

## Estimation de la biomasse aérienne du genre *Rhizophora* des mangroves des rivières Lowé et Igoumié à Owendo (Gabon)

**Titre courant :** Estimation de la biomasse du genre *Rhizophora*

**Igor AKENDENGUE AKEN<sup>1</sup>, Marjolaine OKANGA-GUAY<sup>2</sup>, Emmanuel ONDO ASSOUMOU<sup>1</sup>, Jean Bernard MOMBO<sup>1</sup>**

### Résumé

L'évaluation du stock de carbone des écosystèmes est une des principales recommandations de la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques en 1994. Le choix d'une méthode fiable, sans biais d'estimation, est une préoccupation des études scientifiques. Les équations allométriques représentent une méthode précise de quantification du carbone. Cependant, elles peuvent varier suivant les espèces et/ou les écosystèmes. Cette étude a évalué la précision d'estimation du carbone de deux équations allométriques, pour trois espèces du genre *Rhizophora* des mangroves des rivières Lowé et Igoumié dans la commune d'Owendo, au Sud de Libreville (Gabon). Une collecte de données (diamètre à hauteur de poitrine et hauteur à la cime) a été effectuée sur 2020 m<sup>2</sup> de mangroves. La régression, sur les variables biomasse aérienne (AGB) et diamètre à hauteur de poitrine (DBH), a permis de tester deux modèles : l'un linéaire ( $AGB = 0,017*DBH - 0,083 + 0,045$ ), et l'autre, non-linéaire ( $AGB = 0,0001073*DBH^{2,71}$ ). Sur la base des valeurs du coefficient de détermination, du critère d'information d'Akaike (AIC) et de l'homoscédasticité des résidus, le modèle non linéaire est plus adéquat pour une bonne estimation de la biomasse aérienne des espèces du genre *Rhizophora* des mangroves étudiées. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 0,0014 et le biais est de -0,35%. Les mangroves échantillonnées ont une biomasse aérienne de 57,6416 Mg ha<sup>-1</sup>. Cela équivaut à un stock de carbone aérien de 28,821 Mg C ha<sup>-1</sup>, et représente un taux d'émission atmosphérique de 105,772 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>.

**Mots clés :** Mangrove, Biomasse aérienne, Stock de carbone (C), Equation allométrique, Gabon.

### Abstract

**TITLE :** Aboveground biomass estimation of the genus *Rhizophora* in the mangroves of the Lowé and Igoumié rivers in Owendo (Gabon)

Ecosystem carbon stock assessment is one of the main recommendations of the United Nations Framework Convention on Climate Change in 1994. The choice of a reliable estimation method without bias is a concern in scientific studies. Allometric equations represent an accurate method of quantifying carbon. However, equations can vary between species and/or ecosystems. This study evaluated the accuracy of carbon estimation of two allometric equations for three species of the genus *Rhizophora* from the mangroves of the Lowé and Igoumié Rivers in the Owendo commune, south of Libreville (Gabon). Regression on the above ground biomass (AGB) and diameter at breast height (DBH) was run to test two models: a linear model ( $AGB = 0.017*DBH - 0.083 + 0.045$ ) and a non-linear one ( $AGB = 0.0001073*DBH^{2.71}$ ). Based on the coefficient of determination, Akaike information criterion (AIC) and homoscedasticity of the residus, the non-linear model has been proven more accurate for a good AGB estimation of the *Rhizophora* genus. Its root mean square error (RMSE) was 0.0014 and the bias was -0.35%. The mangroves have an aboveground biomass of 57.6416 Mg ha<sup>-1</sup>. This is equivalent to an above-ground carbon stock of 28.821 Mg C ha<sup>-1</sup>, and represents an atmospheric emission rate of 105.772 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>.

**Key words :** Mangroves, Above-ground biomass (AGB), Carbon (C) stock, Allometric equation, Gabon.

<sup>1</sup> Laboratoire de Géomatique, de Recherche Appliquée et de Conseil (LAGRAC). Département des Sciences Géographiques, Environnementales et Marines. Université Omar Bongo, B.P. 17043, Libreville, Gabon.

<sup>2</sup> Auteur correspondant. Contacts : Mail [m\\_okanga\\_guay@yahoo.fr](mailto:m_okanga_guay@yahoo.fr) ; Tél. (+241) 66630673 ; Adresse postale : LAGRAC,

BP. 17043, Campus Université Omar Bongo, Libreville, Gabon  
Autres auteurs :

Akendengue Aken : [2014aken@gmail.com](mailto:2014aken@gmail.com) ; Ondo Assoumou : [ondoassoumou@yahoo.fr](mailto:ondoassoumou@yahoo.fr) ;

Mombo : [jb.mombo@yahoo.fr](mailto:jb.mombo@yahoo.fr)

### 1. INTRODUCTION

L'une des principales mesures de la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques en 1994 est l'évaluation de la capacité de stockage du carbone des écosystèmes forestiers. Ainsi, chaque pays et région devrait mettre en place ses outils d'estimation du carbone dans les écosystèmes forestiers et en faire un suivi régulier (Picard *et al.*, 2012). Les pays comme les États-Unis, la Chine et le Canada sont très productifs en terme d'évaluation de la séquestration de carbone de ces écosystèmes (Huang *et al.*, 2020). Les estimations des stocks de carbone aux échelles nationales impliquent couramment des outils d'inventaires forestiers parfois combinés avec la télédétection, techniques employées

par exemples au Canada (Kurz et Apps, 2006), en Chine (Wei *et al.*, 2014), aux États-Unis (Fleming *et al.*, 2015 ; Ma *et al.*, 2021), en France (Dupouey *et al.*, 2010), en Norvège (Puliti *et al.*, 2020), en Tanzanie (Ene *et al.*, 2016), etc. Depuis son lancement en 2008, le programme UN-REDD (UN-REDD, 2016) incite les pays en développement à la création et l'application de tels outils. Ainsi, la République Démocratique du Congo, la République du Congo, le Paraguay, l'Équateur, l'Argentine ou le Cambodge ont lancé leur système national de surveillance des forêts (UN-REDD, 2021).

Parmi les écosystèmes forestiers, les mangroves ont les plus grandes capacités de séquestration de carbone (1023 Mg ha<sup>-1</sup> en moyenne) (Donato *et al.*, 2011). Cependant, la superficie

mondiale des mangroves a régressé, passant de 18,8 millions d'hectares à 15,2 millions hectares en 25 ans (FAO, 2005). Bien qu'elles ne représentent que 0,07% de la forêt tropicale (Giri et al., 2010), la destruction des mangroves émet entre 0,02 à 0,12 Pg de carbone par an (Donato et al., 2011).

Les mangroves de l'Afrique représentent 11 % de la superficie des mangroves du monde (UNEP-WCMC, 2007). Estimées à une superficie totale de 2500 km<sup>2</sup> (Lebigre, 1990), les mangroves gabonaises constituent environ 12,41 % des mangroves d'Afrique centrale. Elles sont composées de neuf espèces de plante avec six (6) espèces de mangroves pures (Tomlinson, 1986) ou strictes (FAO, 2005), parmi lesquelles trois du genre *Rhizophora* (*mangle*, *harrisonii* et *racemosa*) (Ondo Assoumou, 2006 ; Ajonina et al., 2014a), puis *Avicennia germinans* (Avicenniaceae), *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus* (Combretaceae). A ces dernières s'ajoutent les espèces dites accompagnatrices et occasionnelles, *Phoenix reclinata* (Palmaceae) assez répandue dans les écosystèmes mangroves du Gabon, la fougère dorée *Acrostichum aureum* (Pteridaceae), la graminée *Paspalum vaginatum* et les *Pandanus* (Pandaneaceae) (Ondo Assoumou, 2017). Les travaux antérieurs réalisés sur les mangroves du Gabon (Lebigre, 1983 et 1990 ; Ondo Assoumou, 2006 et 2017 ; Ajonina et al., 2014a) montrent que les *Rhizophora* sont les mieux représentés en termes de diversité spécifique et de couverture spatiale. Ils s'implantent aussi bien en zone frontale qu'au contact avec la terre ferme, et participent considérablement au stockage de la biomasse et du carbone.

Les mangroves de la province de l'Estuaire ont enregistré une perte de 53,87 km<sup>2</sup> de leur superficie en 14 ans (Okanga et al., 2019), soit un taux annuel de changement de - 0,36%. Les secteurs les plus affectés sont situés dans l'agglomération de Libreville, ou dans sa périphérie proche. Par exemple, les mangroves de la rivière Lowé ont perdu 23% de leur surface entre 2007 et 2021, soit un taux annuel de changement de -1,64% (Okanga-Guay et al., 2021). Leur potentiel en biomasse aérienne et en stockage de carbone aérien dans l'agglomération de Libreville n'est pas documenté.

En l'absence d'équation allométrique permettant d'estimer la biomasse aérienne dans les mangroves locales, le recours à d'autres équations générales ou spécifiques aux espèces est une pratique assez commune (Kauffman et al., 2012 ; Jachowski et al., 2013 ; Rovai et al., 2015 ; Chatting et al., 2020 ; etc.). Cependant, ces équations générales comportent malgré tout des inadéquations. En effet, l'utilisation d'équations non adaptées peut apporter des différences importantes d'estimation. Kauffman et al. (2012) relèvent l'exemple de l'estimation de la biomasse d'un *Brughiera* dans les mangroves de Yap (Micronésie) : pour un diamètre de 69 cm, les équations de Komiyama et al. (2008) et de Kauffman and Cole (2010) donnent respectivement des valeurs très disparates (7014 kg et de 2588 kg).

Pour estimer la biomasse des mangroves gabonaises, il est habituel de recourir aux équations allométriques générales calibrées pour d'autres mangroves dans le monde, par exemples celles de Fromard et al., 1998 ; Chave et al., 2005 ; Komiyama et al., 2005 ; ou autres. Ce type d'équation n'est toutefois spécifique qu'aux sites de collecte de données (Ajonina, 2008), avec des espèces qui peuvent différer, et est donc inapproprié pour prédire avec précision la biomasse des mangroves d'une autre localité. Idéalement, l'utilisation

d'une équation spécifique à l'espèce et à la région étudiée devrait être priorisée (Kauffman, 2012). En effet, les écosystèmes de mangroves sont très complexes et très différents, tant sur les plans diamétrique, de hauteur ou de diversité spécifique. En particulier, le caractère exceptionnel des mangroves gabonaises (Simard et al., 2019) requiert l'établissement d'équations allométriques locales pour l'amélioration de la précision des estimations des stocks de carbone aérien.

L'objectif principal de cette étude est d'estimer la biomasse aérienne (AGB) du genre *Rhizophora*, plus répandu dans la zone. Les objectifs spécifiques sont de (i) proposer une équation allométrique du genre (*Rhizophora*) pour une bonne estimation de la biomasse aérienne et de (ii) estimer le taux d'émission de dioxyde de carbone aérien des mangroves défrichées des rivières Lowé et Igoumié.

Les principales questions de recherche sont (i) quelle forme d'équation allométrique permet d'estimer de façon précise la biomasse aérienne des mangroves de Libreville et Owendo ? (ii) quelle est la capacité de stockage de la biomasse aérienne (AGB) des mangroves à *Rhizophora* des rivières Lowé et Igoumié? (iii) quel est le taux d'émission de dioxyde de carbone aérien des mangroves défrichées des rivières Lowé et Igoumié?

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 Milieu d'étude

Pour construire une équation allométrique des *Rhizophora spp* de la zone Libreville-Owendo, deux sites d'étude ont été échantillonnés : les mangroves des rivières Lowé et Igoumié. Lowé et Igoumié sont deux cours d'eau dont les rives sont occupées par des mangroves (Fig. 1) à la fois intactes (naturelles), anthropisées (fortement dégradées) et semi-naturelles.

La rivière Lowé est longue de 10 km et sert de limite naturelle entre les communes de Libreville au Nord et Owendo au Sud. Elle prend sa source dans le quartier Bizango, à l'Est de Libreville, et se jette dans l'estuaire du Komo, au pont Nomba. Sur le pourtour de la rivière Lowé, les mangroves couvrent une superficie de 162,62 ha. Les zones d'échantillonnage ont été choisies à l'intérieur des mangroves. La première placette, dénommée Jean Violas et dont le centroïde est situé à 0,3507°N, 9,4897°E, est composée à 96,23% de *Rhizophora racemosa* et à 3,77% de *Laguncularia racemosa* (données de terrain). La seconde placette, dénommée Mindoubé et située aux coordonnées 0,3627°N, 9,4928°E, est constituée à 100% de l'espèce *Rhizophora racemosa* (données de terrain).

La rivière Igoumié, longue de 8 km, sépare le premier et le deuxième arrondissements de la Commune d'Owendo. Elle prend sa source au quartier Igoumié et rejoint l'estuaire du Komo à l'Est du complexe portuaire d'Owendo, face à l'île Coniquet. Les mangroves de l'enclave Igoumié et Ikoy-Komo ont une superficie de 2025 ha. La placette 3, dénommée Alénakiri 1, est située à 0,3181°N, 9,5197°E. Elle compte 48,48% de *Rhizophora harrisonii*, 27,27% de *Rhizophora mangle* et 24,24% d'*Avicennia germinans* (données de terrain). La placette Alénakiri 2, localisée au point 0,32001°N, 9,5185°E, est formée à 89,22% de *Rhizophora harrisonii* et 10,78% d'*Avicennia germinans* (données de terrain).

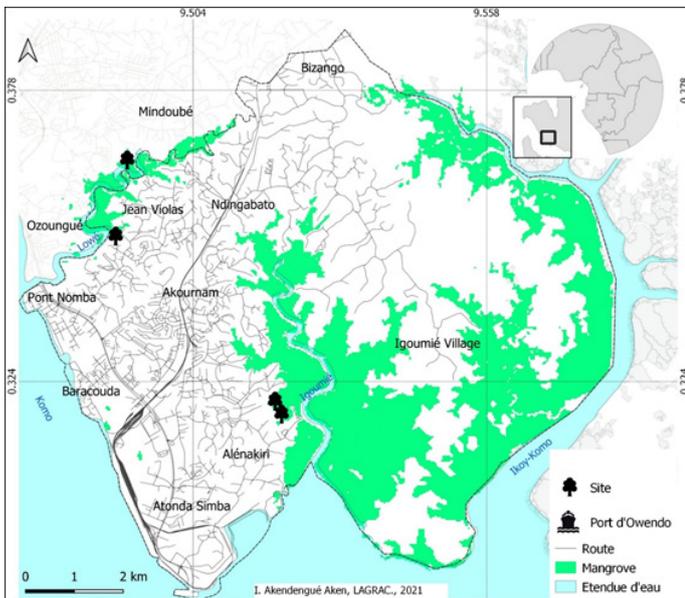
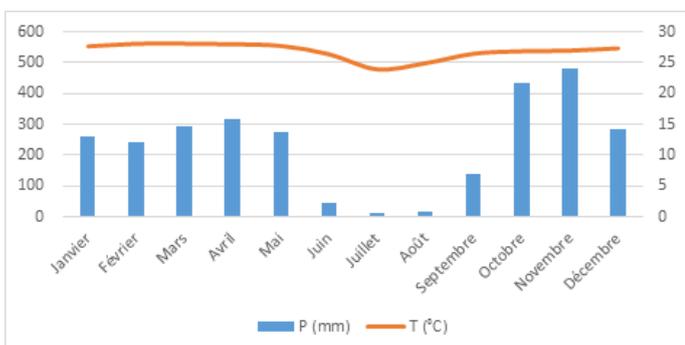


Figure 1 : Localisation des placettes (sites) dans les mangroves des rivières Lowé et Igoumié de la Commune d'Owendo

Le climat gabonais est très favorable à la présence des mangroves. La zone d'étude a un climat de type équatorial marqué par quatre saisons en alternance : deux saisons sèches et deux saisons de pluies. La saison sèche est courte, soit trois mois pour chaque période. Mais la plus marquée est celle située entre mi-juin et mi-septembre. Les précipitations moyennes annuelles de l'ensemble du pays varient entre 1400 mm et 3400 mm, avec 2870 mm d'eau à Libreville (Maloba Makanga, 2010). Ces précipitations de région équatoriale sont très orageuses. Le nombre de jours de pluie atteint facilement 170 à 200 par an. L'analyse fréquentielle des précipitations annuelles a montré au niveau de la station de Libreville des moyennes maximales atteignant 3 270 mm d'eau entre 1951 et 1990 (Maloba Makaga, 2010) et 3 345,5 mm en 2000 (Menié Ovono et al., 2017). Octobre et novembre constituent les mois plus arrosés avec 445,5 mm et 496 mm tandis que juillet et août sont moins arrosés avec une chute d'eau inférieure à 100 mm, de 1989 à 2018 (fig.2). Les températures annuelles varient en fonction des saisons. Ainsi, les températures plus faibles sont enregistrées en saison sèche (juillet-août) et plus élevées en saison des pluies (mars-avril), avec des moyennes minimales et maximales respectives à 23°C et 27°C (Maloba Makaga, 2004). Le taux d'humidité atmosphérique varie entre 79,3% en août et 96% novembre.



Source : Direction Générale de la météorologie (2017).  
Figure 2 : Diagramme climatique gabonais

La démographie est caractérisée par une forte concentration humaine autour des rivières Lowé et Igoumié, donnant une

densité de la population élevée à la commune d'Owendo (809,2 hab/km<sup>2</sup>) (Direction Générale de la Statistique, 2013). A l'Est de la zone d'étude, vers la rivière Ikoy-Komo, la situation démographique est complètement différente. L'occupation humaine est très faible avec la présence des villages peu peuplés et clairsemés dans la forêt encore intacte. En général, ces villages ont connu un exode rural massif. Les habitants préfèrent vivre en ville et ne se retournent dans les villages que pendant les week-end et les vacances.

## 2.2 Collecte de données

En vue de l'estimation de la biomasse aérienne selon les techniques de foresterie, la taille de l'échantillon, soit le nombre d'arbres cubés ou pesés, est déterminée par l'expérience et s'adapte au milieu, au temps, aux moyens matériels, humains et financiers (Picard et al., 2012). Ainsi, en tenant compte des difficultés d'accès aux mangroves, les équations allométriques sont généralement construites avec peu d'arbres et sur peu de sites. Pour exemples, Fromard et al. (1998) ont établi une équation avec 9 *Rhizophora* rencontrés dans 7 sites, Komiyama et al. (2005) avec 104 individus de 10 espèces sur 5 sites, et Chave et al. (2005) avec 84 individus d'espèces de mangroves non spécifiées sur 2 sites. Pour les mangroves du Bénin, Ajonina (2013) a créé l'équation du volume des *Avicennia germinans* et *Rhizophora racemosa* avec 233 individus.

L'établissement d'une équation allométrique pour l'espèce *Rhizophora spp* des rivières Lowé et Igoumié a été réalisé en mesurant 243 arbres dans 4 placettes sur 2 sites relativement homogènes. De ces quatre placettes, 3 sont de forme carrée et de 625 m<sup>2</sup> chacune. La quatrième est rectangulaire et de 145 m<sup>2</sup>. La superficie totale inventoriée est de 2020 m<sup>2</sup>. Deux placettes sont localisées le long de la rivière Lowé, et deux autres le long de la rivière Igoumié (Fig. 1). Dans chaque placette, le diamètre à hauteur de poitrine ou au-dessus la première racine (DBH) a été mesuré à l'aide d'un ruban mètre forestier ou d'un pied à coulisse. Un télémètre laser (*Forestry Pro*) a permis de calculer la hauteur à la cime de chaque arbre. Les espèces ont été identifiées et les paramètres mesurés sont consignés dans des fiches de collecte de données. Seuls les individus de genre *Rhizophora* ont été retenus. Le GPS (*Global Positioning System*) a permis de prendre toutes les coordonnées géographiques individuelles des arbres.

## 2.3 Analyse des données

### 2.3.1 Caractérisation structurale des écosystèmes de mangrove

Les données collectées ont été saisies dans le tableur *Excel*. A partir de ces données brutes, plusieurs paramètres ont été calculés, parmi lesquels : la surface terrière, le volume et la biomasse aérienne (AGB).

La surface terrière individuelle et le volume de chaque arbre ont été déterminés selon la méthode de Husch et al. (2003) appliquée dans les mangroves par Ajonina (2008) (équations 1 et 2) :

$$\text{Surface terrière } (g) = \pi \frac{d^2}{4} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Volume } (m^3) (V) = g \times h \times f \dots\dots\dots(2)$$

Où  $\pi = 3,14$  ;  $d$  = diamètre en mètre (m),  $g$  = surface terrière en m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>,  $h$  = hauteur en mètre (m) et  $f$  = facteur forme ( $f=0,6$  ; Ajonina et Usongo, 2001).

La biomasse aérienne individuelle (AGB) (Équation 3) a été obtenue par la formule standard de Husch et al. (2003).

$$\text{Biomasse (AGB)} = p \times V \times \text{BEF} \dots\dots\dots(3)$$

Où AGB = biomasse aérienne,  $p$  = densité moyenne du bois de mangrove (déterminée à 0,890 t/m<sup>3</sup>; Feamside, 1997), (Ajonina et al., 2014b) et BEF = facteur d'expansion de biomasse dans les mangroves (déterminé à 1,18; Ajonina, 2008).

2.3.2. Élaboration et évaluation d'équation allométrique

Les données et les paramètres, précédemment calculés, ont été exportés dans le logiciel R 4.3 pour établissement des modèles de régression linéaire. Un modèle à entrée unique utilisant le diamètre (DBH) a été préféré vu que le DBH est le paramètre le plus facile à mesurer dans des mangroves parfois hautes ou denses, comme c'est le cas dans certains des sites. Etant difficile à mesurer avec précision sans que l'arbre ne soit coupé, la hauteur n'est pas recommandée comme paramètre (Kauffman et al., 2012) dans l'établissement d'une équation allométrique.

Pour la mise en place de l'équation allométrique, une régression a été faite sur l'AGB en fonction du DBH.

La première étape, dite exploratoire, a consisté à tester le type de relation (non linéaire et linéaire) qui existe entre les variables. Cette phase a permis de détecter une relation favorable aux données de type:  $y = \alpha x^\beta$ . Néanmoins, la relation de type:  $y = \alpha x + \beta + \varepsilon$  a été également testée. Le modèle a été apprécié à partir des coefficients de détermination ( $r^2$  et  $r^2$  ajusté), et du critère d'information d'Akaike (AIC) intervenant dans le choix entre plusieurs modèles de même variable. Le meilleur modèle est généralement celui qui a le plus petit AIC.

La deuxième étape a consisté à établir le modèle, en déterminant les paramètres alpha ( $\alpha$ ) et béta ( $\beta$ ) sur un jeu de données de 146 individus tirés aléatoirement, soit 60% de la base de données de 243 individus (Tableau 1 ; équations 4 et 5).

Les diamètres sont répartis en 4 classes selon la classification d'Ajonina et al. (2008). Les données de modélisation se distribuent selon ces mêmes classes (Tableau 1) : 5% des individus dans la classe [1–2,5] cm de DBH, 23% dans la classe de [2,5–5], 32% dans la classe de [5–10] et 40% dans la classe de [10–30]. Les données de validation se répartissent respectivement selon ces mêmes classes à 8%, 34%, 47% et 8%.

Tableau 1 : Données échantillonnées par classes de diamètre et de hauteur ayant servi à la création du modèle et sa validation

Classes	Modélisation				Validation			
	DBH	%	Hauteur	%	DBH	%	Hauteur	%
[1 - 2,5]	8	5,48	12	8,22	8	8,25	12	12,37
[2,5 - 5]	33	22,60	32	21,92	34	35,05	44	45,36
[5 - 10]	47	32,19	43	29,45	47	48,45	39	40,21
[10 - 30]	58	39,73	59	40,41	8	8,25	2	2,06
<b>Somme</b>	<b>146</b>	<b>100</b>	<b>146</b>	<b>100</b>	<b>97</b>	<b>100</b>	<b>97</b>	<b>100</b>
			<b>60%</b>				<b>40%</b>	

Les données de hauteur se catégorisent selon ces mêmes classes ; mais, elles sont mesurées en mètres. Ainsi, pour les données de modélisation, 8% des individus échantillonnés relèvent de la classe [1–2,5], 22% de la classe [2,5–5], 29% de la classe [5–10] et 40% de la classes [10–30].

$$\alpha = \frac{\text{cov}(y; y')}{v(y)} = \frac{\bar{y}y' - \bar{y}\bar{y}'}{\bar{y}^2 - (\bar{y})^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$\beta = \bar{y}' - \alpha \cdot \bar{y} \dots\dots\dots(5)$$

Un modèle linéaire ajusté sur des données log-transformées engendre un biais dû à la transformation dont le facteur de correction est égal à  $\exp(\sigma^2/2)$ . De ce fait,  $\alpha$  devient:  $\alpha = \exp(a + \sigma^2/2)$  avec  $\beta$  inchangé (Parresol, 1999).

Enfin, le modèle a été validé avec un jeu indépendant de données

de 97 individus, soit 40% de la base globale de données n'ayant pas servi dans la mise en place du modèle. Cette validation s'est faite en comparant la biomasse prédite et la biomasse observée (Chave et al., 2005), en vérifiant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE ; équation 6), le biais (équation 7) et le biais en pourcentage (équation 8).

$$\text{RMSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n ((P_i - O_i)^2 / N) * 0,5 \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{biais (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / \text{absolue}(O_i) \dots\dots\dots(8)$$

Où RMSE = erreur quadratique moyenne, P = biomasse prédite, O = biomasse observée et N = le nombre d'observations. La RMSE est utilisée dans la mesure de dispersion des prédictions par rapport aux observations (Chave et al., 2005).

3. RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques structurales des mangroves étudiées

Le site d'Alénakiri 1 est composé des *Rhizophora harrisonii* et de *Rhizophora mangle*. Le DBH est compris entre 1,2 et 6,6 cm, avec une moyenne de 3,34 ± 0,339 cm (Tableau 2). La hauteur maximum est de 5,3 m contre un maximum de 1 m, soit une moyenne de 2,926 ± 0,356 m. La surface terrière varie entre 0,0001 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> et 0,0131 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, avec une moyenne de 0,0011 ± 0,0002 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Les moyennes des volumes et de la biomasse sont respectivement de 0,0034 ± 0,0008 m<sup>3</sup> et 0,0035 ± 0,0008 t.

Tableau 2 : Paramètres statistiques des mangroves échantillonnées à Alénakiri 1 à Igoumié

Statistiques	DBH (cm)	Hauteur (m)	g (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	AGB (kg)
Moyenne	3,34	2,926	0,0011	0,0034	3,5
Erreur-type	0,339	0,3560	0,0002	0,0008	0,8
Médiane	3,2	1,85	0,0008	0,0011	1,1
Mode	1,3	1,1	0,0001NA	NA	NA
Écart-type	1,6973	1,7801	0,0010	0,0039	4,1
Minimum	1,2	1	0,0001	0,0001	1
Maximum	6,6	5,3	0,0034	0,0131	13,8
<b>Somme</b>	<b>83,5</b>	<b>73,15</b>	<b>0,0273</b>	<b>0,0844</b>	<b>88,6</b>
N	25	25	25	25	25

DBH : diamètre à hauteur de poitrine ; g : surface terrière ; AGB : biomasse aérienne.

Le site d'Alénakiri 2 abrite essentiellement l'espèce *Rhizophora harrisonii* dont le DBH varie entre 1,5 et 15,6 cm avec une moyenne de 6,6753 ± 0,3840 cm (Tableau 3). La hauteur est comprise entre 1,85 et 8,7 m, avec une moyenne de 4,7294 ± 0,1980 m. La moyenne de la surface terrière est de 0,0043 ± 0,0005 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, avec un minimum et un maximum respectifs de 0,0002 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> et 0,0191 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Le volume, quant à lui, varie entre 0,0003 m<sup>3</sup> et 0,1100 m<sup>3</sup>, soit une moyenne de 0,0191 ± 0,0028 m<sup>3</sup>. La biomasse aérienne est comprise entre 0,0003 t et 0,1156 t, avec une moyenne de 0,0201 ± 0,0029 t.

Tableau 3: Paramètres statistiques des mangroves échantillonnées à Alénakiri 2 à Igoumié

Statistiques	DBH (cm)	Hauteur (m)	g (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	AGB (kg)
Moyenne	6,6753	4,7294	0,0043	0,0191	20,1
Erreur-type	0,3840	0,1980	0,0005	0,0028	2,9
Médiane	6,45	4,75	0,0033	0,0133	14
Mode	8,5	5,4	0,0057	0,0009	0,9
Écart-type	3,1668	1,6326	0,0039	0,0229	24,1
Minimum	1,5	1,85	0,0002	0,0003	3
Maximum	15,6	8,7	0,0191	0,1100	115,6
<b>Somme</b>	<b>453,92</b>	<b>321,6</b>	<b>0,2906</b>	<b>1,3020</b>	<b>1367,4</b>
N	68	68	68	68	68

DBH : diamètre à hauteur de poitrine ; g : surface terrière ; AGB : biomasse aérienne.

Les espèces de mangrove du site de Jean Violas, dans la zone de la rivière Lowé, ont un DBH moyen de  $8,6011 \pm 0,5548$  cm (Tableau 4). Le DBH varie entre 2,2 cm et 22 cm. La hauteur varie entre 2,3 m et 14,4 m, avec une moyenne de  $7,8034 \pm 0,4299$  m. La surface terrière moyenne est de  $0,0079 \pm 0,0010$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> avec un minimum et un maximum de  $0,0004$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> et  $0,0380$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Le volume moyen est de  $0,0656 \pm 0,0092$  m<sup>3</sup> avec un minimum et un maximum respectifs de  $0,0009$  m<sup>3</sup> et  $0,3295$  m<sup>3</sup>. La biomasse aérienne moyenne est de  $0,0689 \pm 0,0097$  t avec un minimum et un maximum respectifs de  $0,0009$  t et  $0,3461$  t.

Tableau 4: Paramètres statistiques des mangroves échantillonnées à Jean Violas à la Lowé

Statistiques	DBH (cm)	Hauteur (m)	g (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	AGB (kg)
Moyenne	8,6011	7,8034	0,0079	0,0656	68,9
Erreur-type	0,5548	0,4299	0,0010	0,0092	9,7
Médiane	7	7,2	0,0038	0,0212	22,3
Mode	4,2	6,1	0,0014	0,0068	7,1
Écart-type	5,1745	4,0095	0,0090	0,0858	90,2
Minimum	2,2	2,3	0,0004	0,0009	0,9
Maximum	22	14,4	0,0380	0,3295	346,1
<b>Somme</b>	<b>748,3</b>	<b>678,9</b>	<b>0,6860</b>	<b>5,7062</b>	<b>5992,7</b>
N	87	87	87	87	87

DBH : diamètre à hauteur de poitrine ; g : surface terrière ; AGB : biomasse aérienne.

Le site de Mindoubé a un DBH compris entre 2 cm et 26 cm, soit une moyenne de  $11,0016 \pm 0,8596$  cm (Tableau 5). La hauteur oscille entre 2 m et 18 m, avec une moyenne de  $11,2286 \pm 0,6349$  m. La surface terrière est comprise entre  $0,0003$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> et  $0,0531$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, soit une moyenne de  $0,0131 \pm 0,0018$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Le volume est compris entre  $0,0007$  m<sup>3</sup> et  $0,5004$  m<sup>3</sup>, avec une moyenne de  $0,1080 \pm 0,0175$  m<sup>3</sup>. L'AGB oscille entre  $0,0007$  t et  $0,5256$  t, soit une moyenne de  $0,1134 \pm 0,01783$  t.

Tableau 5 : Paramètres statistiques des mangroves échantillonnées à Mindoubé à la Lowé

Statistiques	DBH (cm)	Hauteur (m)	g (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	AGB (kg)
Moyenne	11,0016	10,2286	0,0131	0,1080	113,4
Erreur-type	0,8596	0,6349	0,0018	0,0175	18,3
Médiane	8,5	10	0,0057	0,0285	29,9
Mode	8,5	4	0,0057	0,0023	2,4
Écart-type	6,8227	5,0393	0,0143	0,1386	145,6
Minimum	2	2	0,0003	0,0007	0,7
Maximum	26	18	0,0531	0,5004	525,6
<b>Somme</b>	<b>693,1</b>	<b>644,4</b>	<b>0,8251</b>	<b>6,8027</b>	<b>7144,2</b>
N	63	63	63	63	63

DBH : diamètre à hauteur de poitrine ; g : surface terrière ; AGB : biomasse aérienne.

Pour toutes les placettes, le DBH moyen est de  $8,14 \pm 0,350$  cm, avec des minima et maxima de  $1,2$  cm et  $26$  cm (Tableau 6). La hauteur moyenne se situe à  $7,07 \pm 0,282$  m, avec des minima et maxima de  $1$  m et  $18$  m. Les moyennes de la surface terrière (g), du volume et de la biomasse aérienne (AGB) sont respectivement de  $0,00753 \pm 0,00612$  m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>,  $0,05718 \pm 0,00612$  m<sup>3</sup> et  $60 \pm 6,423$  kg. Le minimum de biomasse aérienne (AGB) est de  $0,091$  kg, contre un maximum de  $525,559$  kg.

Tableau 6 : Paramètres statistiques des mangroves échantillonnées des rivières Lowé et Igoumié

Statistiques	DBH (cm)	Hauteur (m)	g (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	AGB (kg)
Moyenne	8,143	7,070	0,00753	0,05718	60,053
Erreur-type	0,350	0,282	0,00064	0,00612	6,423
Médiane	6,5	5,7	0,00332	0,01452	15,248
Mode	6,5	4,8	0,00332	0,00231	2,424
Écart-type	5,449	4,402	0,01004	0,09534	100,129
Minimum	1,2	1	0,00011	0,00009	0,091
Maximum	26	18	0,05307	0,50044	525,559
<b>Somme</b>	<b>1978,82</b>	<b>1718,05</b>	<b>1,8291</b>	<b>13,895</b>	<b>14592,869</b>
n	243	243	243	243	243

DBH : diamètre à hauteur de poitrine ; g : surface terrière ; AGB : biomasse aérienne.

### 3.2 Stock de biomasse et de carbone aérien des mangroves de la Lowé et de l'enclave Igoumié et Ikoy Komo

La biomasse aérienne de la surface échantillonnée (2020 m<sup>2</sup>) est de  $14,593$  Mg, soit environ  $72,24$  Mg ha<sup>-1</sup>. Ainsi, le stock de carbone aérien est évalué à  $36,12$  Mg C ha<sup>-1</sup>.

Les mangroves de l'enclave Igoumié et Ikoy-Komo, d'une superficie de  $2025$  hectares, accumulent  $146218,97$  Mg de biomasse aérienne et  $73109,48$  Mg C de carbone. Les mangroves de Lowé, d'une superficie de  $162,36$  ha, ont une biomasse aérienne de  $11728,88$  Mg, soit un stock de carbone de  $5864,44$  Mg C.

La destruction d'un hectare de mangroves rejeterait au minimum  $132,56$  Mg CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, pour la partie aérienne seulement.

### 3.3 Comparaison des modèles linéaire et non-linéaire de la biomasse aérienne

Après analyse de la base de données des mangroves échantillonnées, les modèles produits sont  $AGB = 0,017*DBH - 0,083 + 0,045$  pour le linéaire, et  $AGB = 0,0001073*DBH^{2,71}$  pour le non-linéaire (Tableau 7).

Tableau 7 : Paramètres d'appréciation des modèles testés

Modèles	$\alpha$	$\beta$	r <sup>2</sup>	AIC	p-value
$y = \alpha x + \beta$	0,017	-0,083	0,85	-452,23	< 2,2e-16
$y = \alpha x^\beta$	0,0001073	2,71	0,96	155	< 2,2e-16

Avec un coefficient de détermination (r<sup>2</sup>) de  $96\%$ , le type non-linéaire a une meilleure prédiction de la biomasse aérienne (AGB) des mangroves des rivières Lowé et Igoumié, que le modèle linéaire à  $85\%$ . Toutefois, malgré un critère d'information d'Akaike (AIC) plus élevé, le modèle non-linéaire présente une homoscedasticité favorable de la distribution des résidus (Fig. 3). En effet, la variance de l'erreur résiduelle du modèle linéaire n'est pas constante, ce qui impacte sur l'intervalle de confiance du modèle (Picard et al., 2012). De facto, le modèle non-linéaire, qui a la plus forte variance expliquée et remplit l'hypothèse d'homoscedasticité, est adéquat pour prédire la biomasse des *Rhizophora* dans les rivières Lowé et Igoumié.

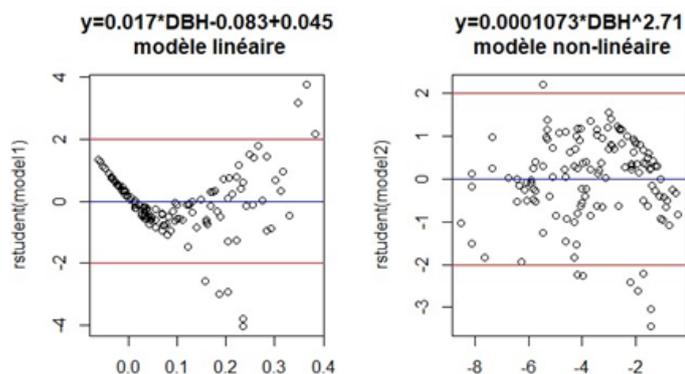


Figure 3 : Distribution des résidus des modèles testés

### 3.4 Validation du modèle non-linéaire

En comparant la biomasse aérienne observée et la biomasse aérienne estimée, il ressort une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,0014 et un biais de -0,0056, soit -0,35% de biais (Tableau 8). Ainsi, le modèle non-linéaire  $y = 0,000107 * DBH^{2,71}$  prédit correctement la biomasse aérienne des mangroves de la zone d'étude.

Tableau 8 : Paramètres du modèle retenu

Modèle	$\alpha$	$\beta$	rmse	biais	biais %
$y = \alpha x^\beta$	0,000107	2,71	0,0014	-0,0056	-0,35

Le croisement de la biomasse observée et du DBH de la base de données de validation confirme une relation non-linéaire entre ces deux variables (Fig. 4a). Aussi, la projection de la biomasse aérienne estimée et de la biomasse aérienne observée montre-t-elle un nuage de points superposé à la droite de régression (Fig. 4b).

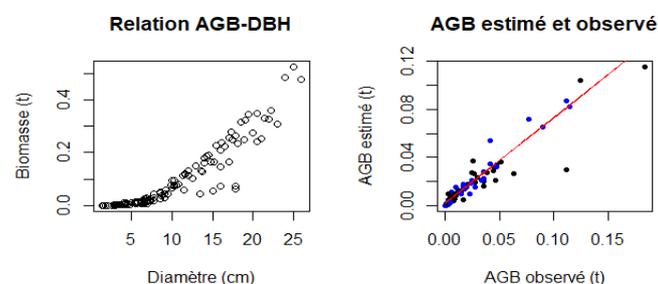


Figure 4 : Type de relation AGB-DBH et projection de l'AGB estimée et observée.

## 4. DISCUSSION

Les mangroves échantillonnées présentent des caractéristiques structurales assez communes avec des hauteurs variant de 1 à 18m, qualifiées de petites à moyennes par Lebigre (1983, 1990). Replacés dans le contexte national, les *Rhizophora spp* n'atteignent pas les hauteurs maximales enregistrées au Gabon par Ajonina et al. (2014a) avec 41m ou Simard (2019) avec 62,8m. Par contre, avec un diamètre moyen de 8,1cm, les mangroves de Lowé et Igoumié entrent dans le registre des diamètres moyens de la sous-région (Cameroun, Gabon, République du Congo, République Démocratique du Congo) (Ajonina et al., 2014a). La structure chez *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii* et *Rhizophora mangle* (racine échasse, tronc et houppier) est caractéristique de ces espèces, et est la même d'un site à un autre (Lebigre, 1990 ; Ondo Assoumou, 2006).

Cette structuration, relative au diamètre et à la hauteur des

arbres, influence nécessairement la comptabilisation de la biomasse aérienne. En effet, quoique le stock moyen de biomasse aérienne au Gabon soit estimé à 341 Mg ha<sup>-1</sup> par Ajonina et al. (2014a), les mangroves des rivières Lowé et Igoumié ont plutôt révélé un stock moyen de 72,24 Mg ha<sup>-1</sup>. Cette valeur ne représente donc que 21,18% de la biomasse aérienne moyenne à l'hectare des mangroves du Gabon. L'écart est tout aussi grand avec la biomasse aérienne des mangroves du Congo (évaluée à 251 Mg ha<sup>-1</sup>), de la République Démocratique du Congo (409 Mg ha<sup>-1</sup>) ou du Cameroun (505 Mg ha<sup>-1</sup>) (Ajonina et al., 2014a).

Lors de la construction d'une équation allométrique pour l'estimation de la biomasse aérienne, la détermination des variables à prendre en compte et l'amplitude des valeurs de DBH et de hauteur sont des éléments déterminants (Chave et al., 2005). En outre, l'utilisation d'une même densité de bois (ici déterminé à  $p=0,890$  ; Feamside, 1997) pour deux espèces de genre identique sur des sites différents est admise, contrairement à des espèces de genres différents sur des sites similaires (Clough et Scott, 1989 ; Komiyama et al., 2005). L'utilisation ici de cette densité de bois moyen n'a pas de grande influence sur les résultats comparables aux prédictions avec l'équation d'Ajonina et al. (2014b).

L'équation développée ici, avec le DBH comme seule variable explicative, présente un coefficient de détermination de Pearson élevé avec  $r^2 = 0,96$ . Les prédictions du modèle pourraient être légèrement améliorées en éliminant toute erreur de mesure sur le terrain ou par l'intégration d'une seconde variable, telle que la hauteur des arbres. Ce taux de détermination démontre que le DBH est un indicateur fort de la biomasse aérienne chez les *Rhizophora*, fait corroboré par Ajonina (2008) et Ajonina et al. (2014a).

Le modèle a été réalisé à partir d'un DBH<sub>min</sub> de 1 cm et d'un DBH<sub>max</sub> de 26 cm. En principe, une équation n'est valable que dans son intervalle DBH et dans son étendue spatiale de calibration et de validation initiale (Rykiel, 1996 ; Picard et al., 2012). L'extrapolation au-delà de leur gamme de DBH de calibration peut induire à des erreurs d'estimation de biomasse liées à la variabilité des grands arbres et des sites (Brown et Lugo, 1984). Toutefois, le présent modèle établi est de type puissance ( $y = \alpha x^\beta$ ). Les modèles sous cette forme ont l'avantage d'être extrapolable avec une bonne fiabilité, en dehors de leur intervalle de DBH et de leur espace géographique de calibration et de validation d'origine. En effet, les modèles de ce type obéissent au principe allométrique fractal (Zianis et Mencuccini, 2004). Tout comme le modèle d'Ajonina et al. (2014a), où les diamètres échantillonnés variaient entre 1 cm et 102,08 cm, l'équation ici obtenue pour les mangroves de la Lowé et d'Igoumié est invariante à toutes les échelles spatiales et structurales. De prime abord, elle peut servir à prédire la biomasse des mangroves genre *Rhizophora*, aussi bien estuarienne, deltaïque que lagunaire.

Confrontées, les biomasses aériennes prédites par le modèle établi pour les mangroves de la Lowé et d'Igoumié et celles du modèle d'Ajonina et al. (2014a) sont similaires. En effet, l'erreur est infime avec un RMSE de 0,0009 et un biais de 0,0007, soit 0,08 % de biais entre les prédictions des deux modèles. Bien que leur intervalle d'application ne soit pas la même, soit 1cm <D<102,8 cm pour Ajonina et al. (2014) et 1 cm <D<26 cm pour le présent modèle, la différence entre les deux prédictions est très faible et leurs distributions se

superposent quasiment. Dans un jeu de données de  $n = 97$ , l'intervalle de prédiction du modèle établi est compris entre  $[0,0197 \text{ Mg} - 0,0253 \text{ Mg}]$  avec une moyenne de  $0,0221 \text{ Mg} \pm 0,0032$ . L'intervalle du modèle d'Ajonina et al. (2014a) est compris entre  $[0,0181 \text{ Mg} - 0,0245 \text{ Mg}]$ , avec une moyenne de  $0,0213 \pm 0,0032 \text{ Mg}$ . L'écart de moyenne entre les deux prédictions est de  $0,0008 \text{ Mg}$ . L'écart autour de la moyenne est  $0,0313 \text{ Mg}$  pour le modèle Lowé-Igoumié, et  $0,0312 \text{ Mg}$  pour le modèle Ajonina et al. (2014a) ; soit une différence de  $0,0001$  entre ces deux prédictions des modèles respectifs.

## 5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir une équation allométrique non-linéaire de type puissance invariante à toutes échelles spatiales puisqu'elle repose sur un principe allométrique fractal. L'équation a un coefficient de détermination égale à 96% pour un biais de  $-0,0056$ , soit  $0,35 \%$ . Les mangroves du genre *Rhizophora* (*mangle*, *harrisonii* et *racemosa*) de la Lowé et d'Igoumié ont une biomasse aérienne de  $14,593 \text{ Mg}$  pour  $2020 \text{ m}^2$ , ce qui représente  $57,6416 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Le stock de carbone aérien est de  $28,821 \text{ Mg C ha}^{-1}$  et représente un taux d'émission atmosphérique de  $105,772 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ . Il est nécessaire que des équations allométriques soient également établies pour les *Avicennia germinans* (Avicenniaceae), *Laguncularia racemosa* et *Conocarpus erectus* (Combretaceae) dans ces mêmes zones.

## 6. REMERCIEMENTS

L'équipe du LAGRAC remercie la Direction Générale des Écosystèmes Aquatiques du Ministère des Eaux, des Forêts, de la Mer, de l'Environnement, Chargé du Plan Climat, et du Plan d'Affectation des Terres (Gabon), le projet OSFACO de l'Institut de Recherche pour le Développement (France) et de l'IGN-FI, ainsi que l'Agence Universitaire de la Francophonie pour leur soutien financier. Elle remercie les étudiants Elyard Glen Mbaya Diwa, Guy Cardel Mba Ekore, Melvin Megne M'Ndong, Robert Obiang Zogo, Jordan Stephan Pounah, Guevane Gérald Youba, Médard Mamouaka Bayadi, du Département des Sciences Géographiques, Environnementales et Marines de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de l'Université Omar Bongo de Libreville (Gabon) pour avoir participé à la collecte des données.

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ajonina G.N. and Usongo L. (2001). Preliminary quantitative impact assessment of wood extraction on the mangroves of Douala-Edea Forest Reserve, Cameroon. *Tropical Biodiversity*, 7 (2-3), 137-149.

Ajonina G.N. (2008). Inventory and modelling mangrove forest stand dynamics following different levels of wood exploitation pressures in the Douala-Edea Atlantic Coast of Cameroon, Central Africa. *Mitteilungen der Abteilungen für Forstliche Biometrie, Albert-Ludwigs- Universität: Freiburg*. 2008-2, 232p. DOI: 10.13140/RG.2.2.12879.79526

Ajonina G.N. (2013). Etablissement du bilan carbone des mangroves des zones humides du Complexe Ouest du Sud-Bénin en vue de la préparation d'un projet MDP. Rapport de Consultation. Eco-Bénin et Ecosystem Alliance, 85p.

Ajonina G.N., Kairo J., Grimsditch G., Sembres T., Chuyong G. and Diyouke E. (2014a). Assessment of mangrove carbon stocks in Cameroon, Gabon, the Republic of Congo (RoC) and the Democratic Republic of Congo (DRC) including

their potential for reducing emissions from deforestation and forest degradation (REDD+). *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa*, (Eds. Diop S., Barousseau J.P. and Descamps C.), Springer International Publishing Switzerland, 177-189. DOI: 10.1007/978-3-319-06388-1\_15

Ajonina G.N., Agardy T., Lau W., Agbogah K., and Gormey B. (2014b). Mangrove conditions as indicator for potential payment for ecosystem services in some estuaries of western region of Ghana, West Africa. *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa, Estuaries of the World*, (Eds. Diop S., Barousseau J.P. and Descamps C.), Springer International Publishing Switzerland, 151-166. DOI: 10.1007/978-3-319-06388-1\_13

Brown S., Lugo A.E. (1984). Biomass of Tropical Forest: A New Estimate Based on Forest Volume. *Science*, 223, 1290-1293. <http://dx.doi.org/10.1126/science.223.4642.1290>

Chatting M., LeVay L., Walton M., Skov M.W., Kennedy H., Wilson S. and Al-Maslamani I. (2020). Mangrove carbon stocks and biomass partitioning in an extreme environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 244, Elsevier, 8p. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106940>

Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B. and Yamakura T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x

Clough B.F. and Scott K. (1989). Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management*, 27, 117-127. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90034-0)

Direction Générale de la Statistique (2015). Résultats globaux du Recensement Général de la Population et des Logements de 2013 du Gabon (RGPL-2013). 195p. + annexes.

Donato D.C., Kauffman J.B., Murdiyarto D., Kurnianto S., Melanie S.M. and Kanninen M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4, 293-297. DOI: 10.1038/ngeo1123

Dupouey J.L., Pignard G., Hamza N., Dhôte J.F. (2010). Chapter 5 : Estimating carbon stocks and fluxes in forest biomass: 2. Application to the French case based upon National forest Inventory data. *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*, (Ed. Loustau D.), Éditions Quae, France, 101-129

Ene L.T., Naesset E., Gobakken T., Mauya E.W., Bollandss O.M., Gregoire T.G., Ståhl G., Zhabu E. (2016). Large-scale estimation of aboveground biomass in miombo woodlands using airborne laser scanning and national forest inventory data. *Remote Sensing of the Environment*, 186, december, 626-636. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.006>

FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) (2005). *Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management*, FAO Forestry Paper, Vol. 147, Rome, 320 p. <http://www.fao.org/3/A0400E/A0400E00.pdf>

FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) (2005). *Evaluation des ressources forestières*

- mondiales 2005 : Etude thématique sur les mangroves, Gabon profil national. <http://www.fao.org/forestry.pdf>.p.5
- Feamside P.M. (1997). Wood density for estimating forest biomass in Brazilian, Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90, 59–87. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03840-6
- Fleming A.L., Wang G., McRoberts R.E. (2015). Comparison of methods toward multi-scale forest carbon mapping and spatial uncertainty analysis: combining national forest inventory plot data and landsat TM images. *European journal of forest research*, 134(1), 125-137. DOI: 10.1007/s10342-014-0838-y
- Fromard F., Puig H., Mougin E., Marty G., Betoulle J.L., Cadamuro L. (1998). Structure above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia*, 115, 39–53. DOI: 10.1007/s004420050489
- Giri C., Ochieng E., Tieszen L.L., Zhu Z., Singh A., Loveland T., Masek J. and Duke, N. (2010). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology Biogeography*, 20, 154-159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Huang L., Zhou M., Lv J., Chen K. (2020). Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119908. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119908>
- Husch B., Beers T.W. and Kershaw J.A.J. (2003). *Forest mensuration*, 4th ed. John Wiley Publishers, 456 p.
- Jachowski N.R.A., Quak M.S.Y., Friess D.A., Duangnamon D., Webb E.L. and Ziegler A.D. (2013). Mangrove biomass estimation in Southwest Thailand using machine learning. *Applied Geography*, 45, Elsevier, 311-321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.09.024>
- Kauffman J.B. and Cole. T. (2010). Micronesian mangrove forest structure and tree response to a severe typhoon. *Wetlands*, 30, 1077-1084. <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0114-y>
- Kauffman J.B. and Donato D.C. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86 CIFOR, CIFOR Bogor Indonesia, 40p. <https://doi.org/10.17528/cifor/003749>
- Kauffman J.B. and Bhomia R.K. (2017). Ecosystem carbon stocks of mangroves across broad environmental gradients in West-Central Africa: Global and regional comparisons. *PLoS ONE*, 12(11), 17p. DOI: 10.1371/journal.pone.0187749
- Komiyama A., Pongparn S. and Kato S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21, 471-477. doi:10.1017/S0266467405002476
- Komiyama A., Ong J.E. and Pongparn S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>
- Kurz, W.A., Apps, M.J. (2006). Developing Canada's National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System to Meet the Reporting Requirements of the Kyoto Protocol. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 33–43. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1006-6>
- Lebigre J.M. (1983). Les mangroves des rias du littoral gabonais. Essai de cartographie typologique. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 199, 3-28.
- Lebigre J.M. (1990). Les marais maritimes du Gabon et de Madagascar : contribution géographique à l'étude d'un milieu naturel tropicale, Thèse de doctorat d'État, Géographie tropicale, Université de Bordeaux III, 651p.
- Ma L., Hurtt G., Tang H., Lamb R., Campbell E., Dubayah R., Guy M., Huang W., Lister A., Lu J., O'neil-Dunne J., Rudee A., Shen Q., Silva C. (2021). High-resolution forest carbon modelling for climate mitigation planning over the RGGI region, USA. *Environmental Research Letters*, 16(4), 045014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe4f4>
- Maloba Makaga J.D. (2010). Les précipitations au Gabon : climatologie analytique en Afrique, Paris, L'Harmattan, 143p.
- Maloba Makaga J.D. (2004). Climat. Atlas du Gabon, Les Editions Jeune Afrique, 1ère Ed., 12-13.
- Menié Ovono Z., Itongo M.T. et Moukana Lebongui J.A. (2017). Les villes littorales du Gabon. Les régions littorales du Gabon : Eléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire, Coédition LETG-Nantes Géolittomer et Raponda Walker (Gabon), 289-313.
- Ndong Mba J.C., Beka Beka A. (2019). Urbanisation anarchique et glissement de terrain à Libreville : cas du quartier p.k. 6. *Annales de l'Université Omar Bongo*, 20, décembre, Presses Universitaires du Gabon, 51-66. <http://www.pug-uob.org/pdf/Annales/numeros/Annales20.pdf>
- Okanga-Guay M., Ondo Assoumou E., Mombo J. B., Rogombé L., Lembé Békélé A. J., Ndonghan Iyanguui N.N., Mouketou-Tarazewicz D., Akendengue Aken I., Mbadinga M., Nyinguema C. et Nkouanzi Mabika C.O. (2021). Étude de cas : Les mangroves de la rivière Lowé. LAGRAC/Université Omar Bongo, Direction Générale des Écosystèmes Aquatiques, Ministère des Eaux, des Forêts, de la Mer, de l'Environnement, Chargé du Plan Climat, et du Plan d'Affectation des Terres, Libreville, 74p.
- Okanga-Guay M., Ondo Assoumou E., Akendengue Aken I., Mpie Simba C., Mombo J.B., Obiang Ebanega M., Mbadinga M., Rogombé L. et Mouketou-Tarazewicz D. (2019). Suivi des changements spatiaux et environnementaux dans les mangroves de la province de l'Estuaire du Gabon. Actes de la Conférence : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, (Eds Mertens B. et Orekan V.), Cotonou, Bénin, 313-339. hal-02189534
- Ondo Assoumou E. (2006). Dynamique des paysages végétaux du littoral centre-ouest du Gabon autour de Port-Gentil: approche spatiale et analyse des données de terrain, Thèse de doctorat, Biogéographie, Université de Montpellier 3, France, 302p. <http://www.mgm.fr/UMR/Ondo/These.pdf>
- Ondo Assoumou E. (2017). Les paysages végétaux du littoral gabonais. Régions littorales du Gabon : Eléments de réflexion pour une planification stratégique du territoire, Coédition LETG-Nantes Géolittomer (Nantes) et Raponda Walker (Gabon), 47-57.
- Parresol B.R. (1999). Assessing Tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest*

Science, 45(4), 573-593. <https://doi.org/10.1093/forestscience/45.4.573>

Picard N., Saint-André L. et Henry M. (2012). Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : De la mesure de terrain à la prédiction, Food and Agricultural Organization (FAO) of the United Nations, 215p. 978-92-5-107347-6. fhal-02811488f

Puliti S., Hauglin M., Breidenbach J., Montesano P., Neigh C.S.R., Rahlf J., Solberg S., Klingenberg T.F., Astrup R. (2020). Modelling above-ground biomass stock over Norway using national forest inventory data with ArcticDEM and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111501. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111501>.

Rovai A.S., Riul P., Twilley R.R., Castañeda-Moya E., Rivera-Monroy V.H., Williams A.A., Simard M., Cifuentes-Jara M., Lewis R.R., Crooks S., Horta P.A., Schaeffer-Novelli Y., Cintrón G., Pozo-Cajas M. and Pagliosa P.R. (2015). Scaling mangrove aboveground biomass from site-level to continental-scale. *Global Ecology and Biogeography*, John Wiley & Sons Ltd, 44p. <https://doi.org/10.1111/geb.12409>

Rykiel E.J.J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90, 229–244. DOI: 10.1016/0304-3800(95)00152-2

Simard M., Fatoyinbo L., Smetanka C., Rivera-Monroy V.H., Castaneda E., Thomas N. and Van der Stocken T. (2019).

Global Mangrove Distribution, Aboveground Biomass, and Canopy Height (Gabon Dataset). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1665>

Tomlinson P.B. (1986). *The botany of mangroves*, Cambridge Tropical Biology Series, Cambridge, 419p.

UNEP (United Nations Environment Program) -WCMC (World Conservation Monitoring Centre) (2007). *The mangroves of West-Central Africa*, UNEPWCMC report, 92p. <https://archive.org/details/mangrovesofweste07corc>

UN-REDD (2016). *UN-REDD Programme Fact Sheet: About REDD+*, UN-REDD Programme, FAO, UNPD, UNEP, 4p.

UN-REDD (2021). *Systèmes nationaux de surveillance des forêts pour la REDD+ et niveaux d'émission de référence pour les forêts/niveaux de référence pour les forêts (FREL/FRL)*, en ligne, consulté le 21 juillet 2021, <https://www.unredd.net/knowledge/redd-plus-technical-issues/nfms-rel.html>

Wei, Y., Yu, D., Lewis, B.J., Zhou L., Zhou W., Fang X., Zhao W., Wu S., Dai L. (2014). Forest carbon storage and tree carbon pool dynamics under natural forest protection program in northeastern China. *Chinese Geographical Science*, 24, 397–405. <https://doi.org/10.1007/s11769-014-0703-4>

Zianis D. and Mencuccini M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187(2-3), 311–332. DOI : 10.1016/j.foreco.2003.07.007