

## Influence des attributs forestiers sur le stock de carbone des unités de végétation sud-soudaniennes au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest

### [ Influence of forest attributes on South Sudanese vegetation units carbon stock of in Burkina Faso, West Africa ]

*Nebnoma Romaric TIENDREBEOGO<sup>1,2</sup>, Paulin OUOBA<sup>1,4</sup>, Brigitte BASTIDE<sup>3</sup>, Marie Yvette Blandine NACOULMA<sup>5</sup>, Yempabou Hermann OUOBA<sup>5,6</sup>, Félix DJUIGUEMDE<sup>1</sup>, Dieuonné KI<sup>1</sup>, Irénée SOMDA<sup>2</sup>, and Issiaka Joseph BOUSSIM<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>Ecole Doctorale Sciences Naturelles et Agronomie, Université Nazi BONI (UNB), Burkina Faso

<sup>2</sup>Laboratoire des Systèmes Naturels, Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement, UNB, Burkina Faso

<sup>3</sup>Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Station de Farako-Bâ, Burkina Faso

<sup>4</sup>Unité de Formation et de Recherches en Sciences de Vie et de la Terre, UNB, Burkina Faso

<sup>5</sup>Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales, Université Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso

<sup>6</sup>Centre Universitaire de Ziniaré, Burkina Faso

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Changes in forest vegetation composition can lead to changes in carbon stocks. The aim of this study is to identify the relationships between diversity attributes, structural parameters and aboveground carbon stock within vegetation units in the Péni Classified Forest. In total, 3225 individuals belonging to 212 woody species were measured. Our results show a variability of carbon stock between vegetation units ranging from  $2.56 \pm 2.31$  t.ha<sup>-1</sup> in shrub savannas to  $131.80 \pm 75.45$  t.ha<sup>-1</sup> in gallery forests. Allometric models of structural parameters alone govern the variation of carbon stock between vegetation units. In gallery forests, *Gmelina* plantations and tree savannas, basal area explained 95%, 95% and 92% of the variation in carbon stock, respectively. In shrub savannas, the model combining mean diameter, basal area and mean height, explained 92% of the variation in carbon stock. The consideration of models combining diversity attributes and structure parameters is therefore necessary for a good estimation of the carbon stock of forest ecosystems.

**KEYWORDS:** diversity index, structure, regulation service, forest ecosystems, allometric model.

**RESUME:** Des changements dans la composition de la végétation d'une forêt peuvent entraîner des changements dans les stocks de carbone. L'objectif de cette étude est d'identifier les liens qui existent entre les attributs de diversité, les paramètres de structure et le stock de carbone aérien au sein des unités de végétation dans la Forêt Classée de Péni. Au total, 3225 individus appartenant à 212 espèces ligneuses ont été mesurées. Nos résultats montrent une variabilité du stock de carbone entre les unités de végétation allant de  $2,56 \pm 2,31$  t.ha<sup>-1</sup> dans les savanes arbustives à  $131,80 \pm 75,45$  t.ha<sup>-1</sup> dans les forêts galeries. Des modèles allométriques portant uniquement sur les paramètres de structure gouvernent la variation du stock de carbone d'une unité de végétation à l'autre. Dans les forêts galeries, les plantations à *Gmelina* et les savanes arborées, la surface terrière explique respectivement 95%, 95% et 92% de la variation du stock de carbone. Dans les savanes arbustives le modèle combinant le diamètre moyen, la surface terrière et la hauteur moyenne, explique 92% de la variation du stock de carbone. La

prise en compte de modèles combinant les attributs de diversité et les paramètres de structure est donc nécessaire pour une bonne estimation du stock de carbone des écosystèmes forestiers.

**MOTS-CLEFS:** indice de diversité, structure, service de régulation, écosystèmes forestiers, modèle allométrique.

## **1 INTRODUCTION**

Les forêts tropicales jouent un rôle clé dans la régulation du cycle terrestre du carbone et du changement climatique en stockant le carbone dans le bois [1], [2]. Les forêts, à travers la photosynthèse, absorbent le dioxyde de carbone et le stockent au-dessus et en-dessous du sol [3]. Le mécanisme REDD+ vise à encourager les pays en développement à préserver les massifs forestiers moyennant des compensations financières issues des crédits-carbone [4]. Toutefois, sa mise en œuvre dépend d'un système de Mesure, Notification et Vérification (MNV ou MRV en anglais) concernant l'estimation de la biomasse et des stocks de carbone contenus dans les forêts [5], [6], [7], [8].

En effet, l'estimation de la biomasse dans la végétation terrestre est essentielle à la mise en œuvre de stratégies d'atténuation du changement climatique terrestre [9]. La biomasse forestière peut être estimée directement ou à l'aide d'équations allométriques qui sont ensuite utilisées pour convertir les paramètres mesurés des arbres tels que le diamètre, la hauteur, les mesures de la canopée ou la densité du bois, en biomasse [10], [11]. Les équations peuvent être développées pour estimer la biomasse de espèces spécifiques ou d'un mélange d'espèces d'une région [12].

Au Burkina Faso, des équations allométriques ont été développées pour certaines espèces d'arbres économiquement importantes, par exemple *Vitellaria paradoxa* C.F.Gaertn. [13], *Combretum glutinosum* Perr. ex DC. et *Terminalia laxiflora* Engl. & Diels [14], *Bombax costatum* Pellegr. & Vuill. [15], *Jatropha curcas* L. [16], pour quelques autres espèces indigènes [17] puis pour des espèces dominantes dans les unités de végétation de certaines forêts [18]. Cependant, les aires protégées sont pour la plupart multi-espèces et nécessitent des équations d'espèces mixtes développées avec des données qui couvrent la diversité des arbres à mesurer. Ces équations font défaut au Burkina Faso, d'où des équations globales telles que celles développées par [19] sont couramment utilisés pour l'estimation de la biomasse à l'échelle des aires protégées.

Dans un contexte de perturbations climatiques et anthropiques, les changements dans la composition et la structure d'une végétation peuvent entraîner des changements dans les stocks de carbone associés. Les récentes études ayant intégré les attributs de diversité et les paramètres de structure dans l'élaboration d'équations allométriques n'ont pas tenu compte de la variabilité des conditions écologiques entre les unités de végétation d'une même forêt. Or, comprendre le lien entre les attributs de diversité, les paramètres de structure et les stocks de carbone dans les unités de végétation d'une même aire protégée, différemment perturbées, peut aider à orienter les futures politiques d'aménagements et à améliorer la planification de leur gestion.

La présente étude a pour objectifs: (i) d'évaluer le stock de carbone aérien des différentes unités de végétation de la Forêt Classée de Péni; (ii) d'identifier les indices de diversité et les caractéristiques structurales qui influencent le stock de carbone dans chaque unités de végétation; (iii) d'élaborer des modèles de prédiction du stock de carbone pour chaque unité de végétation.

## **2 MÉTHODOLOGIE**

### **2.1 SITE D'ÉTUDE**

L'étude a été menée dans la Forêt Classée de Péni au sud-ouest du Burkina Faso. La FCP est située dans la commune de Péni à 32 km de la ville de Bobo-Dioulasso sur l'axe Bobo--Dioulasso - Banfora. Géographiquement, elle est située entre les latitudes 10°55'02,5" et 10°56'33" Nord et entre les longitudes 4°27'26,5" et 4°29'37,5" Ouest. La FCP appartient au secteur phytogéographique sud-soudanien [20]. Le climat est du type soudano-guinéen. La moyenne annuelle des précipitations sur dix ans (2011-2021) dans la commune de Péni varie entre 749 et 1320 mm. La commune est caractérisée par une saison pluvieuse allant de mai à septembre et une saison sèche qui s'étale sur 6 à 7 mois, d'octobre à avril. La température moyenne mensuelle varie de 27 à 28 °C. La végétation de la FCP est composée d'une mosaïque de savanes (bois, herbes, arbustes et arbres) et de forêts galeries [21]. Les principaux types de sols du site d'étude sont les sols ferrallitiques, les sols peu évolués et les sols à sesquioxyde et matière organique rapidement minéralisable [22].

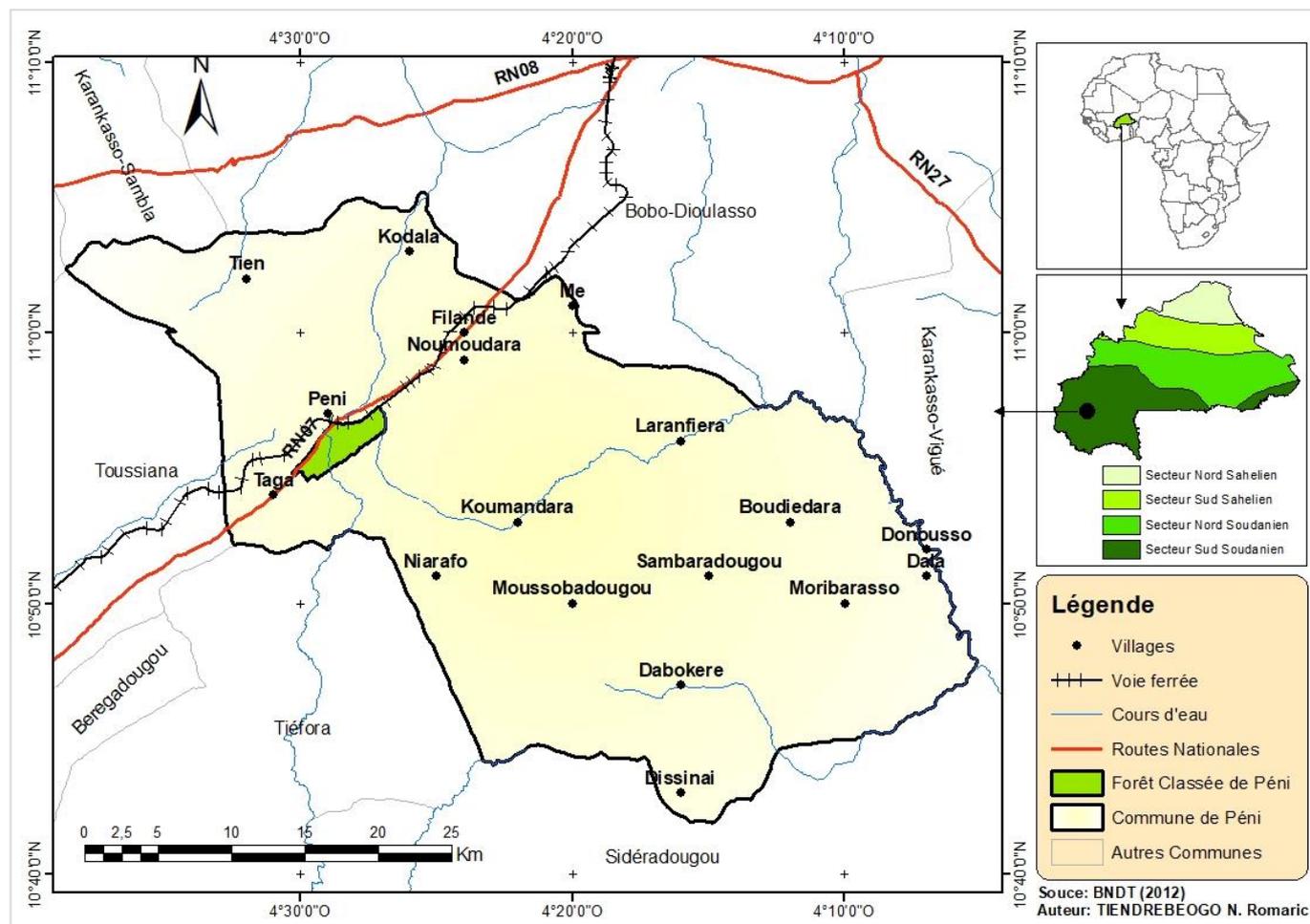


Fig. 1. Localisation de la Forêt Classée de Péné au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest

## 2.2 ECHANTILLONNAGE ET COLLECTE DE DONNEES

La méthode non destructrice basée sur des tables de régression a été adoptée pour l'estimation de la biomasse ligneuse. Dans le cadre de cette étude, cette méthodologie est la mieux indiquée vu le caractère conservateur de l'intégrité des espèces [23]. Plusieurs auteurs ont également utilisé cette méthodologie lors d'études similaires [12], [24], [25], [26], [27]. Des inventaires forestiers suivant un échantillonnage stratifié en fonction des unités de végétation de la Forêt ont été effectués. La taille des placettes était de 500 m<sup>2</sup> (50 m x 10 m) dans les forêts galeries et de 900 m<sup>2</sup> (30 m x 30 m) dans les savanes et les plantations pour la strate ligneuse [28]. Dans chaque placette, les données suivantes ont été enregistrées: les coordonnées géographiques au centre de la placette, la liste floristique, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur totale. Les mesures dendrométriques ont été réalisées uniquement sur des arbres adultes (dbh ≥ 5 cm). Certains individus d'espèces de nature arbustive ont été mesurés au collet [29]. Au total 95 relevés dendrométriques ont été effectués.

## 2.3 TRAITEMENT ET ANALYSE DE DONNEES

### 2.3.1 CALCUL DES ATTRIBUTS DE DIVERSITÉ

Les paramètres de diversité ont été estimés par:

- La richesse spécifique ( $S$ , en espèces) représentant le nombre total d'espèces présentes dans un milieu donné
- L'indice ( $H$ ) de Shannon-Weaver [30] selon la formule:  $H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$  où  $p_i$  est le rapport du recouvrement moyen de l'espèce  $i$  dans la formation sur la somme de tous les recouvrements de toutes les espèces de l'unités de végétation;  $\ln$ : logarithme népérien

### 2.3.2 CALCUL DES PARAMETRES DE STRUCTURES

La densité moyenne, le diamètre moyen et la surface terrière ont été calculés par placette puis par unités de végétation.

- La densité moyenne (D) par la formule:  $D=n/s$  où  $n$  est le nombre d'individus de l'espèce considérée et  $s$  la surface de la placette en ha
- Le diamètre moyen (DM) par la formule:  $DM = \frac{\sum_{i=1}^n di}{N}$  où  $di$  est le diamètre de l'arbre et  $N$  le nombre total d'individus de l'espèce. Pour un individu multicaule avec  $t$  tiges en-dessous de la hauteur de mesure, le diamètre  $di$  est égal à la somme quadratique de tous les diamètres  $ds_i$  des tiges de l'individu mesuré. La formule du diamètre  $di$  s'établit comme suit:

$$di = \sqrt{\sum_{i=1}^t ds_i^2}$$

- La surface terrière (G) m<sup>2</sup>/ha par la formule:  $G = \sum (\pi di^2/4)$  où  $di$  est le diamètre de l'arbre mesuré à 1,30 m du sol

### 2.3.3 ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE

La quantité de biomasse aérienne a été estimée en appliquant l'équation allométrique établie par [19] utilisant les données dendrométriques telles que le diamètre des arbres, la hauteur des arbres et la densité spécifique du bois. Les densités spécifiques du bois ( $\rho$ ) ont été extraites de la base de données mondiale sur la densité du bois [31], [32] à l'aide de la fonction *getWoodDensity* du package « BIOMASS » du logiciel R [33]. Ces valeurs ont été attribuées au niveau de l'espèce ou du genre ou de la famille. Plusieurs auteurs ont utilisé cette équation avec succès au Burkina Faso pour l'estimation de la biomasse aérienne dans des études similaires [12], [26]. Cette équation est définie comme suit:  $AGB=0,0673 \times$ , où **AGB** représente la biomasse aérienne en kg, **DBH** représente le diamètre à la hauteur de poitrine en cm,  $\rho$  est la densité du bois en g.cm<sup>-3</sup> et  $h$  est la hauteur totale de l'arbre en m.

Le stock de carbone (SC) a été déterminée en multipliant la valeur de la biomasse par la valeur 0,47 représentant la fraction carbone recommandée par [33], [34].

### 2.3.4 ANALYSE STATISTIQUE

Le tableur Excel 2019 a été utilisé pour la saisie des données. Après vérification de la normalité des données par le test de Shapiro-Wilk. Une analyse de variance à un facteur a été utilisée pour déterminer la variation du stock de carbone entre les différentes unités de végétation. Les valeurs moyennes ont été ensuite comparées entre elles à l'aide du test de Tukey au seuil de 5%. Puis le test de corrélation de Pearson a été utilisé pour déterminer la relation entre le stock de carbone et chacune des variables indépendantes (attributs de diversité et paramètres de structure). Ensuite les variables indépendantes significativement corrélées au stock de carbone ont été utilisées dans une analyse de régression linéaire multiple pour évaluer leur contribution aux variations du stock de carbone. Les modèles de prédiction optimale du stock de carbone ont été sélectionnés sur la base de la p-value au seuil de 5% et du Critère d'Information d'Akaike (AIC) [35]. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du package « Rcmdr » du logiciel R version 4.1.3 [36].

## 3 RÉSULTATS

### 3.1 VARIATION DES ATTRIBUTS DE DIVERSITE ENTRE LES UNITES DE VEGETATION

Un total de 3225 arbres et arbustes a été mesuré dans la Forêt Classée de Péni dont 898 dans les forêts galeries, 877 dans les savanes arbustives, 752 dans les savanes arborées et 698 dans les plantations à *Gmelina* (Tableau I). Les individus mesurés sont répartis en 121 espèces ligneuses pour l'ensemble des unités de végétation de la forêt. Les savanes arborées ont le plus grand nombre d'espèces soient 72 espèces réparties dans 57 genres et 26 familles; suivie des savanes arbustives avec 60 espèces réparties dans 48 genres et 21 familles. Les forêts galeries et les plantations ont respectivement 59 espèces réparties dans 50 genres et 28 familles et 35 espèces réparties dans 29 genres et 15 familles. La richesse spécifique moyenne varie de  $7 \pm 3$  espèces dans les plantation à *Gmelina* à  $12 \pm 5$  espèces dans les savanes arborées ( $F=4,48$ ;  $p=0,005$ ). L'indice de Shannon varie d'une unité de végétation à l'autre ( $F=13,69$ ;  $p<0,0001$ ) et le plus élevé est observé dans les savanes arborées avec  $2,06 \pm 0,56$  bits (Tableau 1, Figure 2).

Tableau 1. Nombre de placettes, richesse spécifique, nombre d'individus, richesse spécifique moyenne et indice de Shannon moyen par unité de végétation dans la FCP

Unités de végétation	Nombre de placettes (n=95)	Richesse spécifique (n=121)	Nombre d'individus (n=3225)	Richesse spécifique moyenne	Indice de Shannon
Forêt galerie	29	59	898	9±3 <sup>a</sup>	1,79±0,47 <sup>a</sup>
Savane arborée	23	72	877	12±5 <sup>b</sup>	2,06±0,56 <sup>a</sup>
Savane arbustive	32	60	752	10±4 <sup>ab</sup>	1,94±0,42 <sup>a</sup>
Plantation	11	35	698	7±3 <sup>a</sup>	0,99±0,45 <sup>b</sup>

Les lettres en exposant indiquent des différences significatives selon le test de Tukey au seuil de 5%. Les moyennes suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes.

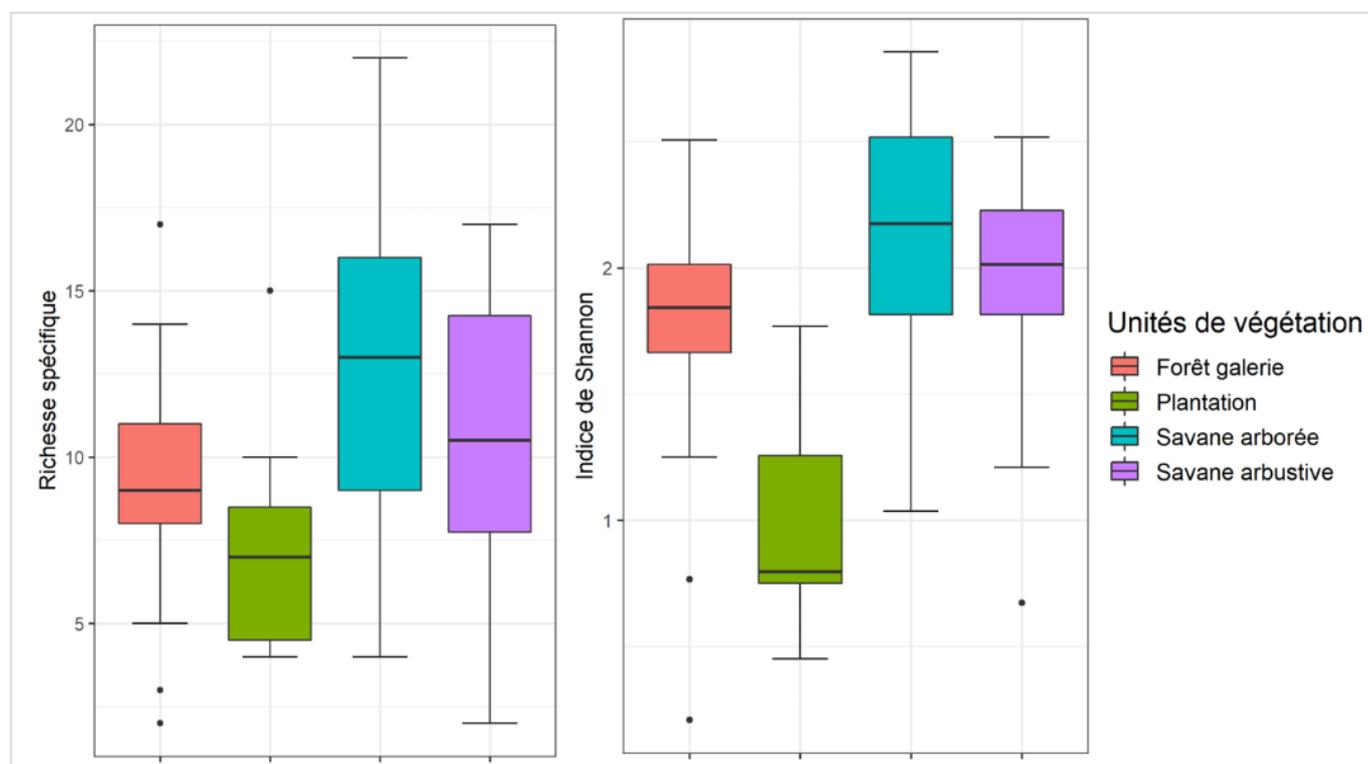


Fig. 2. Distribution de la richesse spécifique et l'indice de Shannon dans chaque unité de végétation

### 3.2 VARIATION DES PARAMETRES DE STRUCTURE ENTRE LES UNITES DE VEGETATION

La plantation forestière est l'unité végétale la plus dense avec 705±109 pieds.ha<sup>-1</sup> suivie de la forêt galerie avec 619±228 pieds.ha<sup>-1</sup> qui ne sont pas statistiquement différentes ( $p < 0,05$ ) (Figure 3, Tableau 2). Similairement, la forte valeur de la surface terrière est observée dans la plantation forestière suivie de forêt galerie. Le diamètre moyen des arbres et arbustes varie de 9,51±1,35 cm à 27,93±6,85 cm respectivement des savanes arbustives aux forêts galeries ( $F=109,7$ ;  $p < 2e^{-16}$ ) et sont significativement différentes entre elles. La faible valeur moyenne de la hauteur des arbres et arbustes est observée dans les savanes arbustives (2,84±0,52 m) et la plus élevée dans les forêts galeries (9,39±2,22 m).

Tableau 2. Valeurs moyennes et écart-types des variables de la structure par unité de végétation

Unités de végétation	Hauteur moyenne (m)	Diamètre moyen (m)	Densité (pied.ha <sup>-1</sup> )	Surface terrière (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )
Forêt galerie	9,39±2,22 <sup>a</sup>	27,93±6,85 <sup>a</sup>	619±228 <sup>a</sup>	2,75±1,42 <sup>a</sup>
Savane arborée	4,16±0,73 <sup>b</sup>	12,88±2,57 <sup>c</sup>	363±142 <sup>b</sup>	0,58±0,29 <sup>b</sup>
Savane arbustive	2,84±0,51 <sup>c</sup>	9,51±1,35 <sup>d</sup>	304±109 <sup>b</sup>	0,25±0,15 <sup>b</sup>
Plantation	8,22±0,79 <sup>a</sup>	21,89±3,39 <sup>b</sup>	705±109 <sup>a</sup>	3,36±0,96 <sup>a</sup>

Les lettres en exposant indiquent des différences significatives selon le test de Tukey au seuil de 5%. Les moyennes suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes.

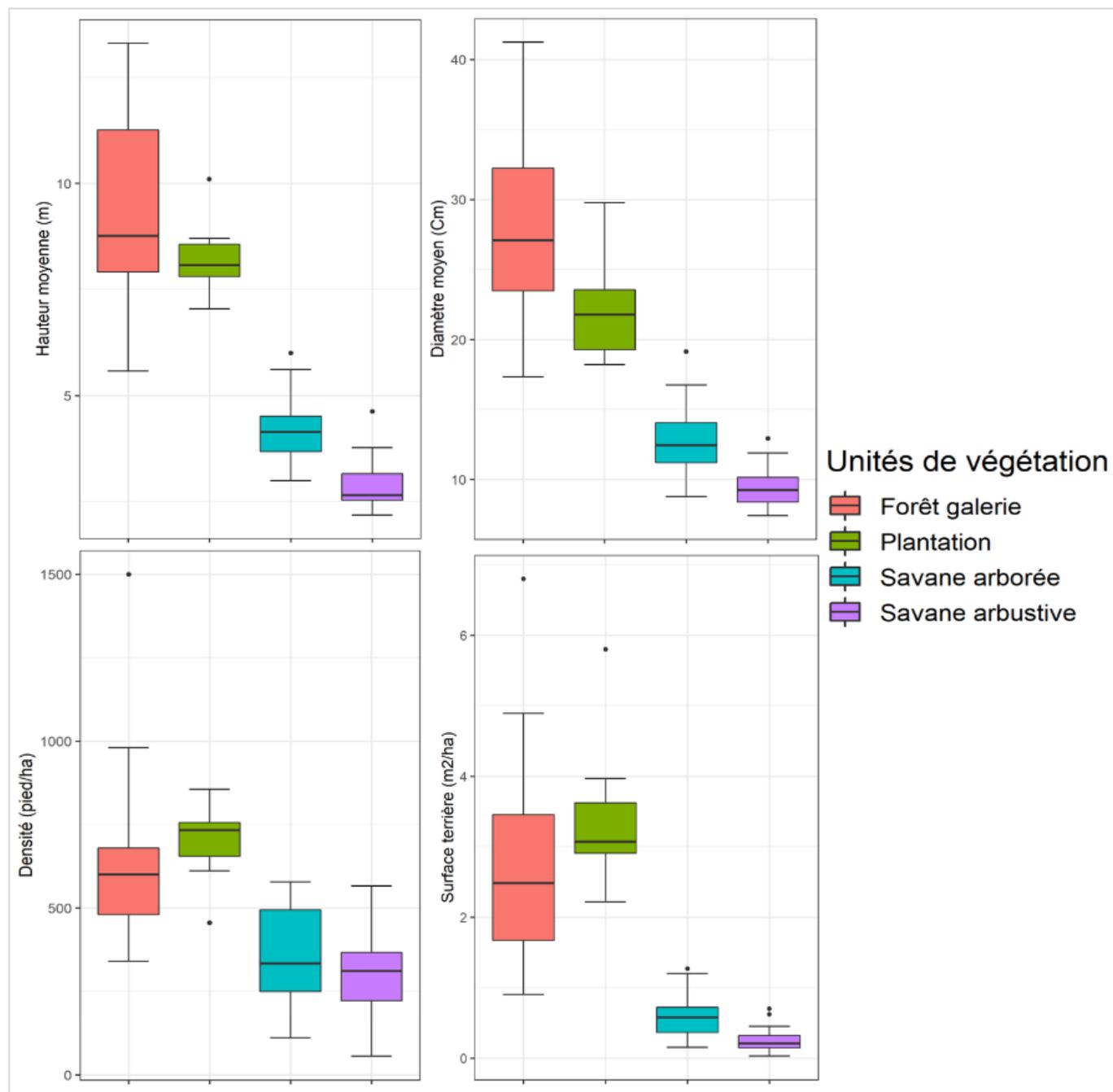


Fig. 3. Distribution de la hauteur, le diamètre, la densité et la surface terrière dans les unités de végétation

### 3.3 VARIATION DU STOCK DE CARBONE ENTRE LES UNITES DE VEGETATION

L'analyse de la variance montre que le stock de carbone aérien varie significativement entre les unités de végétation de la Forêt Classée de Péni ( $F= 56,84$ ;  $p<2e^{-16}$ ). Les forêts galeries stockent plus de carbone ( $131,80\pm 75,45 \text{ t.ha}^{-1}$ ) que les autres unités de végétation de la FCP. Elles sont suivies par les plantations à *Gmelina* ( $68,28\pm 20,55 \text{ t.ha}^{-1}$ ). Par ailleurs, des différences significatives existent entre les stocks de carbone de ces deux formations et les stocks de carbone des savanes arborées et arbustives. En revanche, il n'existe pas de différence significative ( $t= -0,54$ ;  $p<0,95$ ) entre les stocks de carbone des savanes arborées ( $8,86\pm 6,19 \text{ t.ha}^{-1}$ ) et ceux des savanes arbustives ( $2,56\pm 2,31 \text{ t.ha}^{-1}$ ) qui ont les stocks de carbone le plus faible (Figure 4).

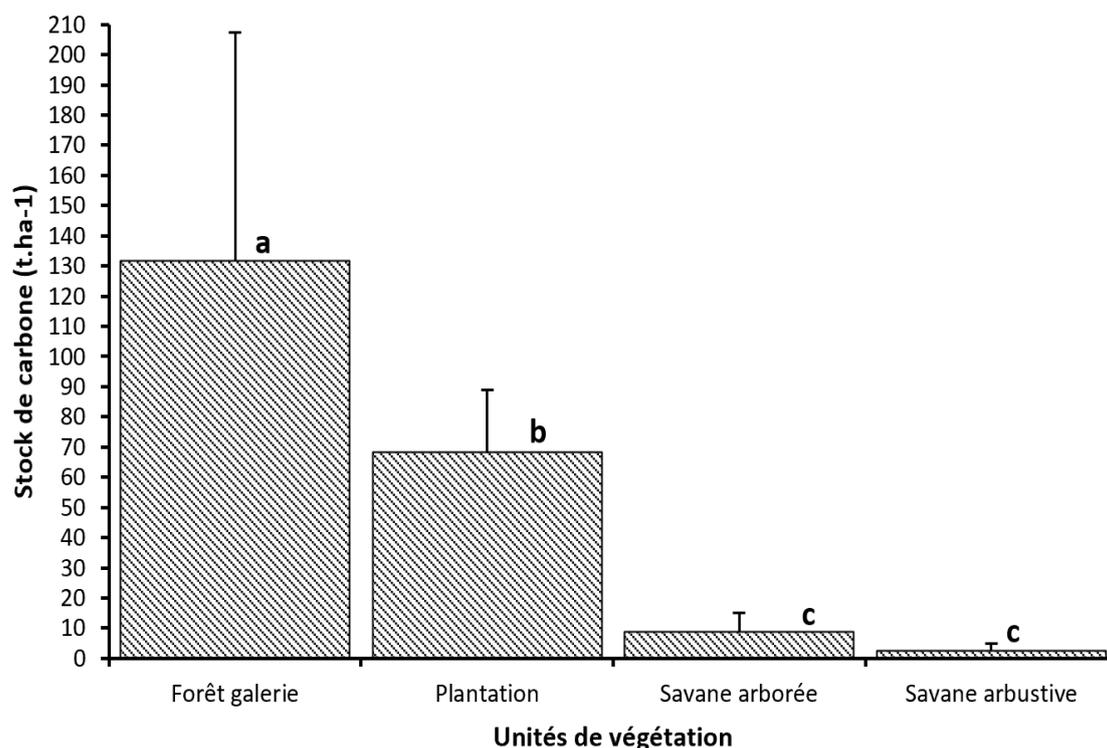


Fig. 4. Comparaison du stock de carbone aérien entre les unités de végétation de la FCP

### 3.4 RELATIONS ENTRE LE STOCK DE CARBONE ET LES ATTRIBUTS FORESTIERS

Le test de corrélation de Pearson a montré des corrélations significatives du stock de carbone avec certains attributs de diversité et certains paramètres de structure d'une unité de végétation à l'autre (Tableau 3). Dans les forêts galeries, le stock de carbone est négativement corrélé à l'indice de Shannon ( $R=-0,47$ ;  $p=0,01$ ) et positivement corrélé avec tous les paramètres de structure ( $0,98 \leq R \leq 0,60$ ;  $p< 0,0001$ ). Dans les plantations à *Gmelina*, le stock de carbone n'est corrélé à aucun attribut de diversité. Il est en revanche positivement corrélé avec la surface terrière ( $R=0,98$ ;  $p< 0,0001$ ), les diamètres des arbres ( $R=0,80$ ;  $p=0,00$ ) et les hauteurs des arbres ( $R=0,65$ ;  $p=0,03$ ) pour les paramètres de structure de cette unité de végétation. Quant aux savanes arborées, le stock de carbone est positivement corrélé avec tous les attributs de diversité ( $0,62 \leq R \leq 0,60$ ;  $p=0,00$ ) et certaines variables des paramètres de structure tels que la densité des tiges ( $R=0,63$ ;  $p=0,00$ ) et la surface terrière ( $R=0,96$ ;  $p< 0,0001$ ). Pour les savanes arbustives, une corrélation positive existe entre le stock de carbone et tous les paramètres de structure ( $0,89 \leq R \leq 0,51$ ;  $p\leq 0,01$ ). Pour les attributs de diversité de cette unité de végétation, le stock de carbone est positivement corrélé avec la riche spécifique ( $R=0,41$ ;  $p=0,00$ ) et à l'indice de Shannon ( $R=0,38$ ;  $p=0,01$ ).

Tableau 3. Corrélation entre les attributs de diversité et le stock de carbone par unités de végétation de la FCP

Unités de végétation	Variables	SC	p-value
Forêt galerie	Richesse spécifique	-0,21	0,21
	Indice de Shannon	-0,47*	0,01
	Densité de tiges	0,60***	< 0,0001
	Surface terrière	0,98***	0,00
	Diamètre des arbres	0,73***	< 0,0001
	Hauteur des arbres	0,72***	< 0,0001
Savane arborée	Richesse spécifique	0,62***	0,00
	Indice de Shannon	0,60***	0,00
	Densité de tiges	0,63***	0,00
	Surface terrière	0,96***	< 0,0001
	Diamètre des arbres	0,28	0,19
	Hauteur des arbres	0,46*	0,03
Savane arbustive	Richesse spécifique	0,55***	0,00
	Indice de Shannon	0,47**	0,01
	Densité de tiges	0,51***	0,00
	Surface terrière	0,82***	< 0,0001
	Diamètre des arbres	0,70***	< 0,0001
	Hauteur des arbres	0,89***	< 0,0001
Plantation à <i>Gmelina</i>	Richesse spécifique	0,30	0,37
	Indice de Shannon	0,18	0,61
	Densité de tiges	0,30	0,36
	Surface terrière	0,98***	< 0,0001
	Diamètre des arbres	0,80***	0,00
	Hauteur des arbres	0,65*	0,03

Corrélations significatives: « \* » valeur de  $p < 0,05$ ; "\*\*\*" valeur  $p < 0,01$ ; « \*\*\* » valeur de  $p < 0,001$ .

### 3.5 MODELES D'ESTIMATION DU STOCKAGE DE CARBONE DES UNITES DE VEGETATION

L'analyse de la régression linéaire multiple entre le stock de carbone, les attributs de diversité et les paramètres de structure, qui lui sont corrélés, est présentée dans les tableaux 4, 5, 6, 7 respectivement pour les forêts galeries, les plantations à *Gmelina*, les savanes arborées et les savanes arbustives. La sélection des équations de prédiction est présentée dans le tableau 8. La surface terrière (St) explique 95% de la variation du stock de carbone des forêts galeries avec pour équation de prédiction  $SC = -11,26 + 51,29St$  (AIC=241,67;  $p < 2,2e^{-16}$ ). Similairement, la surface terrière (St) explique 95% de la variation de son stock de carbone avec pour équation de prédiction  $SC = -2,43 + 21,04St$  (AIC=67,85;  $p=0,00$ ) dans les plantations à *Gmelina*. Cette même variable explique la variation du stock de carbone des savanes arborées (92%) avec pour équation de prédiction  $SC = -2,88 + 20,33St$  (AIC=95,00;  $p=3,39e^{-13}$ ). Dans les savanes arbustives, la combinaison de la surface terrière (St), du diamètre moyen (Dm) et de la hauteur moyenne (Hm) explique 92% de la variation du stock de carbone avec pour équation de prédiction  $SC = -2,74 - 0,45Dm + 11,11St + 2,39Hm$  (AIC=68,55;  $p=3,04e^{-13}$ ). Pour l'ensemble des formations végétales, la droite de régression linéaire entre le stock de carbone prédit et le stock de carbone calculé est presque confondue avec la droite d'équation  $y=x$  (Figure 5).

**Tableau 4. Modèles allométriques d'estimation du stock de carbone d'une forêt galerie**

	Modèles	Variables	$\alpha$	SE	t-value	Pr (>t)	R <sup>2</sup> ajusté	RSE	F	P-value	AIC
1.)	SC ~ H + Dm + Hm + De + St	Intercepte	-15,26	38,98	-0,39	0,70	0,97	16,11	587,30	< 2,2e <sup>-16</sup>	241,67
		H	-9,35	7,18	-1,30	0,20					
		Dm	-0,57	1,82	-0,31	0,75					
		Hm	5,29	3,11	1,70	0,10					
		De	-0,00	0,04	-0,02	0,98					
		St	47,38	8,54	5,55	0,00 ***					
2.)	SC ~ St	Intercepte	-11,26	6,62	-1,70	0,1	0,95	16,11	587,30	< 2,2e <sup>-16</sup>	247,43
		St	51,29	2,14	24,23	<2e <sup>-16</sup> ***					

SC: densité du stock de carbone; H: Indice de diversité de Shannon; De: Densité des arbres; St: Surface terrière; Dm: diamètre moyen; Hm: hauteur moyenne.

**Tableau 5. Modèles allométriques d'estimation du stock de carbone d'une plantation**

	Modèles	Variables	$\alpha$	SE	t-value	Pr (>t)	R <sup>2</sup> ajusté	RSE	F	P-value	AIC
3.)	SC ~ Dm + Hm + St	Intercepte	-15,08	17,31	-0,87	0,41	0,94	4,81	58,55	0,00	70,80
		Hm	3,03	3,68	0,82	0,43					
		Dm	-0,57	1,15	-0,50	0,64					
		St	21,11	2,80	7,54	0,00***					
4.)	SC ~ St	Intercepte	-2,43	5,13	-0,47	0,65	0,95	4,45	204,30	0,00	67,85
		St	21,04	1,47	14,29	0,00 ***					

SC: densité du stock de carbone; St: Surface terrière; Dm: diamètre moyen; Hm: hauteur moyenne.

**Tableau 6. Modèles allométriques d'estimation du stock de carbone d'une savane arborée**

	Modèles	Variables	$\alpha$	SE	t-value	Pr (>t)	R <sup>2</sup> ajusté	RSE	F	P-value	AIC
5.)	SC ~ S + H + De + St + Hm	Intercepte	-9,90	4,94	-2,00	0,06	0,92	1,73	53,09	8,90e <sup>-10</sup>	97,48
		S	-0,40	0,31	-1,25	0,23					
		H	3,39	2,55	1,33	0,20					
		De	0,00	0,00	0,25	0,80					
		St	19,47	2,48	7,86	0,00 ***					
		Hm	1,15	0,80	1,44	0,17					
6.)	SC ~ St	Intercepte	-2,88	0,82	-3,50	0,00 **	0,92	1,75	253,5	3,39e <sup>-13</sup>	95,00
		St	20,33	1,28	15,92	3,39e <sup>-13</sup> ***					

SC: densité du stock de carbone; S: Richesse spécifique; H: indice de Shannon; De: Densité des arbres; St: Surface terrière; Hm: Hauteur moyenne

Tableau 7. Modèles allométriques d'estimation du stock de carbone d'une savane arbustive

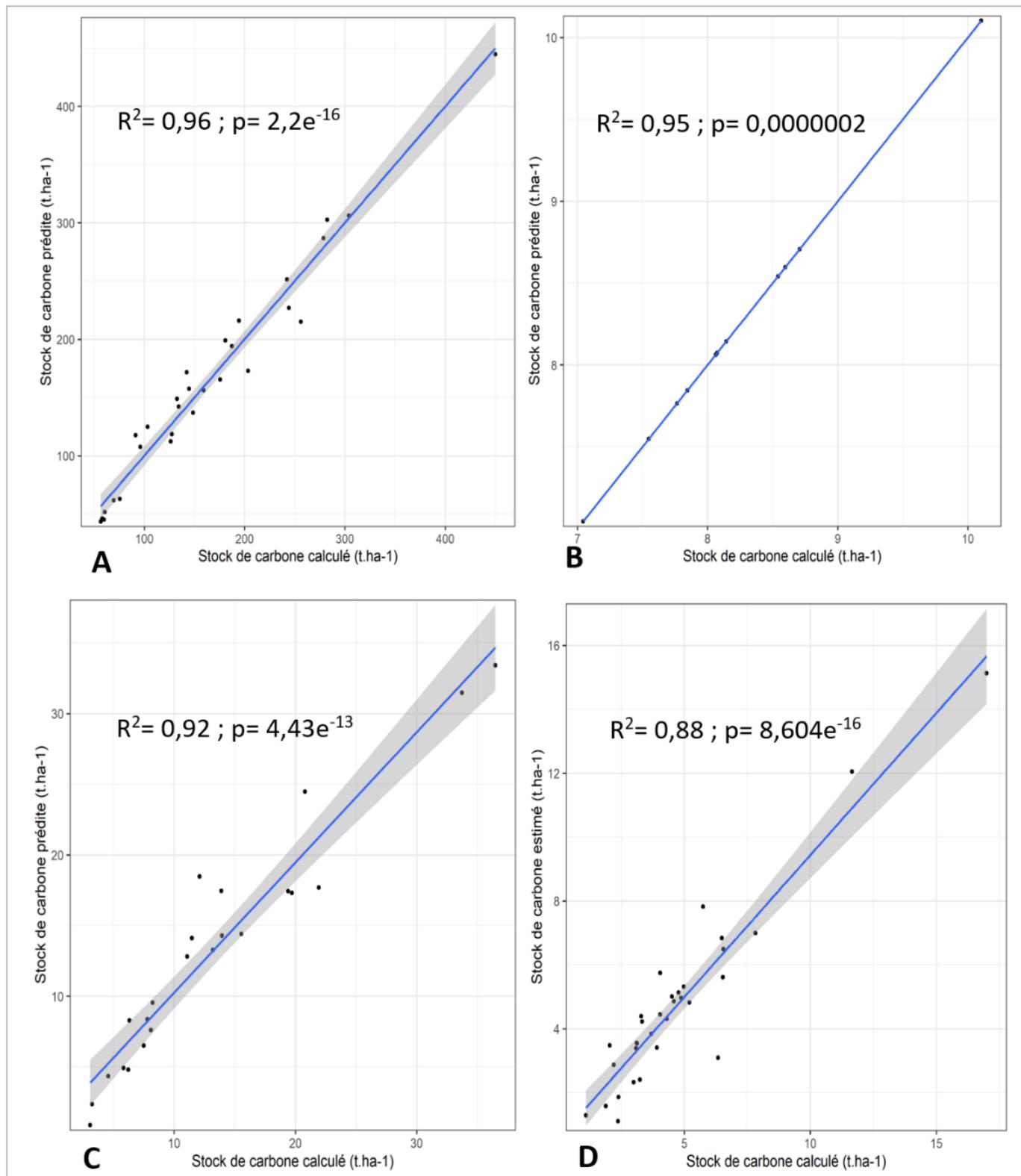
	Modèles	Variables	$\alpha$	SE	t-value	Pr (>t)	R <sup>2</sup> ajusté	RSE	F	P-value	AIC
7.)	SC ~ S + H + Dm + De + St + Hm	Intercepte	0,16	1,68	0,99	0,92	0,93	0,60	71,39	1,63e <sup>-14</sup>	66,76
		S	0,08	0,11	0,78	0,44					
		H	-0,97	0,74	-1,31	0,20					
		Dm	-0,58	0,18	-3,19	0,00 **					
		De	-0,00	0,00	-1,55	0,13					
		St	14,75	2,11	5,42	0,00 ***					
		Hm	2,29	0,43	5,25	0,00 ***					
8.)	SC ~ Dm + St + Hm	Intercepte	-2,74	1,07	-2,56	0,01 *	0,92	0,64	123,40	3,04e <sup>-16</sup>	68,55
		Dm	-0,45	0,15	-2,84	0,00 **					
		St	11,11	1,24	8,92	0,00 ***					
		Hm	2,39	0,39	6,05	0,00 ***					

SC: densité du stock de carbone; S: Richesse spécifique; H: Indice de Shannon; De: Densité des arbres; St: Surface terrière; Dm: diamètre moyen; Hm: hauteur moyenne.

Tableau 8. Sélection d'équations allométriques pour la prédiction du stock de carbone par Unités de végétation

Unités de végétation	Equations allométriques
Forêt galerie	SC = -11,26 + 51,29St
Plantation	SC = -2,43 + 21,04St
Savane arborée	SC = -2,88 + 20,33St
Savane arbustive	SC = -2,74 - 0,45Dm + 11,11St + 2,39Hm

SC: densité du stock de carbone; St: Surface terrière; Dm: diamètre moyen; Hm: hauteur moyenne



**Fig. 5.** Droite de régression entre le stock de carbone prédit et le stock de carbone calculé dans A: la forêt galerie, B: la plantation, C: la savane arborée et D: la savane arbustive

## 4 DISCUSSION

### 4.1 REPARTITION DU CARBONE ENTRE LES UNITES DE VEGETATION

Le stock de carbone aérien varie significativement entre les unités de végétation. Les fortes quantités de carbone sont observées dans les forêts galeries ( $131,80 \pm 75,45 \text{ t.ha}^{-1}$ ) et les plantations à *Gmelina* ( $68,28 \pm 20,55 \text{ t.ha}^{-1}$ ) tandis que les faibles quantités sont observées dans les savanes arborées et arbustives. Ces résultats corroborent les études de [25] dans la réserve forestière de Bellefoungou où les forêts galeries et les plantations stockaient plus que les savanes arborées et arbustives. Les stocks de carbone élevés dans ces formations, seraient liés, d'une part, à la densité des individus et, d'autre part, à l'allométrie des espèces dans ces unités de végétation [37], [35]. Par ailleurs, les valeurs élevées du stock de carbone dans les forêts galeries par rapport aux autres unités de végétation pourraient s'expliquer par l'abondance d'arbres de grande taille dans ce type de végétation en raison des conditions environnementales. En effet, comparativement aux autres unités de végétation, les forêts galeries ont une humidité plus élevée et des nutriments qui favorisent la croissance des arbres. Il n'y a pas de différence entre la valeur du stock de carbone des savanes arborées et celui des savanes arbustives. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que ces deux types de formations végétales ont sensiblement les mêmes densités d'arbres à l'hectare. [35] affirme que dans certaines situations, seule la densité des individus peut influencer la variation du stock de carbone. Nos résultats confirment cette assertion. De plus, ce résultat pourrait s'expliquer par la forte pression anthropique qui pèse sur les gros sujets [38]. En effet, les arbres de grandes tailles et de gros diamètres des savanes arborées sont sujets à des coupes à des fins de fabrication de charbons de bois dans la FCP; ce qui diminue leur densité au détriment des arbustes qui sont plus fréquents dans les savanes arbustives.

### 4.2 RELATIONS ENTRE LE STOCK DE CARBONE, LA DIVERSITE ET LES PARAMETRE DE STRUCTURE

D'une unité de végétation à l'autre le stock de carbone est significativement corrélé à la plupart des attributs de diversité et des paramètres de structure ( $p < 0,05$ ). Pour les attributs de diversité, la richesse spécifique n'a pas d'effets sur le stock de carbone des forêts galeries et des plantations. [40] ont montré à travers leur étude que l'effet de la richesse spécifique sur la biomasse ne peut être perçu qu'à des superficies de placettes  $< 0,01 \text{ ha}$ . Nos inventaires ont été réalisés dans des placettes de  $0,05 \text{ ha}$  et  $0,09 \text{ ha}$  respectivement pour les forêts galeries et les plantations à *Gmelina* ce qui pourrait expliquer nos résultats. Par ailleurs, [39], [26] soutiennent qu'une telle absence de relation entre la richesse spécifique et le stock de carbone pourrait s'expliquer par l'effet de la densité. En effet, les forêts galeries et les plantations sont les unités de végétation les plus denses de la FCP avec respectivement  $619 \pm 228$  et  $705 \pm 109$  pieds. $\text{ha}^{-1}$ . Cette assertion confirme donc nos résultats relatifs aux stocks de carbone des savanes arborées et arbustives, moins denses, corrélés à la richesse spécifique. Pour les paramètres de structure, nos résultats montrent des liens significatifs entre l'ensemble des paramètres de structure (densité de tiges, surface terrière, diamètre et hauteur des arbres) et les stocks de carbone des forêts galeries et des savanes arbustives. En revanche les stocks de carbone des plantations à *Gmelina* ne sont corrélés qu'à la surface terrière, le diamètre et la hauteur des arbres. Les stocks de carbone dans les savanes arborées sont corrélés à la densité, à la surface terrière et à la hauteur.

### 4.3 FACTEURS INFLUENÇANT LE STOCK DE CARBONE DANS LES UNITES DE VEGETATION DE LA FCP

La régression linéaire multiple a permis d'identifier les modèles ou combinaisons de variables qui gouvernent au mieux le stock de carbone dans les unités de végétation de la FCP. Ces modèles diffèrent d'une formation à l'autre. L'équation de prédiction optimale  $SC = -11,26 + 51,29St$  explique 95% de la variation du stock de carbone des forêts galeries avec uniquement la surface terrière comme facteur déterminant. Dans les savanes arborées, le modèle  $SC = -2,88 + 20,33St$  explique 92% de la variation du stock de carbone avec pour seul variable la surface terrière. Il en est de même pour les plantations avec le modèle  $SC = -2,43 + 21,04St$ , expliquant à 95%, la variation du stock de carbone. Tandis que dans les savanes arbustives 88% de la variation du stock de carbone est expliqué par le modèle  $SC = -2,74 - 0,45Dm + 11,11St + 2,39Hm$  combinant le diamètre moyen, la surface terrière et la hauteur moyenne. La surface terrière représente la proportion (l'espace et l'étendue) de l'unité de végétation qu'occupe réellement les arbres [40], [35]. Cette proportion est un déterminant clé de l'interception de la lumière et de la croissance des individus [41]. Nos résultats montrent une absence des attributs de diversité dans l'ensemble des différents modèles pourtant plusieurs résultats antérieurs soutiennent une relation diversité-biomasse positive ou stock de carbone [39], [42], [12]. Cela pourrait s'expliquer par la taille de nos placettes qui jouerait un rôle capital dans cette relation diversité-stock de carbone [39].

## 5 CONCLUSION

Cette étude a permis d'avoir une meilleure compréhension des variations du stock de carbone des unités de végétation d'une même forêt. Deux aspects issus de cette étude paraissent importants pour améliorer les estimations des stocks de carbone. Premièrement, la corrélation du stock de carbone avec les variables des attributs de diversité et les paramètres de structure pris individuellement, et leur influence en association dans chaque unité de végétation de la FCP ont montré l'importance de la surface terrière dans l'estimation des stocks de carbone. En effet, plus la placette est couverte plus la biomasse et le stock de carbone augmentent. Les variations spatiales de la biomasse entre les unités de végétation sont liées à l'hétérogénéité spatiale des gros arbres au sein de la FCP. Deuxièmement, l'absence des attributs de diversité dans l'ensemble des modèles renvoie à la problématique de la taille de placette idéale pour l'inventaire de végétation pour l'estimation du stock de carbone. Ces résultats ont des implications pratiques sur la cartographie du carbone pour son suivi dans les forêts du Burkina Faso afin d'atteindre les objectifs d'atténuation du changement climatique.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par la bourse nationale du Burkina Faso.

## REFERENCES

- [1] Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., & Hayes D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333: 988-993.
- [2] CCGD (Commissariat général au développement durable), 2019. *EFESE – La séquestration du carbone par les écosystèmes français*. La Documentation Française (ed.). Collection Théma Analyse, e-publication. 102 p.
- [3] Awé D.V., Noiha N.V., Chimi D.C., Ganamé M., Vroh B.T.A., & Zapfack L., 2021. Allometric Models for Predicting Biomass and Carbon Pools of *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. Ex Poir. (Capparaceae) Populations in Central Africa: A Case Study from Cameroon. *Research Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1: 123-146. DOI: 10.31586/rjees.2021.156
- [4] Angelsen A., Brockhaus M., Sunderlin W.D. & Verchot L.V., 2013. *Analyse de la REDD+ : les enjeux et les choix*. Center for International Forestry Research (CIFOR). 520p. <https://doi.org/10.17528/cifor/004100>.
- [5] Gibbs H.K., Brown S., Niles J.O. & Foley J.A., 2007. Monitoring and Estimating Tropical Forest Carbon Stocks: Making REDD a Reality. *Environmental Research Letters*, 2, 045023 (13pp). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>.
- [6] Saatchi S.S., Harris N.L., Brown S., Lefsky M., Edward T. A., Mitchard E.T.A, Salas W., Zutta B.R., Buermann W., Lewis S.L., Hagen S., Petrova S., White S., Silman M. & Morel A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (24): 9899-9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>.
- [7] Baccini A., Goetz S., Walker W., Laporte N.T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P. S. A., Dubayah R., Friedl M. A., Samanta S. & Houghton R. A., 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2: 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>.
- [8] Clark D.B. & Kellner J.R., 2012. Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *J. Veg. Sci.*, 23: 1191-1196.
- [9] Goetz S.J., Hansen M.C., Houghton R.A., Walker W., Laporte N. & Busch J., 2015. Measurement and monitoring needs, capabilities and potential for addressing reduced emissions from deforestation and forest degradation under Measurement and monitoring needs, capabilities and potential for addressing reduced emissions from deforestation. *Environmental Research Letters*, 10: 2-25. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/123001>.
- [10] Kuyah S., Dietz J., Muthuri C., Jamnadass R., Mwangi P., Coe R. & Neufeldt H., 2012a. Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Above biomass. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 158: 216-224.
- [11] Kuyah S., Dietz J., Muthuri C., Jamnadass R., Mwangi P., Coe R. & Neufeldt H., 2012b. Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: II. Belowground biomass. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 158: 225-234.
- [12] Dimobe K., Kuyah S., Dabré Z., Ouédraogo A. & Thiombiano A., 2019. Diversity-carbon stock relationship across vegetation types in W National Park in Burkina Faso. *Forest Ecology and Management*, 438: 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.027>
- [13] Dimobe K., Goetze D., Ouédraogo A., Mensah S., Akpagana K., Porembski S. & Thiombiano A., 2018a. Aboveground biomass allometric equations and carbon content of the shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn., Sapotaceae)

- components in Sudanian savannas (West Africa). *Agroforestry Systems*, 93: 1119-1132. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0213-y>.
- [14] Dimobe K., Mensah S., Goetze D., Ouédraogo A., Kuyah S., Porembski S., & Thiombiano A., 2018b. Aboveground biomass partitioning and additive models for *Combretum glutinosum* and *Terminalia laxiflora* in West Africa. *Biomass and Bioenergy*, 115: 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.022>
- [15] Ouedraogo I., Nacoulma B.M.I., Ouedraogo O., Hahn K. & Thiombiano A., 2014. Productivité et valeur économique des calices de *Bombax costatum* Pellegr. & Vuillet en zone soudanienne du Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*. 68, 31-41. <https://doi.org/10.19182/bft2014.319.a20550>.
- [16] Bayen P., Bognounou F., Lykke A.M., Ouédraogo M. & Thiombiano A., 2015. The use of biomass production and allometric models to estimate carbon sequestration of *Jatropha curcas* L. plantations in western Burkina Faso. *Environment, Development and Sustainability*, 18: 143-156. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9631-4>.
- [17] Sawadogo L., Savadogo P., Tiveau D., Dayamba S.D., Zida D., Nouvellet Y., Oden P.C. & Guinko S., 2010. Allometric prediction of above-ground biomass of eleven woody tree species in the Sudanian savanna-woodland of West Africa. *Journal of Forestry Research*, 21: 475-481. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0101-4>.
- [18] Ganamé M., Bayen P., Ouédraogo I., Balima L.H. & Thiombiano A., 2021. Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4: 100077. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>.
- [19] Chave J., Rejou M.M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M.S., Delitti W.B.C., Duque A., Eid T., Fearnside P.M., Goodman R.C., Henry M., Martinez Yrizar A., Mugasha W.A., Muller-Landau H.C., Mencuccini M., Nelson B.W., Ngomanda A., Nogueira E.M., Ortiz-Malavassi E., Pélissier R., Ploton P., Ryan C.M., Saldarriaga J.G. & Vieilledent G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20: 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- [20] Guinko S., 1984. *La végétation de la Haute-Volta*. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Bordeaux III, Bordeaux, 2 vol., 394 p.
- [21] Fontès J., & Guinko S., 1995. *Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso*. Notice explicative plus carte. Toulouse: Ministère de la coopération française, projet Campus, 67 p.
- [22] Base Nationale de Données Topographiques (BNDT), 2012. Institut Géographique du Burkina. Burkina Faso.
- [23] Henry M., Picard N., Trotta C., Manlay R., Valentini R., Bernoux M. & Saint-André L., 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45 (3B). DOI: 10.14214/sf.38.
- [24] Ouédraogo W.O., Gomgnimbou A.P.K., Santi S., Ilboudo D. & Toguyeni A., 2019. Quantification de la Biomasse et stockage du carbone du massif forestier de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Dindéresso, province du Houet au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13 (7): 3276-3288. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i7.24.
- [25] Mensah S., Noulèkoun F. & Ago E.E., 2020. Aboveground tree carbon stocks in West African semi-arid ecosystems: Dominance patterns, size class allocation and structural drivers. *Global Ecology and Conservation*, 24: e01331. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01331>.
- [26] Balima L.H., Kouamé N.F., Bayen P., Ganamé M., Nacoulma M.I.B., Thiombiano A. & Soro D., 2021. Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa. *Environmental Challenges*, 4: 100123. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100123>.
- [27] Sebrala H., Abich A., Negask M., Asrat Z. & Lojka B., 2022. Tree allometric equations for estimating biomass and volume of Ethiopian forests and establishing a database: Review. *Trees, Forests and People*, In press, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100314>.
- [28] Thiombiano A., Glèlè-Kakai R., Bayen P. Boussim J.I. & Mahamane A., 2016. Méthodes et dispositifs d'inventaires forestiers en Afrique de l'Ouest: état des lieux et propositions pour une harmonisation. *Annales des Sciences Agronomiques* 20, - spécial Projet Undesert-UE: 15-31.
- [29] Traoré L., 2013. Influence du climat et de la protection sur la végétation ligneuse de la partie occidentale du Burkina Faso. Thèse de Doctorat de l'Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 228 p.
- [30] Kent M. & Coker P., 2003. *Vegetation description and analysis. A practical approach*. John Wiley et Sons Eds, 363 p.
- [31] Chave J., Coomes D., Jansen S., Lewis S.L., Swenson N.G. & Zanne A.E., 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12: 351-366. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.
- [32] Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S., Lewis S.L., Miller R.B., Swenson N.G., Wieman M.C. & Chave J., 2009. Data from: towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad* <https://doi.org/10.1111...61-0248.2009.01285.x>.
- [33] GIEC, 2006. Lignes directrices pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Institute for Global Environmental Strategies, Japon, 25 p.

- [34] Réjou-Méchain M., Tanguy A., Pioniot C., Chave J. & Hérault B., 2017. Biomass: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 8 (9) 1163-1167. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12753>.
- [35] GIEC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies, Japon, 25 p.
- [36] Ganamé M., 2021. Dynamique spatio-temporelle et potentiel du stock de carbone aérien des écosystèmes forestiers du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, Burkina Faso, 167p.
- [37] R Core Team, 2022. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- [38] Ma L., Shen C.Y., Fu S.L., Lian J.Y. & Ye W.H., 2018. Temporal and spatial patterns in aboveground biomass within different habitats in a sub-tropical forest. *Journal of Tropical Forest Science*, 30 (2): 143-153. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.143153>.
- [39] Mbow C., 2009. *Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal*. Thèse de Doctorat d'Etat des Sciences. Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Dakar, Sénégal, 291 p.
- [40] Chisholm R.A., Muller-Landau H.C., Rahman K.A., Daniel P., Bebber D.P., Bin Y., Bohlman S.A., Bourg N.A., Brinks J., Bunyavejchewin S., Butt N., Cao H., Cao M., Cárdenas D., Chang L-W., Chiang J-M., Chuyong G., Condit R., Dattaraja HS., Davies S., Duque A., Fletcher C., Gunatilleke N., Gunatilleke S., Hao Z., Harrison R.D., Howe R., Hsieh C-F., Hubbell S.P., Itoh A., Kenfack D., Kiratiprayoon S., Larson A.J., Lian J., Lin D., Liu H., Lutz J.A., Ma K., Malhi Y., McMahon S., McShea W., Meegaskumbura M., Razman S.M., Morecroft M.D., Nytch C.J., Oliveira A., Parker G.G., Pulla S., Punchi-Manage R., Romero-Saltos H., Sang W., Schurman J., Su S-H., Sukumar R., Sun I-F., Suresh H.S., Tan S., Thomas D., Thomas S., Thompson J., Valencia R., Wolf A., Yap S., Ye W, Yuan Z. & Zimmerman JK., 2013. Scale-dependent relationships between tree species richness and ecosystem function in forests. *Journal of Ecology*, 101: 1214-1224. doi: 10.1111/1365-2745.12132.
- [41] Jucker T., Sanchez A.C., Lindsell J.A., Allen H.D., Amable G.S. & Coomes D.A., 2016. Drivers of aboveground wood production in a lowland tropical forest of West Africa: teasing apart the roles of tree density, tree diversity, soil phosphorus, and historical logging. *Ecology and Evolution*, 6 (12): 4004-4017. <https://doi.org/10.1002/ece3.2175>.
- [42] Coomes D.A., Flores O., Holdaway R., Jucker T., Lines E.R. & Vanderwel M.C., 2014. Wood production response to climate change will depend critically on forest composition and structure. *Global Change Biology*, 20: 3632-3645.
- [43] Mensah S., Veldtman R., Du Toit B., Glèlè Kakaï R. & Seifert T., 2016. Aboveground biomass and carbon in a South African mistbelt forest and the relationships with tree species diversity and forest structures. *Forests*, 7 (4): 1-17.