



The 1st International Conference on Local Resource Exploitation

www.lorexp.org / info@lorexp.org
REF: LOREXP_2021_A1132 Pages: 186–198



Cartographie du stock de carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie *Mapping of the carbon stock in the classified forest of Wari-Marou and its periphery*

Ousséni Ibrahim Amadou^{1,*}, Ousséni Arouna^{1,2}, Yaya Issifou Moumouni² et Ismaël Mazo²

¹ Laboratoire de Géosciences, de l'Environnement et Applications, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (UNSTIM), Abomey, Bénin

² Laboratoire de Cartographie, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Abomey-Calavi, Bénin

* Auteur correspondant : ousseni059@gmail.com; (+229) 66 96 82 62

RÉSUMÉ :

La forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie est un espace géographique qui connaît de changements spatio-temporels importants sous l'effet de l'exploitation forestière et de la transhumance. Le stock de carbone constitue alors un indicateur pertinent pour apprécier l'état de santé de la végétation. L'objectif de cette recherche est de cartographier le stock de carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie. Pour y parvenir, les données d'inventaire forestier (relevées *in situ*) et les données de télédétection (image Landsat 8) ont été utilisées pour construire un modèle de prévision du stock de carbone ligneux. La régression linéaire simple a été utilisée pour tester la corrélation entre ces deux variables. Il ressort de l'inventaire que la forêt classée stocke en moyenne 39,10 t/ha contre 33,86 t/ha pour sa périphérie. Au sein des unités d'occupation, les galeries forestières viennent en tête avec une séquestration moyenne de 56,82 t/ha suivies des forêts denses sèches avec 53,94 t/ha ; des forêts claires et savanes boisées avec 39,29 t/ha ; des savanes arborées et arbustives avec 22,15 t/ha et des champs et jachères avec 10,22 t/ha. Cette approche de télédétection confirme la forte séquestration du carbone de la forêt classée (65,58 t/ha) comparativement à sa zone périphérique (55,40 t/ha). Pour cette méthode, les galeries forestières séquestrent en moyenne 107,14 t/ha ; les forêts denses sèches stockent 78,66 t/ha ; les forêts claires et savanes boisées stockent 61,00 t/ha ; les savanes arborées et arbustives stockent 38,40 t/ha et les champs et jachères 17,25 t/ha. La relation quantitative établie entre le NDVI et le carbone *in situ* révèle une très bonne corrélation avec un coefficient de détermination élevé $R^2 = 89\%$.

Mots clés : Stocks de carbone, Image Landsat 8, Inventaire forestier, Forêt classée, Wari-Marou.

ABSTRACT:

The classified forest of Wari-Marou and its periphery is a geographical area that undergoes significant spatio-temporal changes due to logging and transhumance. The carbon stock is therefore a relevant indicator for assessing the health of the vegetation. The objective of this research is to map the carbon stock in the classified forest of Wari-Marou and its periphery. To achieve this, forest inventory data (*in situ* surveys) and remote sensing data (Landsat 8 image) were used to build a forecast model for woody carbon stocks. Simple linear regression was used to test the correlation between these two variables. The inventory shows that the classified forest stocks an average of 39.10 t/ha against 33.86 t/ha for its peripheral. Within occupancy units, gallery forests come first with an average sequestration of 56.82 t/ha followed by dense dry forests with 53.94 t/ha; woodlands with 39.29 t/ha; wooded and shrub savannas with 22.15 t/ha and fields and fallows with 10.22 t/ha. This remote sensing approach confirms the strong carbon sequestration of the classified forest (65.58 t/ha) compared to its peripheral zone (55.40 t/ha). For this method, gallery forests sequester on average 107.14 t/ha; dense dry forests store 78.66 t/ha; woodlands store 61.00 t/ha; tree and shrub savannas store 38.40 t/ha and fields and fallow 17.25 t/ha. The quantitative relationship established between NDVI and *in situ* carbon reveals a very good correlation with a high coefficient of determination $R^2 = 89\%$.

Keywords: Carbon stocks, Landsat 8 images, Forest inventory, Classified forest, Wari-Marou.

1. INTRODUCTION

L'impact des activités humaines sur l'environnement a pris une ampleur inégalée depuis un peu plus d'un siècle entraînant des modifications significatives de la biosphère. D'ici 2050, un réchauffement global évalué à 2,5 °C environ et une modification sensible des paramètres climatiques sont attendus (IPCC, 2007). L'accroissement significatif des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, occasionné par les rejets industriels et la déforestation, serait en partie responsable de ce réchauffement global (Herzog, 2005). La déforestation résulte des actions de déboisement puis de défrichement, liées à l'extension des terres agricoles, à l'exploitation des ressources minières du sous-sol, à l'urbanisation, voire à l'exploitation excessive ou anarchique de certaines essences forestières (Issifou Moumouni, 2020).

Cependant, les forêts sont importantes dans le cycle global du carbone car elles stockent de grandes quantités de carbone dans la végétation et le sol. Elles échangent du carbone avec l'atmosphère par la photosynthèse et la respiration et elles sont des puits de carbone atmosphérique (absorption nette de CO₂ de l'atmosphère) quand elles sont bien conservées et bien gérées (Issifou Moumouni, 2020). Toutefois, de nombreuses informations manquent pour préciser l'ampleur des changements provoqués et leur impact réel sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Les interactions entre la biosphère terrestre et l'atmosphère sont nombreuses et la quantification des principaux cycles biogéochimiques reste un défi à relever.

Ce processus de séquestration est de mieux en mieux appréhendé, comme en témoigne la multiplication des dispositifs internationaux (REDD, REDD+) visant à protéger les espaces considérés comme des puits de carbone, notamment les régions forestières et les aires protégées. De fait, la question du stock de carbone dans la végétation est souvent traitée dans les études scientifiques (Brown, 1997). Les représentations cartographiques associées, bien que plus rares, se multiplient également, d'autant que des dispositifs internationaux tels que les mécanismes REDD (Reducing Emission from Deforestation and forest Degradation) en préconisent le développement.

Prenant appui sur les principes d'approche de la télédétection, la présente recherche s'inscrit dans la droite ligne des initiatives visant la cartographie du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers des aires protégées du Bénin. En effet, des efforts importants ont été faits au niveau régional pour améliorer les bases de données sur les stocks de carbone en intégrant à la fois des méthodes indirectes (télédétection) que directes par des mesures *in situ* (Mbow, 2009 ; Kaire et al., 2013 ; Vroh et al., 2014). Cependant, ces données demeurent encore peu représentatives par rapport à la grande variabilité de la biomasse forestière en zone tropicale. Il est alors opportun de connaître les flux du carbone à travers la végétation dans le contexte actuel des changements climatiques.

L'objectif de cette recherche est de cartographier le stock de carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Situation géographique du milieu

Le cadre géographique de cette recherche est la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie. La considération de la périphérie permet de prendre en compte les effets de bordure. En effet, les activités

socio-économiques et les autres formes de pressions enregistrées dans la périphérie peuvent influencer l'état des formations forestières à l'intérieur des aires protégées. Le cadre géographique de recherche constitué de la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie fait une superficie de 161 382 ha. Il est à cheval sur les Communes de Bassila et de Tchaourou, respectivement dans les Départements de la Donga et du Borgou au Bénin. Géographiquement, elle se trouve entre 8°50' et 9°10' de latitude Nord et 1°55' et 2°25' de longitude Est. Elle est limitée au nord par la route nationale n°6 portion Bétérou-Oubérou au sud par la rivière Odola faisant corps avec la forêt classée des Monts Kouffé, à l'est par la route Bétérou-Alafiarou-Koda et à l'ouest par la piste Igbère- Wari-Marou-Oubérou (figure 1).

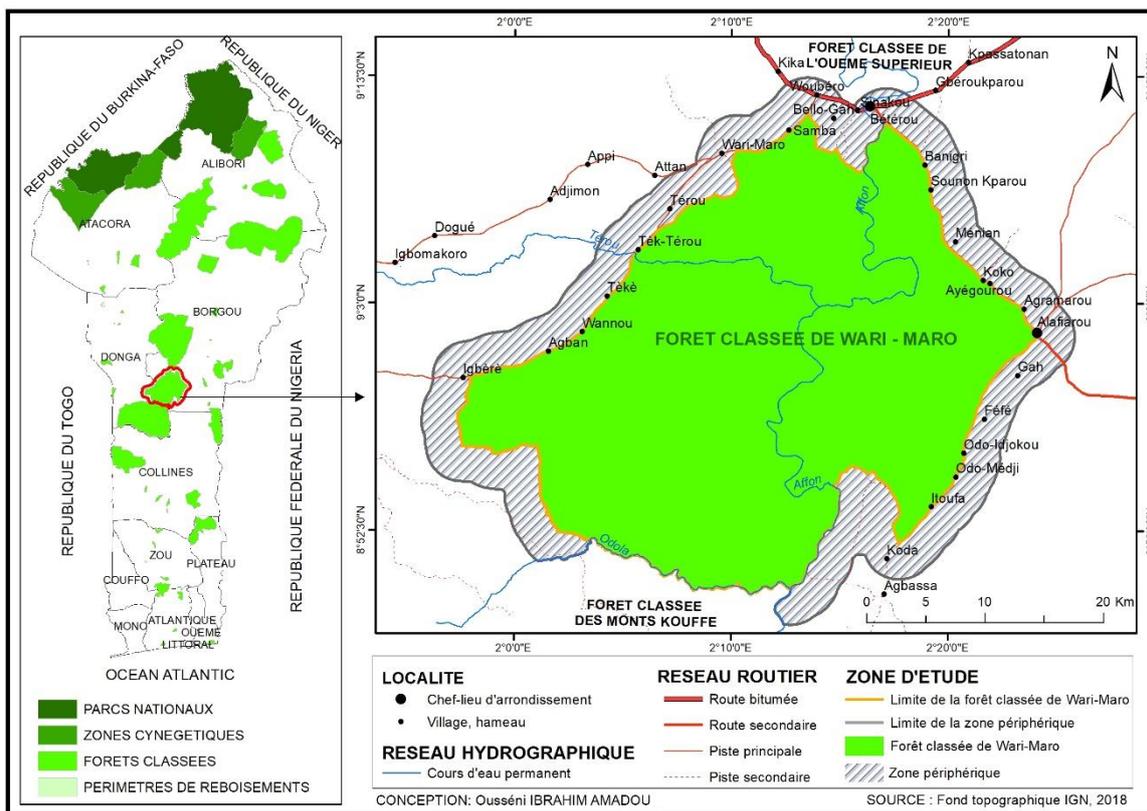


Figure 1 : Situation géographique de la forêt classée de Wari-Marou (FCWM) et sa périphérie.

2.2. Caractéristiques climatiques

Le milieu de recherche jouit d'un climat tropical de type soudanien résultant de sa situation par rapport à l'équateur et les grands courants régionaux. Il est caractérisé par deux saisons : une saison sèche (novembre à mars) et une saison pluvieuse (avril à octobre). La pluviosité moyenne annuelle au cours de la période 1985-2015 est de 1150 mm et l'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle oscille autour de 1500 mm. Ces données jouent un rôle prédominant dans l'évolution des formations végétales. La température moyenne annuelle au cours de la même la période est de 27 °C. En milieu tropical, la température est importante pour la végétation puisqu'elle agit sur la respiration et la photosynthèse de la plante (Arouna, 2017). Les caractéristiques climatiques du milieu sont favorables au développement du couvert forestier.

2.3. Données utilisées

Deux jeux de données ont été utilisés :

- des relevées *in situ* (inventaire forestier) qui constituent la variable à expliquer ;
- l'image satellitaire Landsat 8 OLI-TIRS acquise le 28 décembre 2020 de format Geotiff d'une résolution de 30 m × 30 m obtenue sur le site internet de EarthExplorer-USGS.GOV/USA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

2.4. Matériel de collecte des données

Le matériel utilisé est constitué de :

- ✓ un récepteur GPS GARMIN de marque ETREX 30 pour localiser les placeaux d'inventaire;
- ✓ un ruban pi pour mesurer le DBH des arbres ;
- ✓ un clinomètre de marque SUUNTO pour mesurer les hauteurs des arbres. ;
- ✓ une carte d'occupation des terres de la zone d'étude qui renseigne sur les différents types de formations végétales;
- ✓ des fiches d'inventaire pour la consignation des données collectées sur les arbres.

2.5. Méthode de collecte des données

Dans la perspective de la cartographie du stock de carbone de la biomasse ligneuse, la méthode non destructive d'inventaire forestier a été adoptée et l'échantillonnage a été stratifié. Les placeaux ont été donc répartis de façon aléatoire au niveau de chaque formation végétale identifiée pendant la phase exploratoire et actualisée sur la carte de végétation. Elles ont une forme carrée de superficie 900 m² (30 m x 30 m) chacun, distant d'au moins 0,5 km les uns des autres. Elles ont été installées en tenant compte de l'accessibilité aux différents sites, du temps et des moyens disponibles pendant la période de collecte des données sur le terrain. Au total, 62 placeaux ont été inventoriés dont 42 placeaux dans la FCWM et 20 placeaux dans la zone périphérique lors de travaux de terrain (figure 2).

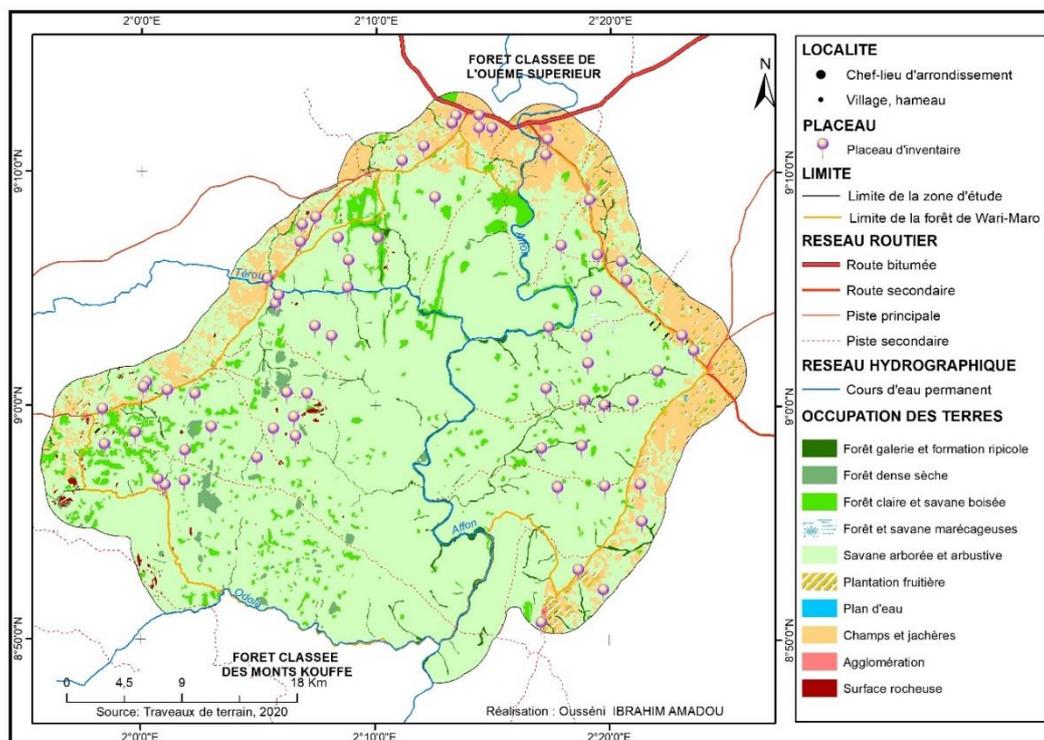


Figure 2 : Répartition du nombre de placeaux par unité de végétation dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie.

Au niveau de chaque placeau de 900 m², différentes mesures ainsi que des prélèvements ont été effectués. Dans chaque placeau, tous les arbres dont le DBH est supérieur ou égal à 10 cm ont été systématiquement inventoriés et leurs DBH mesurés.

2.6. Méthode de traitement des données d'inventaire

La mesure de la biomasse aérienne ligneuse sur le terrain a été effectuée selon la méthode non destructive en se basant sur des modèles reliant les caractéristiques de l'arbre à sa biomasse appelés modèles allométriques (Issifou Moumouni, et al., 2017). Dans cette recherche, l'équation allométrique de Nakou et al. (2014) a été utilisée pour estimer la biomasse aérienne ligneuse. C'est un modèle des savanes soudano-guinéennes du Bénin. Ce modèle a pour formule :

$$Ba(t/ha) = 1,3087 \times 10^{-4} \times D^{2,4949} \times \rho^{1,1804} \quad (1)$$

Avec : AIC = 101,8 ; RSE = 0,258.

Ba = Biomasse aérienne ligneuse en tonne (t); D = Diamètre de l'arbre en cm à 1,3 m, ρ = densité spécifique en g.m⁻³ ; AIC = critère théorique de l'information minimale ; RES = erreur standard résiduelle.

Cette équation dépend explicitement de la densité spécifique du bois. Les densités spécifiques moyennes ont été obtenues grâce aux bases de données de Global wood density database, les bases de données du WAC (2010) et celle de Zanne et al. (2009). La densité spécifique est de manière générale mieux connue pour les arbres exploitables par les compagnies forestières. Pour les espèces dont les valeurs de la densité spécifique (ρ) ne sont pas disponibles, il a été choisi une valeur par défaut de la densité spécifique moyenne (ρ) = 0,58 t.cm⁻³ pour les forêts tropicales d'Afrique, comme le recommandent Reyes et al. (1992) et utilisé par Vroh et al. (2014) et Issifou Moumouni (2020).

Le stock de carbone a été obtenu en multipliant la biomasse par le facteur de conversion (F.C). De nombreuses études ont montré que la teneur en carbone du bois varie entre 0,47 et 0,51 mais par convention on utilise 0,5. Le facteur de conversion utilisé dans la présente recherche est 0,5 en conformité avec les recommandations de GIEC (2003). Ainsi, on a :

$$C = AGB \times 0,5 \quad (2)$$

Où C = Carbone en t/ha, AGB = Biomasse aérienne en t/ha.

2.7. Méthode de calcul des Indices de Végétation

Les indices de végétation sont les premières sources d'information pour un suivi opérationnel de la couverture du sol. Ils correspondent à des mesures radiométriques sur la variabilité spatiale et temporelle de l'activité photosynthétique de la végétation, laquelle est reliée à des variables biophysiques de la couverture du sol et plus particulièrement de la couverture végétale. Ces indices permettent de mesurer la vigueur de la végétation et sont plus sensibles à la détection de la biomasse que les bandes spectrales prises individuellement. Chaque indice spectral possède un potentiel discriminatoire qui permet de l'utiliser dans

des situations variées, mais il n'existe pas encore d'indice universel pouvant s'adapter à tous les types de végétation et à toutes les conditions écologiques.

Dans cette recherche, l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) a été privilégié. Ce choix tient du fait qu'il peut être calculé à partir de données issues de tout satellite captant les réponses spectrales dans le visible et le proche infrarouge, de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal fondée sur la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse (Layelmam, 2013). Il a pour formule:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR}-\text{R}}{\text{PIR}+\text{R}} \quad (3)$$

PIR = réflectance dans la bande proche infrarouge du spectre électromagnétique ; R = réflectance dans la bande rouge du spectre électromagnétique.

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1. Les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme les surfaces rocheuses, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 ; les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

2.8. Méthode de cartographie du stock de carbone

La démarche mise en œuvre consiste à construire un modèle en croisant des données NDVI et les stocks de carbone (*in situ*). Le but étant d'utiliser ce modèle pour prédire les quantités de carbone stockées à partir des seules données de télédétection. Les valeurs prédites sont alors utilisées dans un SIG afin d'obtenir une cartographie de la zone d'étude (Issifou Moumouni et al., 2017).

La première étape de ce processus a été d'extraire pour chacune des placettes, la valeur du NDVI. Ces valeurs ont ensuite été ajoutées à la base de données des placettes. La seconde étape a été de retirer de la base de données, les placettes qui n'étaient pas représentatives des peuplements dans lesquels elles étaient situées ou bien une mauvaise appréciation du type de formation à laquelle elles appartiennent. Cette démarche a été choisie car elle permettait d'éliminer les placettes les plus hétérogènes tout en conservant un nombre suffisant pour le reste de l'analyse. Après cette phase de filtrage, 70 % des placettes d'inventaire ont été sélectionnés pour la suite des analyses.

2.8.1. Prédiction spatiale du stock de carbone

Le modèle de régression linéaire a été utilisé pour tester la corrélation entre les stocks de carbone issue des mesures de terrain et les valeurs spectrales (NDVI) issues de l'image Landsat couvrant la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie. L'analyse de régression a été conduite pour les pixels correspondant à la position de chaque placette de la base de données ainsi que pour les valeurs obtenues pour les fenêtres de 3x3 pixels autour de la placette. La procédure d'analyse de régression par entrée a été utilisée, avec la masse

de carbone comme variable dépendante et les valeurs spectrales comme variables indépendantes. Une droite de régression est construite entre les valeurs du NDVI et les valeurs du stock de carbone *in situ*. Elle est de la forme :

$$C_p = (a \times NDVI + b) \times 0,5 \quad (4)$$

C_p : carbone prédit ; **a** : constance et **b** : pente.

L'application de cette équation de régression à l'image satellitaire a permis de générer la carte de carbone de la zone de recherche par catégorie d'occupation des terres (formations forestières, formations savaniques, formations anthropiques) pour une meilleure visualisation et pour les analyses plus complètes. Cette approche a le mérite d'être utilisée dans plusieurs études dans le cadre du suivi écologique des écosystèmes. Pour l'application de ce modèle, l'algorithme Map algebra de Spatial Analyst tools dans la boîte de dialogue ArcToolbox de ArcGIS 10.4 a été utilisé.

2.8.2. *Evaluation du modèle retenu*

L'évaluation d'un modèle consiste alors à démontrer statistiquement ou empiriquement le caractère raisonnable des valeurs estimées à partir d'une régression. Ainsi, pour évaluer un modèle il faut vérifier l'adéquation des équations utilisées, la précision de ses constantes d'ajustement, la précision de la prédiction afin de conclure si le modèle satisfait aux exigences de précision statistique. Les tests ainsi effectués permettent de mieux opérer le choix sur un modèle à partir de son coefficient de détermination R^2 . Le coefficient de détermination, aussi appelé coefficient de corrélation multiple, mesure la proportion de la variation de y expliquée par la variation de x (Scherrer, 1984). Il est de la forme :

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Si tous les points sont alignés, la dispersion expliquée par le modèle est égale à la dispersion totale et on a un modèle parfait avec un R^2 égal à 1. Ainsi, théoriquement, les meilleurs modèles sont ceux dont le R^2 est proche de l'unité.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. *Estimation de la biomasse et du stock de carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie*

Le tableau I synthétise la variation de la biomasse et du stock de carbone des formations végétales de la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie en 2020.

Tableau I : la variation de la biomasse et du stock de carbone aérien (t C/ha) dans les formations végétales de la forêt classée de Wari-Marô (moyenne ± erreur type).

Unité d'occupation des terres	FCWM		Périphérie	
	Ba(t/ha)	C(t/ha)	Ba(t/ha)	C(t/ha)
FG	128,48±114,19	64,24±57,09	108,95±41,72	49,40 ± 19,96
FDS	115,58±52,84	57,79±26,42	90,03±14,62	50,10 ± 12,22
FCSB	71,01±25,79	35,51±12,90	56,13±10,54	28,06±5,27
SASA	53,49±19,98	26,74±9,99	35,11±4,95	17,56±2,48
CJ	22,48±2,42	11,24±1,21	18,39±4,74	9,20±2,37

Source : Données de terrain 2020

Légende : t/ha : Tonne par hectare ; **Ba** : biomasse aérienne ; **Ca** : carbone aérienne ; **FGFR** : forêt galerie et formations ripicoles ; **FDS** : forêt dense sèche; **FCSB** : forêt claire et savane boisée ; **SASA** : savanes arborée et arbustive ; **CJ** : champ et jachère.

Dans la forêt classée de Wari-Marô et sa périphérie, on observe que la biomasse et le stock de carbone sont plus élevés dans les formations végétales fermées (forêts galeries, forêts dense sèches et forêts claires) que dans les formations ouvertes (savanes arbustives et arborées). La quantité de biomasse de la galerie forestière est estimée à 128,48 ± 114,19 t/ha contre 115,58 ± 52,84 pour les forêts denses sèches ; 71,01 ± 25,79 pour les forêts claires savanes boisées et 53,49 ± 19,98 t/ha pour les savanes arborées et arbustives dans la FCWM. De même, le stock de carbone dans les forêts galeries est estimé à 64,24 ± 57,09 t/ha contre 57,79 ± 26,42 ; 35,51 ± 12,90 et 26,74 ± 9,99 t/ha respectivement dans les forêts denses sèches, les forêts claires et savanes boisées et les savanes arborées et arbustives.

Dans la périphérie, les plus fortes valeurs de biomasse et de stock de carbone ont été obtenues dans les forêts denses sèches. Le stock de carbone dans cette unité est estimé à 50,10 ± 12,22 t/ha, contre 49,40 ± 19,96 t/ha et 28,06 ± 5,27 t/ha respectivement dans les forêts galeries et forêts claires et savanes boisées.

Quel que soit le type de formation végétale considéré, les valeurs de biomasse ligneuse et de stock de carbone sont plus élevées dans la FCWM comparativement à la zone périphérique. Globalement, la FCWM a un stock de carbone plus élevé que celui de la zone périphérique. Cela est dû à l'impact de la pression anthropique sur la capacité de production de biomasse et de stockage de carbone de ces formations végétales dans la zone périphérique.

3.1.2. Indice Normalisé de Végétation (NDVI)

La figure 3 présente l'indice normalisé de végétation issu de l'image satellitaire Landsat OLI-TIRS de 2020.

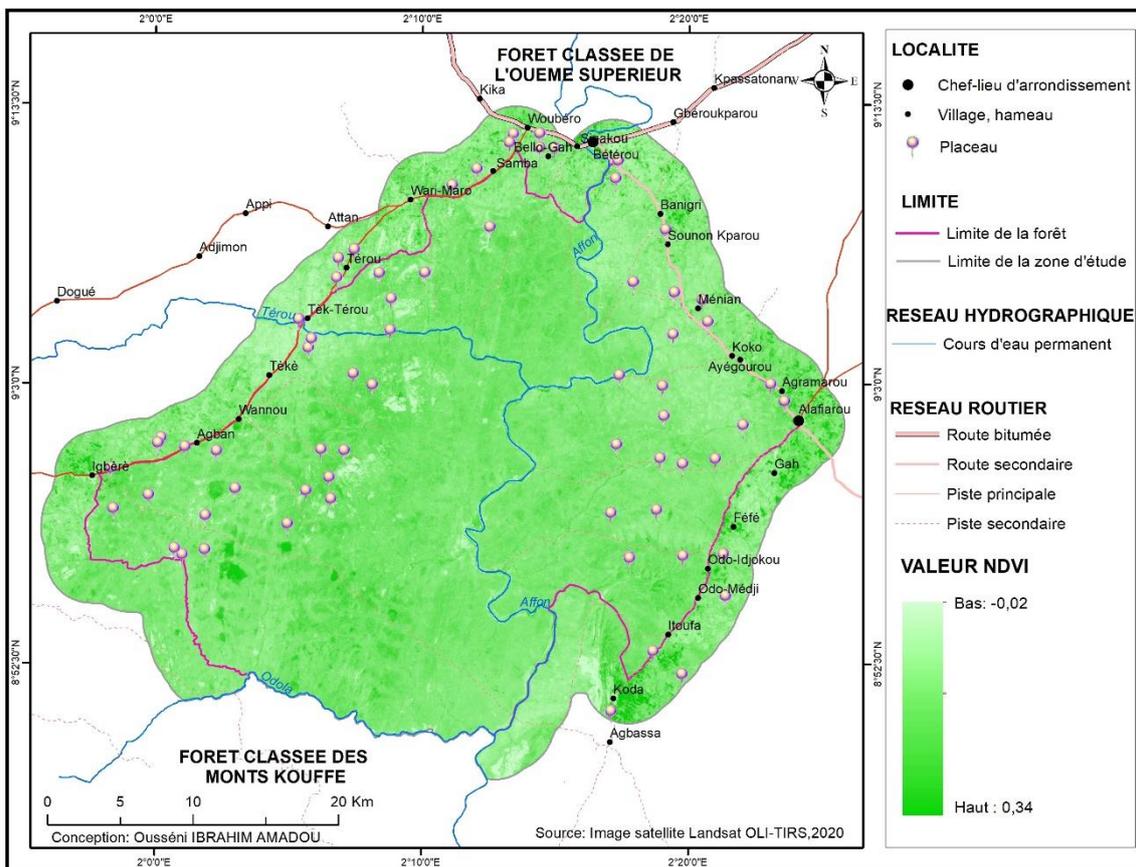


Figure 3 : Indice Normalisé de Végétation (NDVI) de la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie.

L’analyse de la figure 3 révèle que les zones à fortes valeurs de NDVI sont localisées dans la forêt classée sous forme d’îlots. Par contre, les zones à faible valeur de NDVI se trouvent dans la périphérie. Un regain de l’activité chlorophyllienne révélé par une valeur élevée du NDVI peut se traduire par une forte production de biomasse ou par une modification de la composition spécifique des formations végétales.

3.1.3. Établissement de la relation stock de carbone in situ-NDVI

Le coefficient de détermination (R^2) du modèle de prédiction du carbone en fonction du NDVI est de 0,89. Le test statistique de Fisher calculé ($F_c = 345,8$) a été lu au seuil $\alpha = 0,01$. Ce seuil est inférieur au seuil critique de 5 %. Donc, le modèle $C = 987,9 \times \text{NDVI} - 154,05$ est globalement significatif au seuil de 0,01. La figure 4 présente la relation quantitative entre les mesures de carbone séquestré et les valeurs du NDVI.

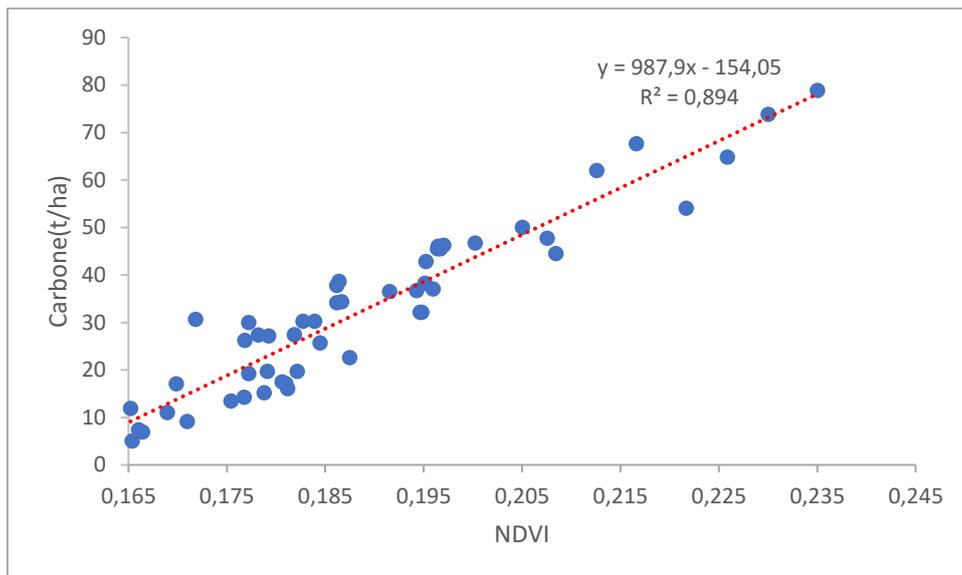


Figure 4. Représentation de la courbe de régression.

De l’examen de la figure 4, il ressort qu’il existe une relation entre les valeurs de carbone extraites à partir des 51 placettes d’échantillonnage et les valeurs de NDVI soit 70 % des placettes. Le coefficient de détermination du modèle utilisé indique que 89 % de la variation du carbone sont expliquées par la variation du NDVI.

3.1.4. Stocks de carbone en 2020

En appliquant l’équation (4) on obtient une couche qui représente la quantité de carbone séquestré sur toute la FCWM et sa périphérie (figure 5).

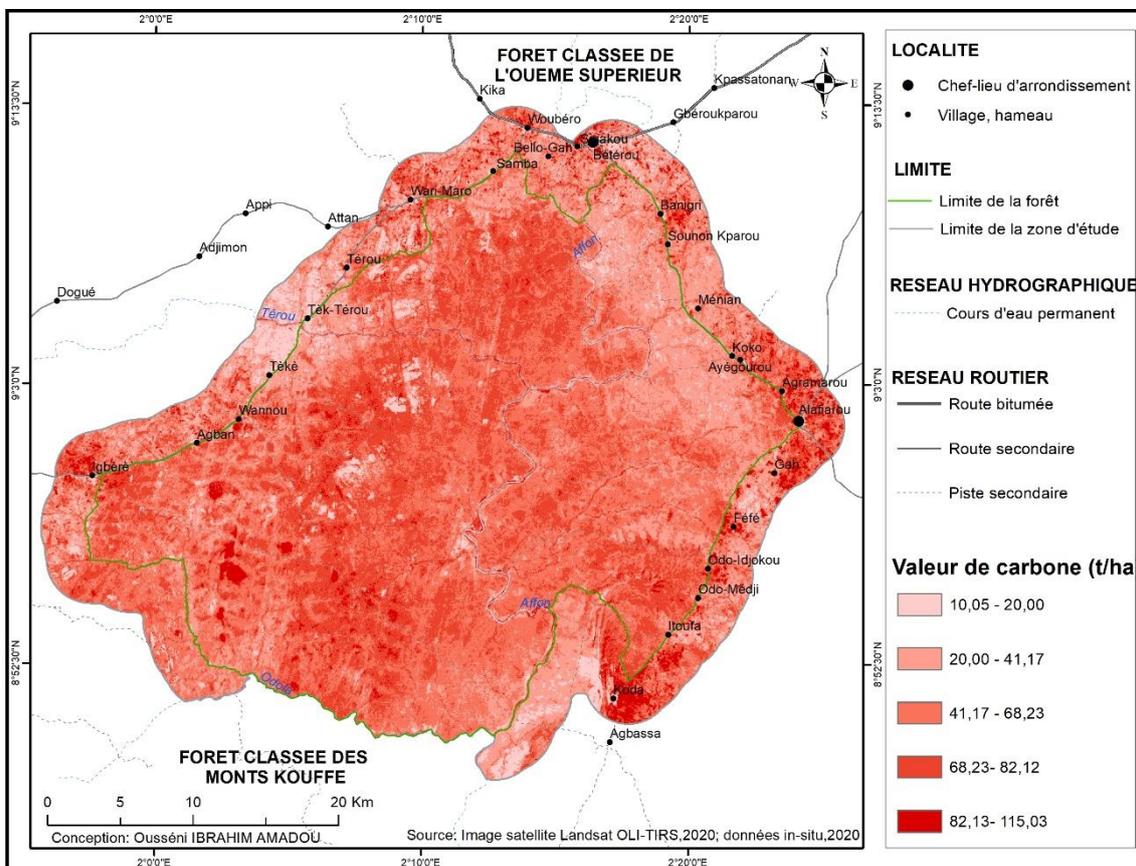


Figure 5 : Stock de carbone de la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie.

L'examen de la figure 5 montre une variation de la valeur du carbone en fonction de la zone et des types de formations végétales. Globalement la forêt classée séquestre plus de carbone que la zone périphérique. Ainsi, dans la forêt classée la concentration du carbone est estimée en moyenne à 115,97 t/ha pour les galeries forestières ; à 82,12 t/ha pour les forêts denses ; à 68,2 t/ha pour les forêts claires et savanes boisées ; à 41,7 t/ha pour les savanes arborées et arbustives et à 19,9 t/ha pour les champs et jachères. Dans la zone périphérique ces valeurs sont de 98,3 t/ha, 75,2 t/ha, 53,8 t/ha, 35,1 t/ha et 14,6 t/ha respectivement pour les galeries forestières, les forêts denses, les forêts claires et savanes boisées, les savanes arborées et arbustives et les champs et jachères selon la prédiction faite au moyen des données de télédétection.

L'estimation de la variation du stock de carbone avec les données de télédétection confirme la tendance observée avec les données de terrain.

3.2. Discussion

La cartographie du stock de carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie a été réalisée à travers l'utilisation des données d'inventaire forestier (relevés *in situ*) et les données de télédétection (image Landsat 8). La plupart des approches utilisant l'occupation du sol spatialisée par télédétection (Ponce-Hernandez, 2007; Hapsari, 2010) et les inventaires forestiers (Fukuda et al., 2003) appliquent des équations allométriques fondées sur la mesure des arbres, notamment la fermeture de la canopée (Nelson et al., 1998 ; Wauters et al., 2017). La prédominance de l'occupation du sol comme donnée d'entrée s'explique par plusieurs facteurs. De plus, cette donnée est facile à acquérir par les outils satellitaires. Les différents traitements et analyses ont permis de constater qu'avec l'approche par télédétection, les galeries forestières séquestrent en moyenne 107,14 t/ha ; les forêts denses sèches stockent 78,66 t/ha ; les forêts claires et savanes boisées stockent 61,00 t/ha ; les savanes arborées et arbustives stockent 38,40 t/ha et les champs et jachères 17,25 t/ha. Les résultats obtenus par Issifou Moumouni et al. (2018) avec l'approche par télédétection, confirment la supériorité en termes de séquestration du carbone des formations forestières (forêts denses, galeries forestières) sur les formations ouvertes (savanes boisées, savanes arborées et arbustives) et les formations anthropisées mais ces résultats diffèrent, en termes de valeurs de stock de carbone. En effet, dans les forêts denses sèches, les forêts galeries, les forêts claires et savanes boisées, le stock de carbone varie de 45,12 à 81,97 t/ha ; il varie de 8,28 à 45,12 t/ha dans les savanes arborées et arbustives et ce stock de carbone est de 0,56 t/ha dans les formations anthropiques d'après les travaux de Issifou Moumouni et al. (2017) réalisés dans la même forêt classée. Cette différence est probablement due à l'équation allométrique utilisée pour calculer la biomasse, au NDVI issu de l'image satellite utilisée et aussi aux conditions climatiques et écologiques.

4. CONCLUSION

La présente recherche qui a pour objectif de cartographier la séquestration du carbone dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie a été faite à travers le modèle de régression linéaire utilisée pour tester la corrélation entre les stocks de carbone issus des mesures de terrain et les valeurs spectrales (NDVI) issues des images Landsat 8. Les résultats issus des mesures de terrain indiquent une forte teneur en carbone des forêts galeries et des forêts denses sèches quoique faiblement représentatives en terme de superficie. C'est d'ailleurs ce qui fait de l'ensemble des formations forestières le meilleur réservoir de stockage de carbone

dans la forêt classée de Wari-Marou et sa périphérie. La carte de carbone produite à partir du modèle de régression linéaire présente des valeurs de stockage de carbone à travers les unités d'occupation des terres de l'ensemble de la forêt classée de Wari-Marou et de sa périphérie. La carte a permis de distinguer de fortes quantités de carbone dans les zones les plus boisées surtout dans la forêt classée et des quantités beaucoup plus faibles au niveau du front de déforestation notamment en périphérie. La prédiction de la variation du stock de carbone avec les données de télédétection a confirmé les résultats obtenus à partir de l'inventaire forestier. Ces résultats peuvent être utilisés pour élaborer la stratégie de suivi de la dynamique du stock de carbone dans le contexte REDD+.

5. DÉCLARATION DE CONFLITS D'INTÉRÊTS

Il n'y a pas de conflits d'intérêts connus associés à cette publication.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arouna O., 2017. Changements de l'occupation des terres et nécessité de l'aménagement du territoire à l'échelle locale en Afrique (Cas de la Commune de Djidja au Bénin), L'Harmattan, Paris, France, 222p.
- Bocko Y. E., Ifo S. A., Loumeto J. J., 2017. Quantification Des Stocks De Carbone De Trois Pools Clés De Carbone En Afrique Centrale : Cas De La Forêt Marécageuse De La Likouala (Nord Congo). *European Scientific Journal*, **13**(5), 438–456.
- Brown S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. FAO Forestry Paper: vii, 55p.
- Fukuda M., Iehara T., Matsumoto M., 2003. Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management*, **184**(1–3), 1–16.
- GIEC, 2003. Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie, IGES, Kanagawa.
- Hapsari A., 2010. Assessing and mapping ecosystem services in Offinso District, Ghana. Mémoire de master, ITC, Enschede, Pays-Bas, 94p.
- Herzog, T., 2005. World Greenhouse Gas Emissions in 2005. WRI Working Paper. World Resources Institute, 5p. Available online at <http://www.wri.org/publication/navigating-the-numbers>.
- IPCC, 2007. Bilan des changements climatiques : Rapport de synthèse. ISBN 978-92-9990047-4-6.
- Issifou Moumouni Yaya, 2020. Evaluation de la Déforestation et de la Dégradation du couvert végétal et estimation des Gaz à Effet de Serre correspondants dans le Bassin moyen de la Sota au Nord-Bénin, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi (EDP/ECD/UAC), 243p.
- Issifou Moumouni, Y., 2016. Dynamique du couvert forestier et évaluation des stocks de carbone dans la Forêt Classée de Wari-Marou au Bénin. Mémoire de DEA en Géosciences de l'Environnement et Gestion de l'Espace EDP/FLASH/UAC.
- Issifou Moumouni. Y., Toko I. I., Arouna O., Zakari Soufouyane., 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 « DTD »*, **17**, 38–56.

- Kaire M., Ouegraogo J.S., Sarr B. and Belem, M. 2013. Guide de mesure et de suivi de carbone dans les systèmes sol-végétation des formations forestières et agroforestières de l’Afrique de l’Ouest. AMCC, 45p.
- Layelmam M., 2015. Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. [Rapport de recherche] IAV; CRTS; CRASTE-LF. <hal-00915461>, 37p.
- Mbow C., 2009. Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Thèse de Doctorat d’Etat en Sciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 350p.
- Nelson W. B., Mesquita R., Pereira L.G., DE Souza S.G.A., Batista G.T., Couto L.B., 1998. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, **117**, 149–167.
- Vroh B.T. A., Tiebre M. S., et N’Guessan K. E., 2014. Diversité végétale urbaine et estimation du stock de carbone : cas de la commune du Plateau Abidjan, Côte d’Ivoire. *Afrique Science*, **10**(3), 329–340.
- Wauters J.B., Coudert S., Grallien E., Jonard M., Ponette M., 2007. Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil), *Forest Ecology and Management*, **255**, 2347–2361.
- Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S., Lewis S.L., Miller R.B., Swenson N.G., Wiemann M.C., Chave J. 2009. *Global wood density database*. Dryad. Identifier. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.