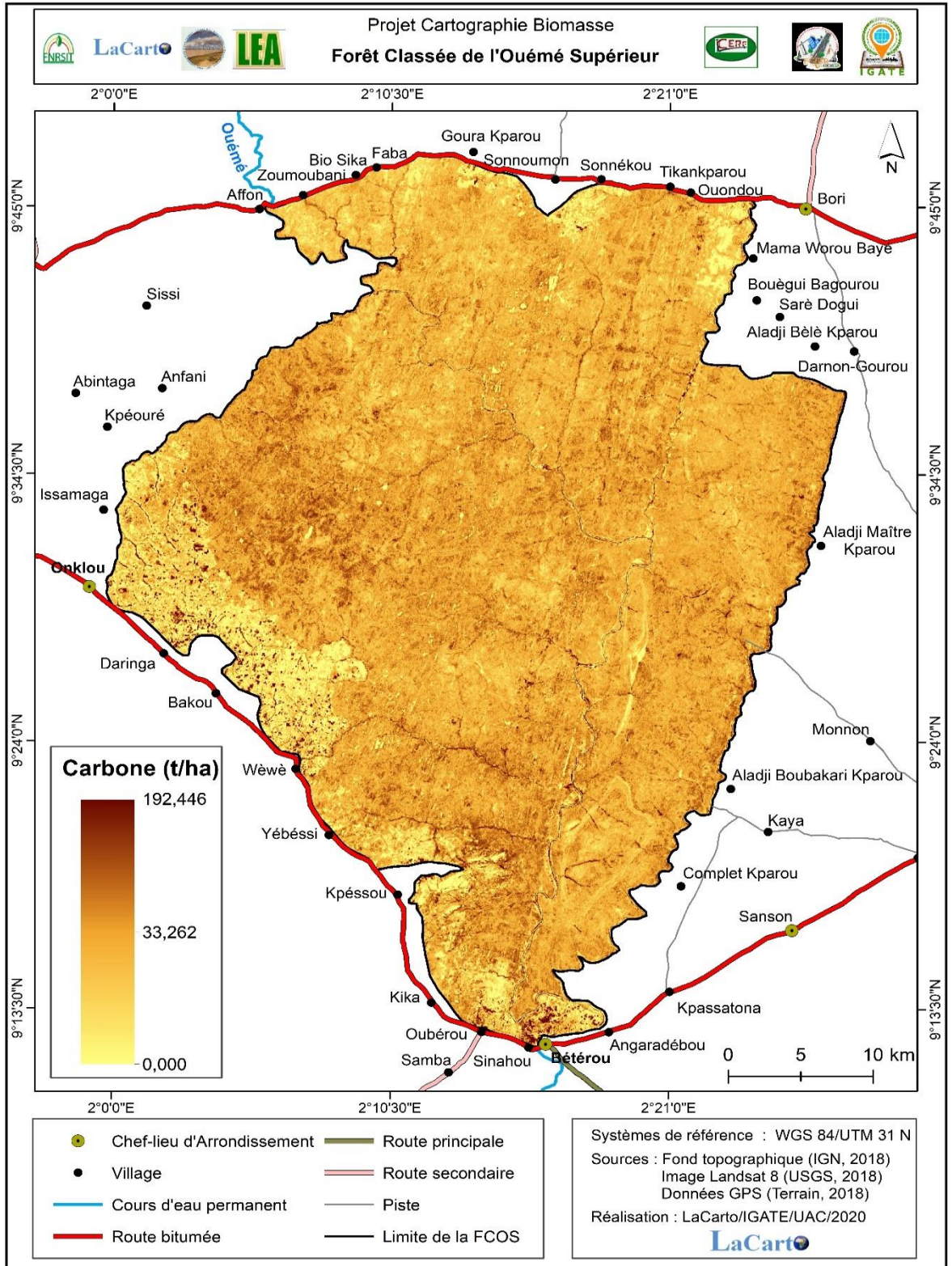


Figure 4 : Spatialisation du carbone séquestré dans la forêt classée de l’Ouémé supérieur.

DISCUSSION

Biomasse forestière et du carbone séquestré de la forêt classée de l'Ouémé supérieur

La présente recherche a utilisé la méthode non destructive pour l'estimation de la biomasse forestière et le stock de carbone à travers des équations allométriques. Cette méthode est la plus utilisée en matière de quantification de la biomasse forestière et du stock de carbone (Bakayoko et al., 2012 ; Issifou Moumouni et al., 2017 ; Adamou et al., 2020 ; Adjéran et al., 2020). Elle présente l'avantage d'être rapidement opérationnelle en termes de temps et de coût d'estimation. Cependant, plusieurs auteurs ont souligné que l'utilisation de ces équations allométriques en dehors des sites pour lesquels elles ont été développées pourrait entraîner des biais au niveau des estimations (Chave et al., 2004 ; Molto et al., 2013 ; Loubota Panzou et al., 2016). La quantité totale de carbone séquestré par les arbres de la forêt classée de l'Ouémé supérieur est évaluée à 6 348 382,834 tonnes. Cette quantité est largement inférieure au stock de carbone obtenu (24 086 528,6 tonnes) dans le massif forestier de Ngog-Mapubi au Cameroun par Ngoufo et al. (2019). La différence observée peut s'expliquer par la variation de la méthode d'estimation utilisée. La quantité de biomasse forestière et de carbone séquestré obtenus varient suivant les types de formation végétale du milieu d'étude. Cette observation est similaire à celle de Ouédraogo et al. (2019) dans le massif forestier de Dindéresso au Burkina-Faso. Cette variation serait liée aux paramètres structuraux intrinsèques propres à chaque unité de végétation. Selon plusieurs auteurs, la biomasse forestière et le stock de carbone dépendent de plusieurs facteurs qui sont entre autres la qualité, la quantité et la contribution des individus de gros diamètre (Joosten et al., 2004 ; Amougou et al., 2016). De façon globale on note une variation décroissante de la biomasse forestière et du carbone séquestré des formations forestières vers celles savaniques et post-culturelles.

Spatialisation de la biomasse forestière et du carbone séquestré

Le pouvoir explicatif du modèle puissance utilisé indique que 68% de la

variation de la biomasse forestière et du carbone séquestré dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur sont dues à la variation des valeurs de NDVI. Par contre, 32% de cette variation sont liés à d'autres facteurs non pris en compte par le modèle. Ce pouvoir prédictif est inférieur à celui obtenu par Avitabile et al. (2012) avec un taux de 81% en Ouganda. La différence de résultats serait liée au type de modèle utilisé pour les estimations. Ces résultats mettent en relief, le rôle déterminant du NDVI dans la cartographie de la biomasse forestière et du carbone séquestré. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone montre de fortes quantités de biomasse et de carbone séquestré à l'intérieur de la forêt classée qu'aux niveaux des zones périphériques surtout les zones qui sont situées le long des routes. Les faibles valeurs obtenues au niveau de la zone périphérique indiquent que ces zones sont caractérisées par de faibles valeurs de NDVI et sont par conséquent plus dégradées que l'intérieur de la forêt.

Conclusion

La présente recherche a permis de noter que la biomasse forestière et le stock de carbone varient suivant les unités de végétation de la forêt classée de l'Ouémé supérieur au Centre-Bénin. La quantité de biomasse et de carbone séquestrée est plus importante dans les forêts galeries, les forêts claires, les forêts denses sèches et les savanes boisées contrairement aux savanes arborées et arbustives, aux plantations et aux jachères. Ces résultats permettent d'affirmer que la biomasse forestière et le stock de carbone évoluent suivant un gradient décroissant des formations naturelles plus stables vers celles perturbées. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone montrent de fortes quantités de biomasse et de carbone séquestré à l'intérieur de la forêt classée qu'aux niveaux des zones périphériques surtout les zones qui sont situées le long des routes. Ces résultats suggèrent la mise en place par l'administration forestière, d'une politique de la restauration des formations plus dégradées afin d'accroître le potentiel de la biomasse forestière et du carbone séquestré dans ladite forêt pour une contribution considérable à l'atténuation des effets du changement climatique dans le

processus de réduction des émissions issues de la déforestation et de la dégradation des écosystèmes forestiers au Bénin.

CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêt lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Tous les auteurs ont participé à la conception et à la planification de l'étude, puis à la collecte et au traitement des données. SK a rédigé le premier draft du manuscrit. MD, OA, SZ, AOM, ITI, IY, JD ont participé à la correction du premier draft du manuscrit. CH et OM ont supervisé les travaux de collecte, de traitement des données et de rédaction du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Adamou S, Amani A, Mahamadou HM, Yaye AD. 2020. Modèle allométrique d'estimation du carbone aérien séquestré par *Balanites aegyptiaca* (L.) Del dans la partie Sud-Ouest du Niger. *Afrique Science*, **16**(6): 188-203.
- Adjéran RW, Lougbegnon TO, Djego GJ. 2020. Estimation de la biomasse aérienne et du carbone des arbres de *Lophira lanceolata* dans la forêt classée de l'Ouémé supérieur au Bénin. *Afrique Science*, **16**(5): 17-31.
- Adomou AC. 2011. Phytogéographie du Bénin: 14-18. In *Protection de la Nature en Afrique de l'Ouest: Une Liste Rouge pour le Bénin*, Neuenschwander P, Sinsin B, Georgen G (eds). International Institute of Tropical Agriculture: Ibadan, Nigeria; 36-45.
- Ajonina GN, Ago EE, Amoussou G, Mibog ED, Akambi ID, Dossa E. 2014. Carbon budget as a tool for assessing mangrove forests degradation in the western, coastal wetlands complex (Ramsar Site 1017) of Southern Benin, West Africa. In *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa*. Springer : Cham ; 139-149.
- Amougou JA, Bembong Ebokona LD, Batha RAS, Mala AW, Ngono H. 2016. Estimation du stock de carbone dans deux unités de terre en zone de savane du Cameroun. *Revue de Géographie, d'Aménagement Régional et du Développement des Suds, Regardsuds*, **2**: 28-45.
- Avitabile V, Baccini A, Friedl MA, Schmillius C. 2012. Capabilities and limitations of Landsat and land cover data for aboveground woody biomass estimation of Uganda. *Remote Sensing of Environment*, **117**: 366-380.
- Bakayoko O, Assa AM, Coulibaly B, N'Guessan KA. 2012. Stockage de Carbone dans des peuplements de *Cedrela Odorata* et de *Gmelina Arborea* en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, **75**(4): 490-501.
- Bastin JF, Barbier N, Couteron P, Adams B, Shapiro A, Bogaert J, De Cannière C. 2014. Aboveground biomass mapping of African forest mosaics using canopy texture analysis: toward a regional approach. *Ecological Applications*, **24**(8): 1984-2001.
- Biah I, Guendehou S, Goussanou C, Kaire M, Sinsin AB. 2018. Allometric models for estimating biomass stocks in cashew (*Anacardium occidentale* L.) plantation in Benin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, **84** :16 – 27.
- Box GE, Tidwell PW. 1962. Transformation of the independent variables. *Technometrics*, **4**(4): 531-550.
- Brown S, Gillespie AJ, Lugo AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, **35**(4): 881-902.
- Chabi A, Lautenbach S, Orekan VOA, Kyei-Baffou N. 2016. Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin. *Carbon Balance Manage*, **11**(1):1-18. DOI: 10.1186/s13021-016-0058-5
- Chave J, Mechain MR, Burquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, Henry M, Martinez-Yrizar A, Mugasha WA, Muller-Landau HC, Mencuccini M, Nelson BW, Ngomanda A, Nogueira EM, Ortiz-Malavassi E, Pelissier R, Ploton P, Ryan CM, Saldarriaga JG, Vieilledent G. 2014. Improved allometric models to

- estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, **20**(10): 3177–3190. DOI: 10.1111/gcb.12629
- Chave J, Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Lao S, Perez R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Biological Sciences*, **359**(1443): 409-420.
- Clark D, Brown S, Kicklighter D, Chambers J, Thomlinson J, Ni J, Holland E. 2001. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, **11**(2): 371-384. DOI: <https://doi.org/10.1890/1051-0761>
- Clark DB, Kellner JR. 2012. Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science*, **23**(6): 1191-1196. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2012.01471.x
- FAO. 2009. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. FAO, Rome, 202 p.
- Fayolle A, Doucet JL, Gillet JF, Bourland N, Lejeune P. 2013. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, **305**: 29-37. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.036
- Feldpausch TR, Lloyd J, Lewis SL, Brienen RJ, Gloor M, Monteagudo Mendoza A, Phillips OL. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, **9**(8): 3381-3403.
- GIEC. 2003. Recommandations du GIEC en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. GIEC, Kanagawa, Japon, 25 p.
- Goetz SJ, Baccini A, Laporte NT, Johns T, Walker W, Kellndorfer J, Sun M. 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management*, **4**(1): 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-2>
- Goussanou CA, Guendehou S, Assogbadjo AE, Sinsin B. 2018. Application of site-specific biomass models to quantify spatial distribution of stocks and historical emissions from deforestation in a tropical forest ecosystem. *Journal of Forestry Research*, **29**(1): 205-213. DOI: 10.1007/s11676-017-0411
- Guendehou GHS, Lehtonen A. 2014. Guidance for tree measurement in tropical forest ecosystems using non-destructive sampling to develop stem biomass and volume models. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, Metlan työraportteja.
- Guendehou GHS, Lehtonen, Moudachirou M, Mäkipää R, Sinsin B. 2012. Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa. *Southern Forests*, **74**(2): 77-88. DOI: 10.2989/20702620.2012.701432
- Houghton RA. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, **11**(6): 945-958.
- IPCC. 2007. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. IGES Publisher, Japan.
- Moumouni YI, Arouna O, Issaka NT, Imorou IT, Zakari S, & Djaouga M. 2017. Estimation de la variabilité de la biomasse aérienne ligneuse en forêt tropicale sèche: cas de la forêt classée de Wari-Marou au Centre-Bénin. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, **17**: 38-56.
- Joosten R, Schumacher J, Wirth C, Schulte A. 2004. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecology And Management*, **189**(1-3): 87-96.
- Kooke GX, Ali RKFM, Djossou JM, Imorou IT. 2019. Estimation du stock de carbone organique dans les plantations de *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. des forêts classées de Pahou et de Ouèdo au Sud du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **13**(1): 277-293. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i1.23
- Kuyah S, Dietz J, Muthuri C, Jamnadass R., Mwangi P, Coe R, Neufeldt H. 2012. Allometric equations for estimating

- biomass in agricultural landscapes: Belowground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **158**: 225-234. DOI: 10.1016/j.agee.2012.05.010
- IFN. 2006. Méthodologie et instructions pour l'exécution des inventaires forestiers national et régional du Bénin, Projet Bois de Feu, phase II. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, Cotonou, Bénin, 55 p.
- Fagerholt K, Laporte G, Norstad I. 2010. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes. *Journal of the Operational Research Society*, **61**(3): 523-529. DOI: <https://doi.org/10.1057/jors.2009.77>
- Laporte N, Baccini A, Goetz S, Mekui P, Bausch A. 2010. Une première estimation de la biomasse ligneuse aérienne d'Afrique sur la base d'images satellites et d'inventaire forestiers. Conference on Carbon stock and fluxes, COPIFAC, Brazzaville, 58-65.
- Loubota Panzou GJ, Doucet JL, Loumeto JJ, Biwole A, Bauwens S, Fayolle A. 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **20**(4): 508-522.
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, **12**(1): 84-96. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>
- Molto Q, Rossi V, Blanc L. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, **4**(2): 175-183.
- Mugasha WA, Eid T, Bollandssås OM, Malimbwi RE, Chamshama SAO, Zahabu E, Katani JZ. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*, **310**: 87-101.
- Nakou A, Sauter UH, Kohnle U. 2016. Improved models of harvest-induced bark damage. *Annals of Forest Science*, **73**(2): 233-246.
- Ngomanda A, Obiang NLE, Lebamba J, Mavouroulou QM, Gomat H, Mankou GS, Picard N. 2014. Site-specific versus pantropical allometric equations: Which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *Forest Ecology and Management*, **312**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.029>
- Ngoufo R, Zapfack L, Dongfack ET, Ngoufo LST, Guimdo CAM, Aurélien C, Njal S. 2019. Évaluation et spatialisation du carbone stocké dans le massif forestier de Ngog-Mapubi (Cameroun). Conférence OSFACO: Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, Brazzaville. hal-02189496.
- Ouedraogo WO, Gomgnimbou AP, 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**(7): 3276-3288. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i7.24
- Pascal C, Peter S. 2015. *Climat: 30 Questions Pour Comprendre la Conférence de Paris*. Éditions Les Petits Matins : Paris.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Saïdou A, Dossa AFE, Gnanglè PC, Balogoun I, Aho N. 2012. Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (*Vitellaria paradoxa* CF Gaertn.) et à néré (*Parkia biglobosa* Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 1-9.
- White F. 1986. La végétation d'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de la végétation d'Afrique. Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer, United Nations, 391 p.