Journal of Geospatial Science and Technology 2 (2): 47-60, 2021
DOI: https://doi.org/10.54222/jgst.2021.86p93w7c
Submitted: November 11, 2021 Accepted: December 27, 2021

Cartographie de la variabilité spatiale du stock de carbone forestier dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W au Nord-Bénin

AROUNA Ousséni[1&2], SARE WARA Issiaka[2], DJAOUGA Mama[2], ZAKARI Soufouyane[2], TOKO IMOROU Ismaïla[2]

[1]Laboratoire de Géosciences, de l'Environnement et Applications, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), Bénin.

[2]Laboratoire de Cartographie (LaCarto), Institut de Géographie, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (IGATE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin

Correspondance Email : arounaousseni@gmail.com

Résumé

La cartographie du stock de carbone permet d'enrichir les connaissances mais aussi la comparaison des diverses transformations du couvert végétal sur l'évolution du stock. La présente recherche vise à cartographier la variabilité spatiale du stock de carbone forestier dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W au Nord-Bénin. Le modèle de régression non linéaire a permis de prédire la distribution spatiale de la biomasse et du carbone à partir des valeurs de NDVI. Il résulte de cette méthode que la biomasse totale produite dans les unités de végétation de la RBTW a été estimée à 39 988 935,73 tonnes. La quantité totale de carbone correspondante est de 19 474 611,70 tonnes. Concernant la quantité de dioxyde de carbone accumulée, elle a été évaluée à 71 471 824,94 tonnes. Par ailleurs, la quantité de biomasse estimée par placeau oscille entre 2,71 et 172,82 t/ha. Le potentiel de séquestration de carbone dans les savanes boisées et arborées fait respectivement 1,81 et 1,24 fois celui enregistré en moyenne dans la RBTW. Les savanes arbustives et les friches sont les unités qui piègent le moins de dioxyde de carbone soit 18 % et 2 % du total de CO_2. Sur l'ensemble du secteur d'étude, la quantité de carbone enregistrée varie de 35,80 à 54,32 t/ha avec une moyenne de 41,24 ± 4,08 t/ha. La quantité moyenne dans le Parc est de 40,42 ± 2,85 t/ha alors qu'elle est de 41,95 ± 4,78 t/ha pour la périphérie. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone montre que les fortes quantités de biomasse et de carbone sont enregistrées particulièrement au sud-ouest de la RBTW.

Mots-clés : Stock de carbone, modèle de régression, NDVI, distribution spatiale, Réserve de Biosphère Transfrontalière du W.

Abstract

Mapping the spatial variability of forest carbon stock in the W Transboundary Biosphere Reserve in North Benin

Mapping of carbon stock allows for a better understanding but also for the comparison of various vegetation cover transformations on the evolution of the stock. The present research aims to map the spatial variability of forest carbon stock in the W Transboundary Biosphere Reserve in northern Benin. The non-linear regression model was used to predict the spatial distribution of biomass and carbon from NDVI. As a result of this method, the total biomass produced in the RBTW vegetation units was estimated to 39,988,935.73 tons. The corresponding total amount of carbon is 19,474,611.70 tons. Regarding the amount of carbon dioxide accumulated, it was estimated at 71,471,824.94 tons. Furthermore, the estimated amount of biomass per plot varies between 2.71 and 172.82 t/ha. The carbon sequestration potential of these two units in woodlands and shrub savannahs is respectively 1.81 and 1.24 times that recorded on average in the RBTW. Shrub savannahs and wastelands are the units that sequestrate the least carbon dioxide at 18% and 2% of total CO2. Over the entire study area, the amount of carbon recorded ranges from 35.80 to 54.32 t/ha with an average of 41.24 ± 4.08 t/ha. The average amount in the Park is 40.42 ± 2.85 t/ha while it is 41.95 ± 4.78 t/ha for the periphery. The spatial distribution of biomass and carbon shows that the high amounts of biomass and carbon are recorded in the south and particularly in the southwest of the RBTW.
Keywords: carbon stock, regression model, NDVI, spatial distribution, W Transboundary Biosphere Reserve.

Introduction

Les activités humaines exercent une pression considérable sur les écosystèmes. L'augmentation des superficies occupées par les terres agricoles et les zones d'exploitation forestière apparaissent parmi les transformations les plus marquées qui sont survenues au cours des derniers siècles (Vitousek et al., 1997). A cela, viennent s'ajouter, l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère engendrée par l'industrialisation dont les répercussions sont planétaires au niveau du climat et de la biodiversité. La déforestation aurait causé des émissions d'environ 5,8 Gt de CO_2 par an contribuant ainsi au réchauffement climatique au cours des années 90 (Guelou et al., 2020). Ainsi l'étude et l'analyse spatiale des écosystèmes terrestres doivent prendre en compte les diverses influences que les activités humaines exercent sur eux. Le carbone des écosystèmes forestiers provient des différents pools: la biomasse aérienne, la litière, la biomasse racinaire et le sol (Razafimahatrtra *et al.,* 2020). Dans un contexte de déforestation, le débat sur la régulation du climat via la capacité des écosystèmes à séquestrer le carbone apparait comme l'un des services écosystémiques les plus mis en avant par les organismes internationaux. En effet, la séquestration du carbone par les forêts tropicales présente de forts enjeux puisque la végétation des écosystèmes terrestres stocke plus de carbone que l'atmosphère (Silver et al., 2000).

Les cartographies du stock de carbone peuvent trouver une application dans le cadre du mécanisme Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (REDD) dans la mesure où elles fournissent un état des lieux de la quantité de carbone présent dans la végétation. Selon Le Clec'H et al.(2013), les problèmes environnementaux causés par la déforestation et de la dégradation avancée des forêts au Bénin, interpellent les autorités à divers niveaux sur le rôle de premier plan que jouent les forêts dans la séquestration du carbone. Il est donc impérieux de prendre en compte les aires protégées, principaux réservoirs de biodiversité, dans la comptabilisation des stocks de carbone. En outre, le manque de données d'inventaires fiables sur les écosystèmes forestiers et leur productivité reste un handicap majeur pour le Bénin afin de préparer des projets acceptables sur le marché carbone. En plus de cette lacune générale, il faut ajouter la faiblesse des compétences nationales pour l'élaboration de ces projets. La présente recherche vise à cartographier la variabilité spatiale du stock de carbone forestier dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W au Nord-Bénin. Elle est fondée sur l'hypothèse qui prédit que dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W le stock de carbone varie selon les unités de végétation.

1.1 Milieu d'étude

La Réserve de Biosphère Transfrontalière du W est située à l'extrême nord-ouest du Bénin, entre les latitudes 11°20' et 12°23' N et les longitudes 02°04' et 03°05' E (Figure 1). Elle est composée du Parc National du W et des Zones Cynégétiques de l'Atacora et de la Djona (Sabi Lolo Ilou, 2020).

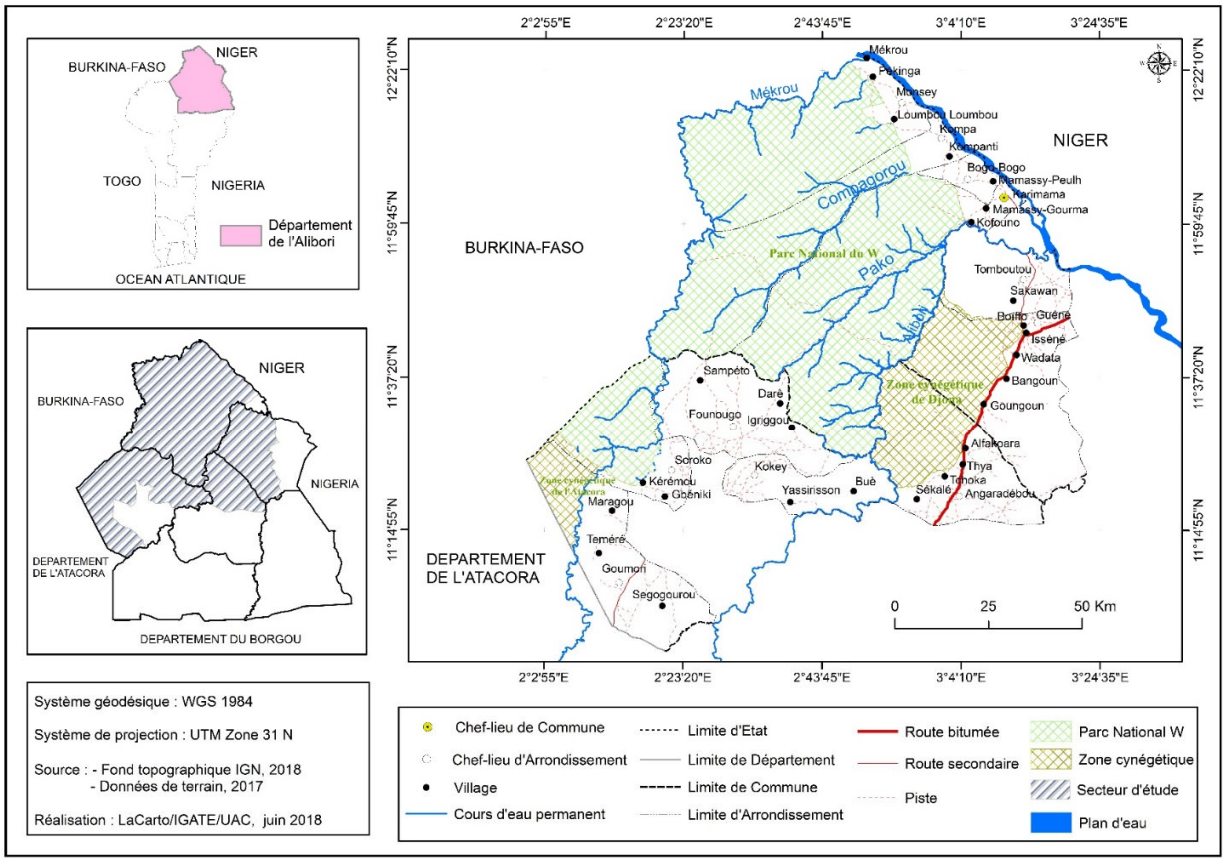

Figure 1 : Situation géographique de la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W

Le climat est de type tropical. La saison pluvieuse va de mi-avril à mi-octobre, soit six mois, durant lesquels tombent des pluies irrégulières et orageuses, réparties suivant un régime unimodal avec un maximum situé en août (Figure 2). Le territoire est un modelé d'ondulation de 20 à 40 m de dénivelé avec une pente inférieure à 2 %. La RBTW comprend en outre l'extension terminale de la chaîne de l'Atacora. La région du complexe du Parc National du W est parcourue par de nombreux cours d'eau dont les principaux sont la Mékrou (410 km) à l'Ouest et l'Alibori (338 km) à l'Est. Le milieu d'étude appartient à la région soudanienne. Les formations végétales auxquelles s'est intéressée la présente recherche sont : la savane boisée, les savanes arborée et arbustive et les mosaïques de champs et jachères.

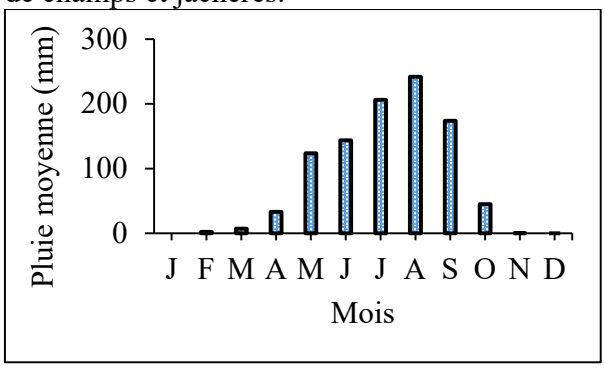

Figure 2 : Régime pluviométrique à la station de Kandi (2018)
Source : Météo-Bénin, 2020

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériel

Dans le cadre de cette recherche, les formations végétales du secteur d'étude extraite d'images Landsat OLI/TIRS (Path : 192 ; Row : 50) du 12/03/2018 constituent le principal matériel utilisé. Les cartes topographiques au 1/50 000 de 2018 notamment les feuilles du Parc W Sud, de l'Alibori-Parc du W, de Malanville, de chutes de Koudou, de Karimama, de Kompa, de Gorges de la Mékrou, de Coude de la Mékrou et de Pétchinga ont été aussi utilisées.

Pour atteindre l'objectif de la recherche, plusieurs outils ont été utilisés. Il s'agit de : un récepteur GPS pour le ralliement des placeaux, un pentadécamètre pour le dimensionnement des placeaux, un ruban π pour la mesure du diamètre des arbres, piquets en bois de 2 m pour matérialiser les limites du placeau, un sécateur pour récolter les spécimens des espèces, papiers journaux pour la réalisation de l'herbier, clisimètre pour la mesure des hauteurs des arbres et le logiciel R a servi pour la spatialisation de la biomasse et du carbone.

2.2 Détermination des paramètres structuraux des unités de végétation de la RBTW

Les paramètres structuraux déterminés dans le présent travail sont : la densité, la surface terrière, le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne et la hauteur totale moyenne. Le tableau 1 présente les paramètres structuraux déterminés par unité de végétation.

Tableau 1 : Formules des paramètres structuraux

Paramètres	Formules	Commentaires
Densité des arbres (tiges/ha)	$N = \frac{n}{A}$	n : nombre d'arbres inventorié dans un placeau ; A : superficie du placeau ramenée à l'hectare (ha)
Diamètre moyen (cm)	$D_g = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i^2}$	n : nombre d'arbres inventorié dans un placeau, d_i : diamètre de l'arbre i dans le placeau.
Surface terrière (m²/ha)	$G = \frac{\pi}{40000A}\sum_{i=1}^{n} d_i^2$	Somme des sections des arbres (dbh ≥10 cm) mesurés sur l'écorce à 1,30 m du sol dans chaque placeau
Hauteur totale (m)	$H = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i$	n : nombre d'arbres inventorié dans un placeau quelconque ; hi : hauteur totale (m) de l'arbre i dans le placeau

2.3 Méthode de détermination de la contribution du stock de carbone séquestré à la réduction des GES

2.3.1 Méthodes de quantification du stock de carbone séquestré

Les relevés ont été réalisés du 06 au 25 décembre 2017 dans les placeaux permanents de 18 m de rayon précédemment installés par la Direction Générale des Eaux, Forêts et Chasse (DGEFC) au cours de l'Inventaire Forestier National (IFN) en 2007. Les relevés ont été complétés pendant cette même période dans des placeaux non permanents installés sur la base des méthodes de l'IFN (2007). L'inventaire systématique par échantillonnage statistique terrestre sur la

base d'une grille de 15 km x 15 km, basée sur la projection « UTM 31 N » de l'ellipsoïde de référence WGS 1984 a été retenu. A chaque sommet de cette maille carrée se trouve une unité d'échantillonnage permanente. Les unités d'échantillonnage aléatoires ont été choisies dans un rayon de 1 km du placeau permanent. Au total, 129 placeaux ont été inventoriés dans la RBTW.

Au cours de l'inventaire forestier, les données collectées sont les noms scientifiques ou vernaculaires des espèces, le nombre d'individus des espèces, le diamètre, la hauteur des arbres, le type de formation végétale, le type de sol et la situation topographique. Le diamètre a été mesuré avec un ruban π et la hauteur des arbres avec un clinomètre. Dans le cas où il y a des contreforts ou des racines échasses, le diamètre est mesuré au-dessus d'eux en fonction des recommandations faites par Clark *et al.* (2001). La hauteur totale et la hauteur fût des arbres (visé haut, visé bas et distance de visé) ont été mesurées à l'aide du clinomètre. Seuls les ligneux de dbh ≥ 10 cm ont été pris en compte. La figure 3 présente la carte des grilles montrant les placeaux dans la RBTW.

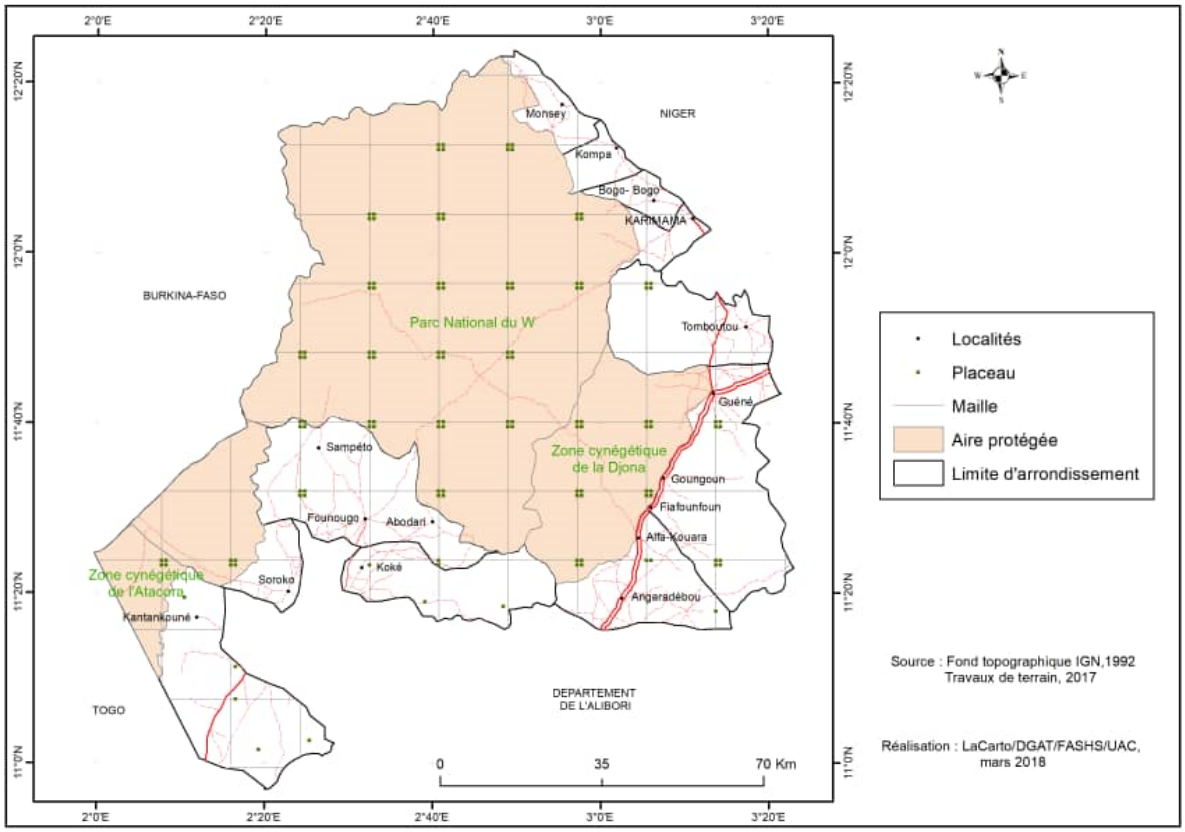

Figure 3 : Distribution des placeaux inventoriés dans la RBTW

Pour l'estimation de la quantité de carbone, le facteur de conversion proposé par Guendehou *et al.* (2012) a été utilisé. Ce facteur de conversion a pour valeur 0,487 (Guendehou

et al., 2012,; Goussanou *et al.*, 2017). Ainsi, la quantité de carbone a été déduite comme suit :

$$C = B*0,487$$

Avec C : carbone et B : biomasse.

2.3.2 Méthodes de spatialisation du stock de carbone séquestré

Pour cartographier la biomasse et le carbone dans chaque secteur, le NDVI a été utilisé comme prédicteur. Des modèles non linéaires (puissance et polynomial) ont été expérimentés en raison du type de relation naturelle existant entre la biomasse et les valeurs de NDVI. Les modèles choisis sont ceux qui présentent un pourvoir explicatif plus élevé et la plus faible erreur standard.

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 est celle de Box-Tidwell pour la détermination du paramètre de forme λ (voir modèle).

Modèle Puissance : $\boldsymbol{B = \alpha + \beta * NDVI^2 + \varepsilon}$

Modèle polynomial :

$$\begin{cases} B = \boldsymbol{\beta} * \boldsymbol{NDVI} + \boldsymbol{\alpha} * \boldsymbol{NDVI2} + \varepsilon \\ B = \boldsymbol{\beta} * \boldsymbol{NDVI} + \boldsymbol{\alpha} * \boldsymbol{NDVI^2} + \delta * \boldsymbol{NDVI^3} + \varepsilon \end{cases}$$

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

Toutes les analyses ont été faites avec le logiciel R (Team, 2018).

La spatialisation de la biomasse et du carbone dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W a été faite en utilisant comme fonction un modèle de régression. Ce modèle a permis de prédire la biomasse ou le carbone à partir des valeurs de NDVI. Le modèle obtenu est de la forme : **$B = 515,26-43,22* NDVI^{0,41}$ (R^2 = 32,67 % P = $4,20*10^{-6}$)**

Le faible pouvoir explicatif de ce modèle est lié à la présence des relevés de plantation. Ces derniers présentent des valeurs quasi constantes de NDVI.

2.4 Méthode de détermination de la contribution du stock de carbone séquestré dans la RBTW à la réduction des GES

La quantification des émissions de GES a été faite en utilisant les émissions de référence de 2000 (DGE/MEHU, 2011). Afin d'établir une unité commune entre tous les GES, un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) a été Appliqué. Le PRG est l'unité de mesure de l'effet d'un GES sur le réchauffement climatique par rapport à celui du dioxyde de carbone (PRG du CO_2 = 1) sur une période de 100 ans. L'équivalent carbone est la mesure "officielle" des émissions de gaz à effet de serre. L'émission de 1 kg de CO_2 vaut donc 0,273 kg équivalent carbone (Kg eq C). Un kilogramme de CO_2 contient près de 273 grammes de carbone, 1 eq $CO_2 \approx 0,273$ eq C et 1 eq C ≈ 3,67 eq CO_2 (GIEC, 2001).

2.5 Méthodes de spatialisation du stock de carbone séquestré à l'horizon 2055

La distribution de la quantité de carbone à l'horizon 2055 a été évaluée par un modèle de régression simple dont la variable bioclimatique la plus significative est la

saisonnalité de la température (Bio4). Seule cette variable a permis de réduire l'erreur résiduelle et d'augmenter sensiblement le pouvoir explicatif du modèle. Le modèle obtenu a été globalement significatif au seuil de 5 % ($F = 37,77$; $p = 1,31*10^{-8}$). Les différents coefficients de régression sont tous statistiquement significatifs au seuil de 0,1 %. Le modèle obtenu se présente comme suit :

$$\mathbf{CA=116,06-3,087*Bio4\ (R^2 = 5,56\ \%)}$$

CA : Carbone aérien en t/ha ; Bio4 : Saisonnalité de la température (°C).

3. Résultats

3.1 Caractérisation de la structure des unités de végétation de la RBTW

Le nombre d'arbres mesurés dans les savanes boisées et arborées représente 38,46 % du total des arbres inventoriés tandis que ceux notés dans les savanes arbustives en font 61,27 %. Le tableau 2 présente les paramètres structuraux des unités de végétation de la RBTW.

Tableau 2 : Paramètres structuraux des unités de végétation de la RBTW

UV	N (arbres/ha)		G (m²/ha)		Dg (cm)		H (m)	
	m	*σ*	*M*	*σ*	*m*	*σ*	*m*	*σ*
SB	459,05	161,55	14,19	1,86	20,67	3,80	9,04	1,38
SA	420,10	168,36	10,41	1,86	18,66	3,93	8,27	1,57
Sa	464,27	245,23	6,20	1,87	14,11	4,11	6,49	1,86
Friches	73,65	34,72	0,81	0,65	12,46	8,09	6,90	1,12
Global	446,14	219,30	8,37	3,62	16,21	4,85	7,33	2,00

N : Densité ; G : Surface terrière ; Dg : Diamètre moyen ; H : Hauteur totale ; UV : Unité de végétation ; SB : Savanes boisées ; SA : Savanes arborées ; Sa : Savanes arbustives ; m : moyenne ; σ : écart type

Il ressort de l'analyse du tableau 2 que les plus fortes valeurs de densité sont observées au niveau des savanes arbustives (464,27 ± 245,23 arbres/ha) et les plus faibles au niveau des friches (friches (73,65 ± 34,72 arbres/ha). Les valeurs plus élevées de surface terrière (14,19 m²/ha ± 1,86) et de diamètre moyen (20,67 ± 3,80 cm) sont enregistrées au niveau des savanes boisées cependant les plus faibles valeurs sont observées au niveau des friches respectivement (0,81 ± 0,65 m²/ha) et (12,46 ± 8,09 cm).

3.3 Estimation de la biomasse et du carbone séquestré dans la RBTW

La biomasse totale produite dans les unités de végétation de la RBTW a été estimée à 39 988 935,73 tonnes. La quantité totale de carbone correspondante est de 19 474 611,70 tonnes. Concernant la quantité de dioxyde de carbone accumulée, elle a été évaluée à 71 471 824,94 tonnes. Par ailleurs, la quantité de biomasse estimée par placeau oscille entre 2,71 et 172,82 t/ha. Le tableau 3 présente les valeurs de biomasse, de carbone et de dioxyde de carbone dans les unités de végétation de la RBTW.

Tableau 3 : Valeurs de biomasse, de carbone et de CO_2 des unités de végétation de la RBTW

UV		Ba (t/ha)	Br (t/ha)	B (t/ha)	C (t/ha)	CO_2 (t/ha)
SB	*m*	103,01	24,72	127,73	62,20	228,29
	σ	16,95	4,07	21,02	10,23	37,56
SA	*m*	72,37	17,37	89,74	43,70	160,40
	σ	15,51	3,72	19,24	9,37	34,38
Sa	*m*	39,58	9,50	49,08	23,90	87,73
	σ	13,48	3,23	16,71	8,14	29,87
Friche	*m*	4,97	1,19	6,16	3,00	11,01
	σ	3,94	0,94	4,88	2,38	8,73
Global	*m*	56,78	13,63	70,40	34,29	125,83
	σ	28,30	6,79	35,09	17,09	62,72

Ba : Biomasse aérienne ; Br : Biomasse souterraine ; B : Biomasse totale ; C : Carbone total ; CO2 : Dioxyde de carbone ; UV : Unité de végétation ; SB : Savanes boisées ; SA : Savanes arborées ; Sa : Savanes arbustives ; m : moyenne ; σ : écart type

L'analyse du tableau 3 révèle globalement que la forte production de la biomasse a été enregistrée dans les savanes boisées et arborées de la RBTW. Le potentiel de séquestration de carbone de ces deux unités fait respectivement 1,81 et 1,24 fois celui enregistré en moyenne dans la RBTW. Les savanes arbustives et les friches sont les unités qui piègent le moins de dioxyde de carbone soit 18 % et 2 % du total de CO_2.

3.3 Distribution spatiale de la biomasse

La figure 4 montre la distribution de la biomasse dans la RBTW.

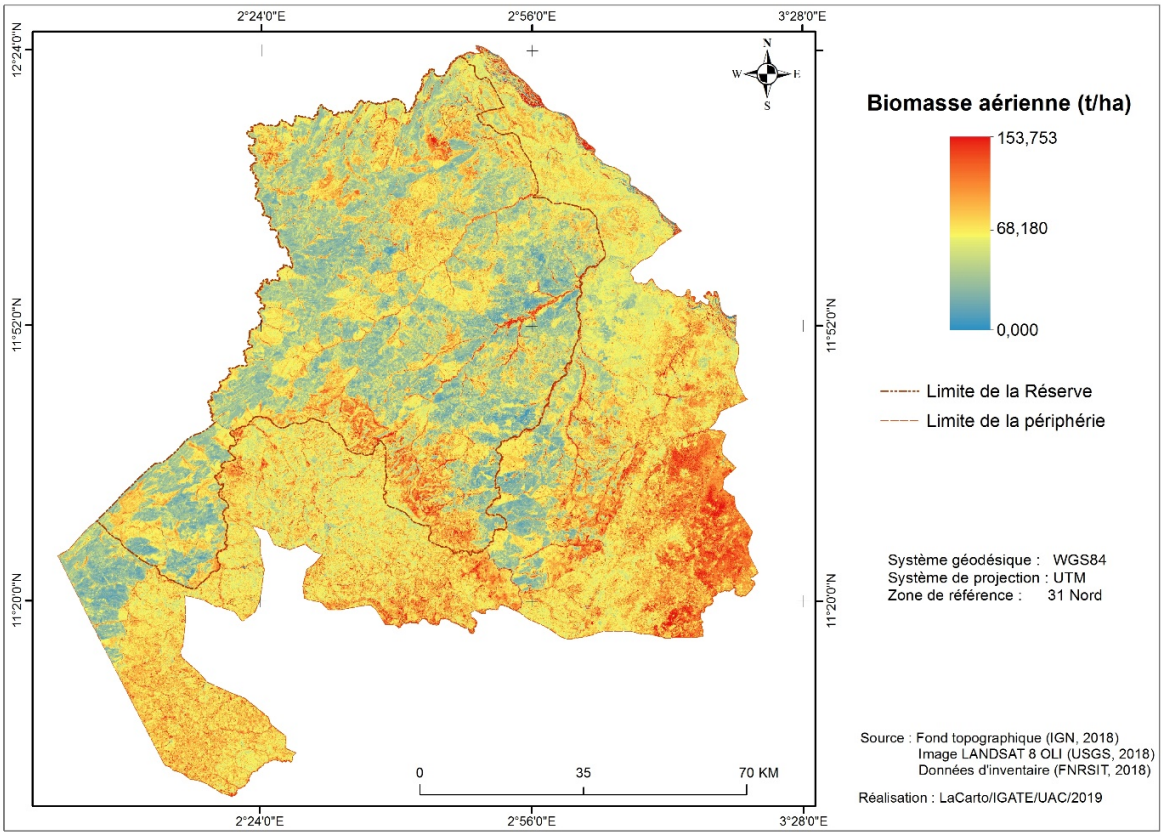

Figure 4 : Distribution de la biomasse aérienne dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W

L'examen de la figure 4 révèle que la biomasse varie de 0 à 153,753 t/ha dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W. Les plus fortes valeurs de biomasse sont observées au Sud-Est et accessoirement au centre et au nord de la RBTW. Par contre, les faibles valeurs de biomasse sont enregistrées dans la partie Est et au centre de RBTW. La distribution spatiale de la biomasse est en relation avec les unités de végétation. En effet, les fortes valeurs de biomasse sont enregistrées dans les savanes boisées et arborées.

3.3.1 Distribution spatiale du carbone

La figure5 présente la distribution spatiale du carbone aérien dans la RBTW.

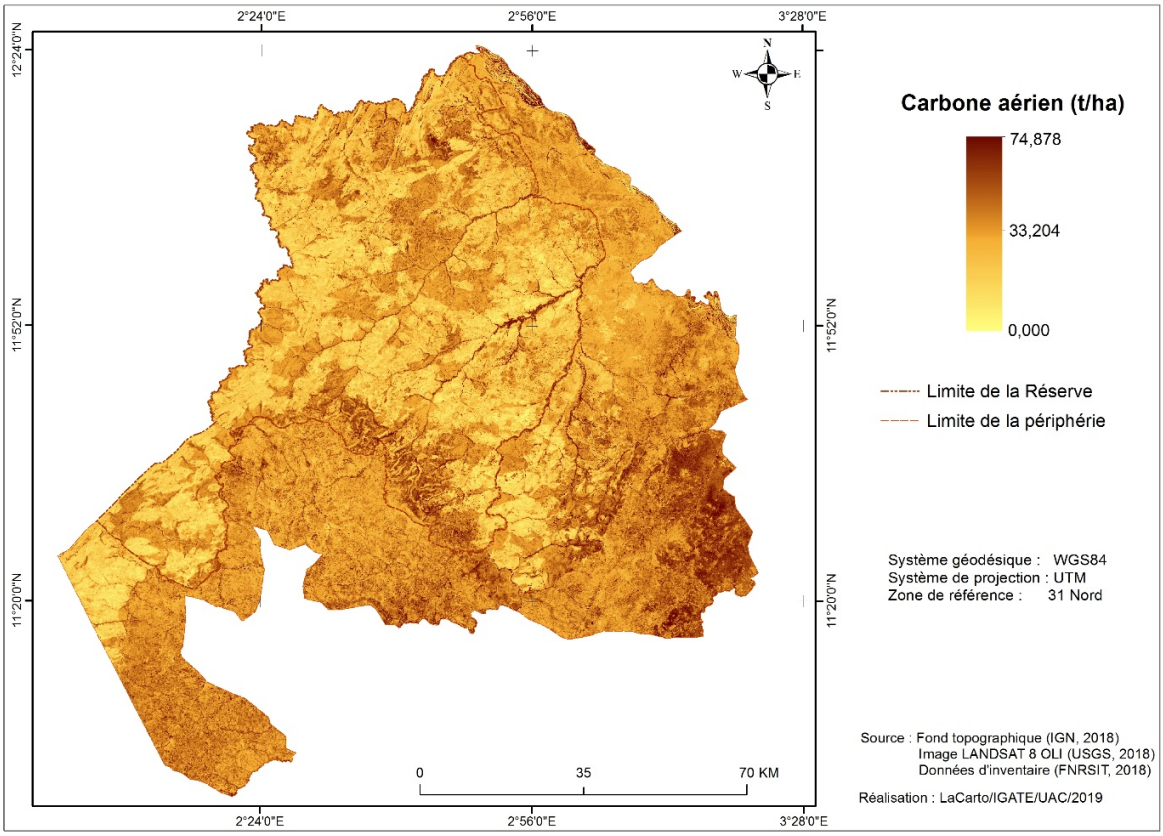

Figure 5 : Distribution spatiale du carbone aérien dans la Réserve de la Biosphère Transfrontalière du W

L'examen de la figure 5 montre une variation importante de carbone entre le Parc W (*BA : 17,88 – 131,48 t/ha et CA : 8,71 – 64,03 t/ha*) et sa périphérie (*BA : 0 – 153,75 t/ha et CA : 0 – 74,88 t/ha*). Les quantités moyennes de carbone observées pour les deux sous-secteurs sont de 32,16 ± 2,97 t/ha pour le Parc W et 34,11 ± 2,97 t/ha pour la périphérie.

3.3.2 Distribution spatiale du carbone dans la Réserve de la Biosphère Transfrontalière du W à l'horizon 2055

La figure 6 illustre la distribution spatiale du carbone dans la Réserve de la Biosphère Transfrontalière du W à l'horizon 2055.

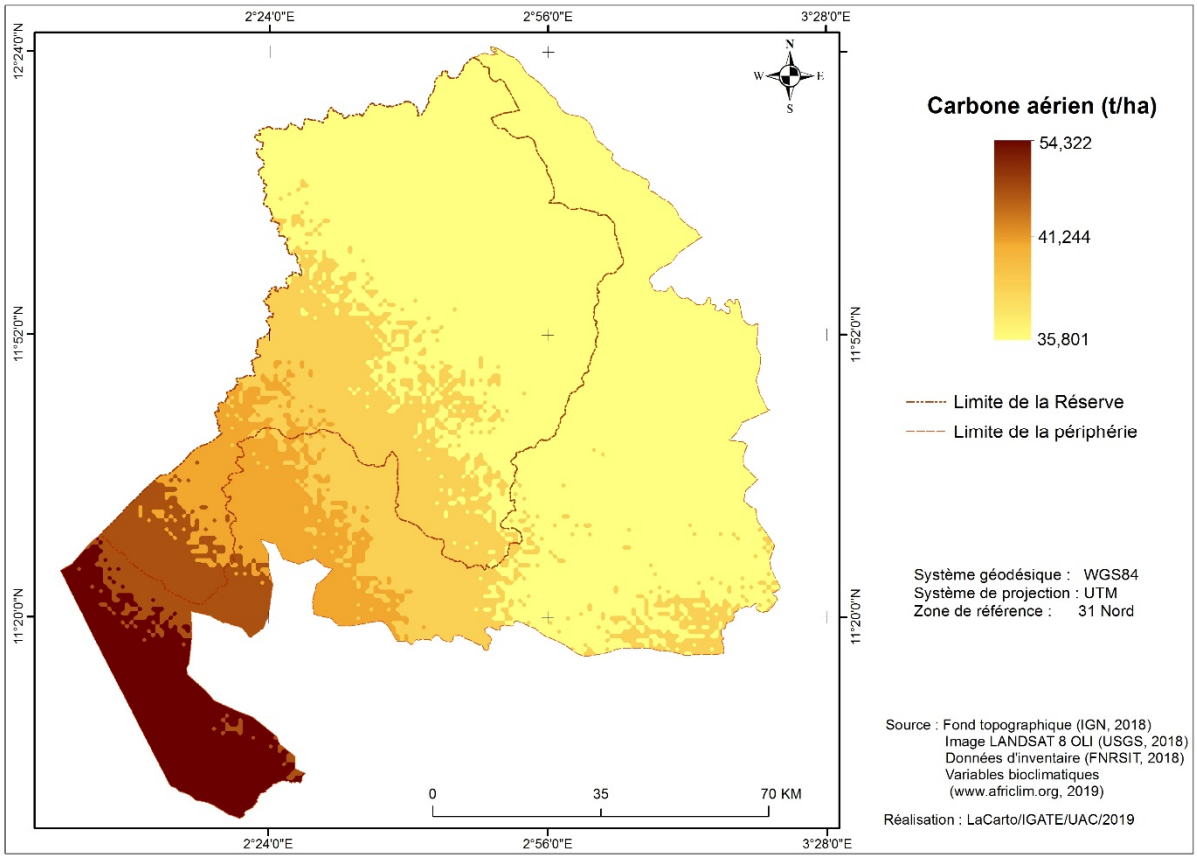

Figure 6 : Distribution spatiale du carbone dans la Réserve de la Biosphère Transfrontalière du W à l'horizon 2055

De l'analyse de la figure 6 il ressort que l'augmentation de la variation de la température d'un 1 °C contribuerait à une diminution du stock de carbone de 3,087 t/ha. Le stock de carbone évolue donc globalement en sens inverse du gradient de température. Cependant, la grande valeur de l'ordonnée à l'origine et le faible pouvoir explicatif révèlent que la saisonnalité de la température n'explique pas toute la variation du stock de carbone dans le secteur d'étude.

4. Discussion

4.1. Facteurs de la variabilité spatiale du pénitentiel de séquestration de carbone

La qualité de la cartographie de la biomasse dépend fortement des types de capteurs utilisés (Optique, RADAR ou LiDAR), de la résolution spatiale et/ou temporelle des données de ces capteurs (Zolkos et al., 2013), du plan d'échantillonnage des inventaires forestiers, des estimations de biomasse de terrain utilisées pour calibrer les données de télédétection (Mauya et al., 2015).

La biomasse totale produite dans les unités de végétation de la RBTW a été estimée à 39 988 935,73 tonnes contre 3 050 000 Mg·en Afrique de l'Ouest (Panzou et al, 2016). La quantité totale de carbone correspondante est de 19 474 611,70 tonnes. Concernant la quantité de dioxyde de carbone accumulée, elle a été évaluée à 71 471 824,94 tonnes. Par ailleurs, la quantité de biomasse estimée par placeau oscille entre 2,71 et 172,82 t/ha. La forte production de la biomasse a été enregistrée dans les savanes boisées et arborées de la RBTW. Le potentiel de séquestration de

carbone de ces deux unités fait respectivement 1,81 et 1,24 fois celui enregistré en moyenne dans la RBTW. Cette grande variation spatiale peut s'expliquer par plusieurs facteurs comme la biodiversité des essences forestières, le climat local, le substrat géologique et pédologique, mais aussi l'action des facteurs anthropiques comme la déforestation et la dégradation forestière, le relief, la structure forestière, la strate forestière (Chave et al., 2005 ; Molto, 2012 ; Ifo et al., 2015 ; Ifo et al., 2018 ; Ifo et al., 2019). Il a été également démontré que la méthodologie d'échantillonnage, et le type d'équation allométrique utilisé pourrait expliquer la variabilité du stock de carbone (Chave et al., 2004 ; Molto, 2012).

4.2. Performance du modèle de régression dans la prévision de la variable du stock de carbone

Le modèle de régression est utilisé pour la spatialisation de la biomasse et du carbone dans la RBTW. La quantité de carbone enregistrée varie de 35,80 à 54,32 t/ha avec une moyenne de 41,24 ± 4,08 t/ha. La quantité moyenne dans le Parc est de 40,42 ± 2,85 t/ha alors qu'elle est de 41,95 ± 4,78 t/ha pour la périphérie. Les résultats rejoignent ceux rapportés par Sabi Lolo Ilou (2020) dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W. Chen et al. (2016), Omuto et Vargas (2014) ont rapporté également une nette amélioration de l'estimation de la biomasse (ou carbone) avec l'utilisation des modèles à effets-mixtes (modèle à effet fixe : R^2 : 0,38 contre R^2 : 0,64 à 0,75 pour le modèle à effets-mixtes). Seul le modèle linéaire à effets mixtes présente, dans tous les cas, les erreurs de prédiction minimales. Ce qui prouve qu'il améliore davantage la prédiction du carbone que le modèle linéaire simple. L'incorporation des unités de végétation dans ce modèle comme variable aléatoire afin de prendre en compte les variations inter-unités expliquerait cet état de fait. Lors d'une étude de cartographie du carbone stocké dans la végétation pour la spatialisation d'un service écosystémique, Oszwald et al. (2013) ont affirmé que la qualité d'ajustement du modèle de régression linéaire mesurée par le R^2 est de 60 %. Le modèle de régression semble donc plus performant pour prévoir la variable « stock de carbone ». La distribution spatiale de la biomasse et du carbone montre que les fortes quantités de biomasse et de carbone sont enregistrées au sud et particulièrement au sud-est de la RBTW. L'hypothèse selon laquelle le stock de carbone varie selon les unités de végétation dans la RBTW est donc vérifiée.

Conclusion

Au terme de la présente recherche, on peut retenir que le potentiel de séquestration de carbone dans les savanes boisées et arborées est plus important que celui enregistré en moyenne dans la RBTW. Les savanes arbustives et les friches sont les unités qui piègent le moins de dioxyde de carbone. La distribution spatiale de la biomasse et du carbone montre que les fortes quantités sont enregistrées au sud et particulièrement au sud-est de la RBTW. Ces fortes valeurs de biomasse et de carbone sont obtenues dans les savanes boisées et arborées. Les savanes arbustives émettent près du double des principaux GES que les savanes arborées. Les friches ont les plus faibles capacités d'émission des GES dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W.

Les résultats obtenus suggèrent que les formations végétales les plus denses sont les meilleurs puits de carbone dans la RBTW. Ces formations végétales naturelles seraient les plus grandes émettrices si elles sont détruites. C'est pourquoi, la conservation des formations végétales est un défi important dans la RBTW.

Références bibliographiques

Chabi, A., Lautenbach, S., Orekan, V. O. A., & Kyei-Baffour, N. 2016. Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin. Carbon balance and management, 11(1), 1-18., doi : 10.1186/s13021-016-0058-5.

Chave J, Andalo, C, Brown S, Cairns M. A, Chambers J. Q, Eamus D, Folster H, Fromard F, Higuchi N, Kira T, Lescure J.P, Nelson B.W., Ogawa H, Puig H, Riéra B, Yamakura T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forest, Oecologia, 145: 87-99.

Chen, Q., Lu, D., Keller, M., Dos-Santos, M. N., Bolfe, E. L., Feng, Y., & Wang, C. 2016. Modeling and mapping agroforestry aboveground biomass in the Brazilian Amazon using airborne lidar data. Remote Sensing, 8(1), 21.

DGE/MEHU, 2011. Deuxième Communication Nationale de la République du Bénin sur les Changements Climatiques. DGE/MEHU, Cotonou, Bénin, 147 p.

GIEC, 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/french/pdf/wg1sum.pdf.

Goussanou, C. A., Guendehou, S., & Sinsin, B. 2017. Spatial and temporal variation of black cotton soil organic carbon in Guinean forest zone in West Africa. Tropical Ecology, 58(4), 823-832 https: //doi.org/: 10.1007/s11676-017-0411-x.

Guendehou G. H. S., Lehtonen A., 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 https//doi : 10.2989/20702620.2012.701432..

Gueulou, N., Douffi, K. G. C., Yeniloug0, S. O. R. O., Kone, M., & Bakayoko, A. 2020. Evaluation de la couverture forestière et du stock de carbone forestier de la réserve scientifique de Lamto (Côte d'Ivoire) [The forest cover and the forest carbon stock assessment of Lamto Scientific Reserve (Côte d'Ivoire)]. International Journal of Innovation and Applied Studies, 28(3), 682-689.

IFN, 2007. Exécution d'un Inventaire Forestier National (IFN) : Traitement et analyse des données LANDSAT 7 ETM +.Elaboration+. Elaboration de la carte forestière par V. O. A. OREKAN. Projet Bois De Feu - Phase II. Direction Des Forêts Et Des Ressources Naturelles, Bénin, 61p.

Ifo A.S, Koubouana F, Jourdain C, Nganga D., 2015. Stock and flow of carbon in plant woody debris in two different types of natural forests in bateke Plateau, Central Africa. Open Journal of Forestry. 5: 38-47.

Ifo S.A, Binsangou S, Ibocko Ngala L, Madingou M, Sanchez A.C, 2018. Seasonally flooded, and terra firme in northern Congo: Insights on their structure, diversity and biomass. African Journal of Ecology. Pp: 1-12. DOI: 10.1111/aje.12555.

Ifo, S. A., & Binsangou, S. (2019, March). Variabilité spatiale du stock de carbone de la biomasse aérienne de la zone urbaine vers la forêt tropicale dense dans cinq localités de la république du Congo. In Conférence OSFACO: Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique.

Le Clec'H, S., Oszwald, J., Jegou, N., Dufour, S., Cornillon, P. A., de Souza Miranda, I., ... & 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, 35-47.

Le Clec'H, S., Oszwald, J., Jegou, N., Dufour, S., Cornillon, P. A., de Souza Miranda, I., ... & 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, 35-47.

Mauya E.W. et al., 2015. Effects of field plot size on prediction accuracy of aboveground biomass in airborne laser scanning-assisted inventories in tropical rain forests of Tanzania. Carbon Balance Manage., 10(1), 10.

Molto Q., 2012. Estimation de biomasse en forêt tropicale humide : Propagation des incertitudes dans la modélisation de la distribution spatiale de la biomasse en Guyane française. Thèse Physiologie et biologie des organismes, populations interactions, Université des Antilles et de la Guyane, 184 p.

Omuto, C. T., & Vargas, R. R. (2015). Re-tooling of regression kriging in R for improved digital mapping of soil properties. Geosciences Journal, 19(1), 157-165., doi 10.1007/s12303-014-0023-9

Panzou G.L., Doucet J-L., Loumeto J-J., Biwole A., Bauwens S. & Fayolle A., 2016. « Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique) », BASE [En ligne], Volume 20 (2016), numéro 4, 508-522 URL : https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=13232.

Razafimahatratra, H., Razakamanarivo, H., Brossard, M., Albrecht, A., Grinand, C., Andriamananjara, A., ... & Razafimbelo, T. M. (2020). Spatialiser les stocks de carbone. Carbone des sols, 57.

Sabi Lolo Ilou B., 2020. Diversité, utilisation et valeurs économiques des services écosystémiques dans la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W au Nord-Bénin. Thèse de Doctorat, EDP-ECD/UAC, 201 p.

Silver, Ostertag, Lugo, 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. Restoration Ecology, 8 (4): 394-407.

Sogbossi E., 2018. Evaluation et spatialisation du stock de carbone des forêts communautaires au sud-est du Bénin (Afrique de l'Ouest). DEA, UAC, Bénin, 122 p.

Team, R. C. (2018.) : a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. http s. www. R-proje ct. org.

Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., ... & Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecological applications, 7(3), 737-750.

Zolkos S.G., Goetz S.J. & Dubayah R., 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. Remote Sens. Environ., 128, 289-298.

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) ».