

# Evaluation du stock de carbone aérien de *Guiera senegalensis* J. F. Gmel en zone nord soudanienne du Burkina Faso

Titre Courant : Stock de carbone aérien de *Guiera senegalensis*

Abdoulaye TYANO<sup>1,2\*</sup>, Barthelemy YELEMOU<sup>2</sup>,  
Benoit Pa-wend-taoré KONTIEBO<sup>1</sup>, Mipro HIEN<sup>1</sup>

## Résumé

Dans le contexte de la REDD<sup>+</sup>, les estimations des stocks de carbone forestiers sont indispensables pour déterminer la contribution des espèces végétales à l'atténuation du changement climatique. Cela passe par l'estimation du potentiel de stock de biomasse des végétaux. La présente étude a été effectuée dans une jachère à dominance de *Guiera senegalensis* de 20 ans, installée sur un sol ferrugineux en zone nord soudanienne du Burkina Faso. La méthode directe a permis d'abattre 90 individus de *G. senegalensis* repartis en trois classes de circonférence représentant les juvéniles, les individus de la classe intermédiaire et les semenciers de l'espèce. La jachère de *G. senegalensis* stocke au niveau aérien en moyenne 0,82 ; 0,43 et 0,35 tC/ha respectivement pour les juvéniles, les individus de la classe intermédiaire et les semenciers. Il existe une forte corrélation entre la biomasse sèche de *G. senegalensis* et la circonférence à la base du tronc. Les équations retenues sont :  $Y = 0,16 * \text{Exp}(0,18 * Cb) - 0,19$  pour les juvéniles ;  $Y = 3,30 * \text{Log}_{10}(Cb) - 2,52$  pour les individus intermédiaires et  $Y = 20,67 * \text{Log}_{10}(Cb) - 20,33$  pour les semenciers. Ces équations établis dans peuvent être utilisées pour estimer les stocks de carbone de divers types de sujets de *G. senegalensis* en lieu et place des modèles multi-espèces.

**Mots clés** : stockage de carbone, changement climatique, *Guiera senegalensis*, équations allométriques

## Evaluation of the aerial carbon stock of *Guiera senegalensis* J.F. Gmel in the northern Sudanian zone of Burkina Faso.

### Abstract

In the REDD context estimates of forest carbon stocks are essential to determine the contribution of plant species to climate change mitigation. This involves estimating the biomass stock potential of plants. The present study was carried out in a 20-year old *Guiera senegalensis*-dominated fallow on a ferruginous soil in the northern Sudanian zone of Burkina Faso. Using the direct method, 90 individuals of *G. senegalensis* were felled in three circumference classes representing juveniles, individuals of the intermediate class and seedlings of the species. The *G. senegalensis* fallow stored an average of 0.82, 0.43 and 0.35 tC/ha aerielly for juveniles, intermediate class individuals and seedlings, respectively. There is a strong correlation between the dry biomass of *G. senegalensis* and the circumference at the base of the trunk. The equations used are:  $Y = 0.16 * \text{Exp}(0.18 * Cb) - 0.19$  for juveniles;  $Y = 3.30 * \text{Log}_{10}(Cb) - 2.52$  for intermediates and  $Y = 20.67 * \text{Log}_{10}(Cb) - 20.33$  for seedlings. These equations established in can be used to estimate carbon stocks of various types of *G. senegalensis* individuals in lieu of multi-species models.

**Key words**: Carbon storage, climate change, *G. senegalensis*, allometric equations

<sup>1</sup> Université Nazi Boni/Institut du Développement Rural (IDR), Laboratoire des systèmes Naturelles, des Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01

<sup>2</sup> Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)/Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), BP 10 Koudougou, Burkina Faso

\*Auteur correspondant : [tabdoulayemagloire@gmail.com](mailto:tabdoulayemagloire@gmail.com)

## Introduction

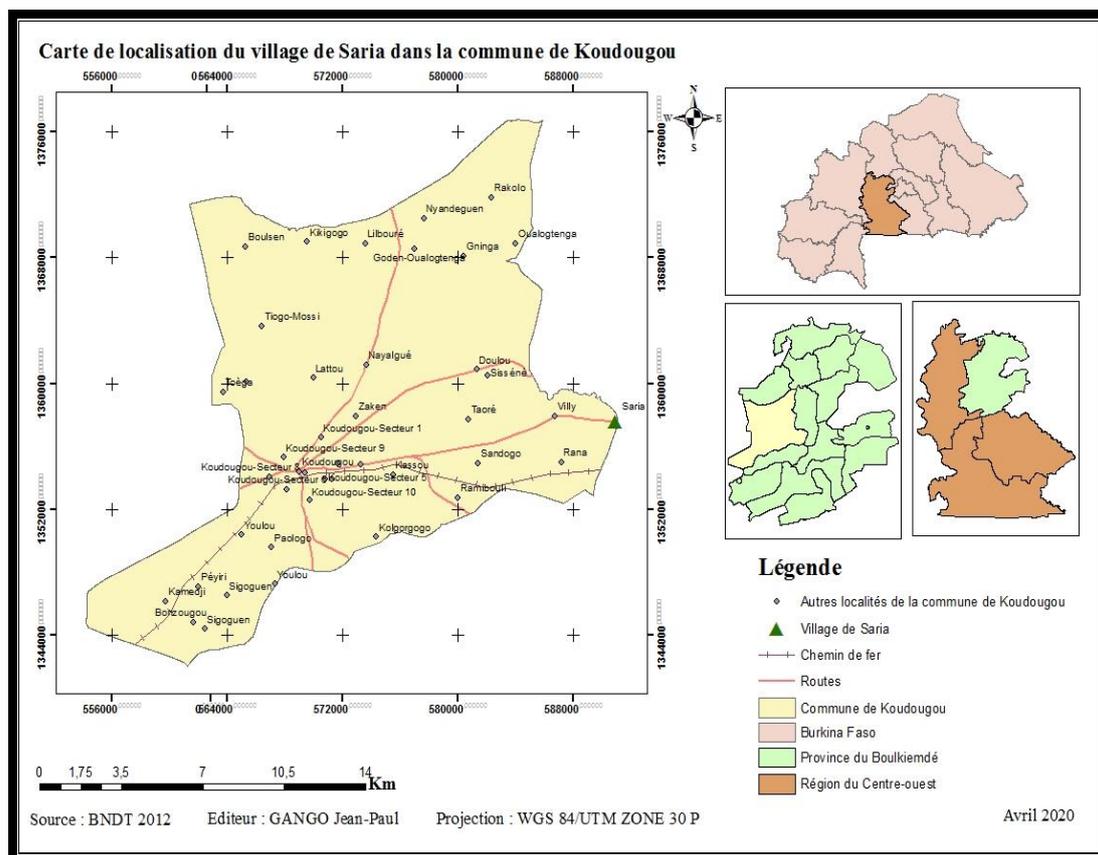
Les changements climatiques sont devenus inquiétants et suscitent des préoccupations sans cesse croissantes au sein de la communauté scientifique internationale. En effet, le réchauffement planétaire est sans équivoque et se manifeste par la hausse continue de la concentration du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique et de la température moyenne du globe, la forte variation des précipitations, l'accroissement de la fréquence des phénomènes extrêmes (inondation, sécheresse), la fonte des glaciers et l'élévation du niveau moyen de la mer (CIESLA, 1997 ; Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2013 ; AGO, 2016). Ce phénomène est essentiellement attribuable aux activités anthropiques marquées par l'utilisation des combustibles fossiles qui émettent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et par la déforestation (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007 ; CIAIS *et al.*, 2011). L'adaptation et l'atténuation sont deux stratégies complémentaires pour réduire et gérer les risques liés aux changements climatiques. L'atténuation repose sur une approche intégrée qui combine des mesures de réductions des émissions de gaz à effet de serre (GES) et l'accroissement des puits de carbone dans les secteurs terrestres (GIEC, 2013). Les forêts mondiales jouent, un rôle majeur dans la régulation du cycle du carbone et de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Elles renferment 53 % du carbone accumulé dans les écosystèmes terrestres (BOULIER et SIMON, 2010). Au cœur des négociations du protocole de Kyoto (TSAYEM, 2009), les forêts font aujourd'hui l'objet d'une vaste discussion autour des possibilités offertes par l'initiative de la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la déforestation et à la dégradation forestière (REDD) qui vise à compenser financièrement la non déforestation (TSAYEM, 2009). Ainsi de plus en plus les scientifiques sont sollicités afin de fournir des méthodes d'évaluation des quantités de carbone de divers types de formations et /ou d'espèces forestières (HENRY *et al.*, 2011 ; MASSAOUDOU *et al.*, 2015). Le développement du marché du carbone soutend une meilleure connaissance du potentiel de séquestration du carbone des végétaux. Dans les pays développés comme la suède, le canada, etc. cet exercice est à l'origine d'une meilleure protection de l'environnement (TSAYEM, 2009).

Au Burkina Faso, il existe de plus en plus des recherches sur les stocks de carbone des espèces végétales (SAVADOGO et ELFVING, 2007 ; SAWADOGO *et al.*, 2009 ; KOALA, 2016 ; DIMOBE, 2017, BAYERN *et al.*, 2020). Cependant, pour le cas particulier des espèces arbustives, il existe très peu de données sur leurs potentialités dans la séquestration du carbone. Il en est de même pour les équations allométriques permettant de prédire les quantités de carbones contenus dans les arbustes. Des équations pour l'estimation de la biomasse dans les systèmes de parcs agroforestiers sont rares (PELTIER *et al.*, 2007 ; KUYAH *et al.*, 2012). C'est pour pallier ces insuffisances que la présente étude a été initiée. Il a pour objectif d'évaluer le potentiel de séquestration de carbone par la biomasse aérienne de *G. senegalensis*, une espèce arbustive dominante de la zone nord soudanienne du Burkina Faso. Ces résultats pourraient permettre une meilleure connaissance de la contribution de cette espèce à la séquestration du carbone et à la lutte contre le réchauffement climatique. En outre, ils contribueront à la protection de cette espèce qui sont régulièrement émondées et/ou dessouchées lors de la préparation des champs (YELEMOU *et al.*, 2007).

## I. Méthodologie

### 1.1. Milieu d'étude

Cette étude a été conduite à la station de recherche de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) à Saria. Cette station est située à 23 km à l'Est de la ville de Koudougou et à 80 km au nord-ouest de Ouagadougou, la capitale du Burkina Faso (Figure 1). Le climat de la zone est de type nord soudanien. Les précipitations annuelles sont comprises entre 600 et 900 mm avec une moyenne de  $885,19 \pm 112,23$  mm pour les dix dernières années.



**Figure 1 : Situation de la zone d'étude**

## 1.2. Inventaire forestier, détermination de la biomasse aérienne et du carbone

L'étude a été menée en début du mois d'octobre 2019 dans une jachère à dominance de *G. senegalensis* au stade de leur développement foliaire maximal. Pour connaître la densité du peuplement, un inventaire exhaustif des pieds de *G. senegalensis* a été effectué dans 04 placettes de 2500 m<sup>2</sup> (50 m x 50 m) chacune. Les individus inventoriés ont été répartis en trois classes de circonférence à la base du tronc ( $C_{0,1}$ ) à savoir, la classe 1 représentée par la régénération ( $C_{0,1} < 10$  cm), la classe 2 présentant les sujets intermédiaires ( $10 \text{ cm} \leq C_{0,1} \leq 20$  cm) et la classe 3 comportant les semenciers ( $C_{0,1} > 20$  cm) (KOALA, 2016). Pour la détermination de la biomasse aérienne, la méthode directe a été utilisée et a consisté à l'abattage et aux pesées des arbustes pour l'obtention de leur biomasse réelle. Bien que cette méthode soit destructive et difficilement réalisable à grande échelle, elle reste la plus fiable pour l'estimation de la biomasse des arbres (HENRY *et al.*, 2011 ; TYANO *et al.*, 2019). Ainsi, la biomasse aérienne a été déterminée en abattant 90 pieds de *G. senegalensis*, soit 30 individus par classe choisis de façon aléatoire. Les paramètres dendrométriques ont été préalablement mesurés. Il s'agit de la circonférence du tronc à 0,1 m du sol à l'aide d'un ruban métrique, la hauteur totale à l'aide d'une perche graduée et le diamètre du houppier à l'aide d'un décimètre. La mesure du diamètre du houppier a été effectuée deux fois de façon croisée suivant les directions nord-sud et est-ouest. Pour les arbustes multicaules ou ramifiés, toutes les tiges ont été mesurées et les circonférences moyennes ont été calculées par la formule suivante :

$$C_{0,1} = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2}$$

Avec :

- $C_{0,1}$  : circonférence à 0,1 m de l'individu (cm);
- $n$  : nombre de tiges ;
- $C_i$  : circonférence à 0,1 m pour la tige  $i$  (cm) ;

Pour chaque individu échantillon, les biomasses des différents compartiments (tronc, branches, feuilles, brindilles) ont été séparés après l'abattage et le poids frais de chaque compartiment a été déterminé immédiatement sur le terrain par pesée à l'aide d'une balance (Sartorius ISO 9001). Plusieurs auteurs ont utilisé cette démarche avec succès pour déterminer la biomasse des différents compartiments des arbres (TYANO *et al.*, 2019 ; BAYERN *et al.*, 2020). Une fois les pesées de la biomasse fraîche effectuées, trois échantillons de 200 g de chaque réservoir par type de sujet ont été prélevés et pesés sur place à l'aide d'une balance de précision. Ces échantillons ont été transportés au laboratoire où les parties ligneuses et les feuilles ont été séchées à l'étuve respectivement à 105°C et à 70°C (PICARD *et al.*, 2012 ; YUSUFU, 2014 ; TYANO *et al.*, 2019), jusqu'à obtention d'un poids sec constant La biomasse sèche de chacun des compartiments de chaque arbuste a été obtenue par extrapolation de la biomasse sèche à la biomasse fraîche déterminée sur le terrain. Les taux de carbone des différents compartiments ont été déterminés en utilisant la méthode des cendres (CHAVAN et RASAL, 2011 ; DIEDHOU *et al.*, 2016 ; DIMOBE *et al.*, 2018). Cette méthode a d'abord consisté à un mélange des échantillons de biomasse sèche du tronc, des branches et des brindilles de chaque arbuste (biomasse ligneuse). Quant aux échantillons de feuilles, ils sont restés intacts. Trois échantillons de la biomasse ligneuse et trois échantillons de la biomasse foliaire par classe de sujet ont ensuite été prélevés, concassés et pilés séparément afin de les réduire en petits morceaux. Ces échantillons ont ensuite été broyés à l'aide d'un broyeur *Micro Hammer Mill Culatti*. Des échantillons de 1 g de chaque échantillon ont été prélevés pour effectuer des analyses chimiques au laboratoire. Chaque échantillon de 1 g a été mis dans des creusets en porcelaine dépourvus de couvercle et ces derniers ont été placés dans un four réglé à 550°C durant cinq heures jusqu'à la calcination. Après refroidissement, le creuset contenant la cendre a été pesé et le pourcentage de carbone organique a été calculé selon la formule suivante (ALLEN *et al.*, 1986) :  $\%Ce = \frac{(W3-W1)}{(W2-W1)} \times 100$  avec  $\%Ce$  : pourcentage de cendre ;  $W1$  : masse du creuset ;  $W2$  = masse de l'échantillon + masse du creuset ;  $W3$  = masse de la cendre + masse du creuset.

Le pourcentage du carbone a été alors déduit suivant la formule de ALLEN *et al.*, (1986) :  $\%C = (100\% - \%Ce) \times 0,58$  avec  $\%C$  : pourcentage du carbone ;  $0,58$  : teneur en carbone de la matière organique.

### 1.3. Analyse des données

#### 1.3.1. Biomasses sèches

Suivant la méthode utilisée par PICARD *et al.* (2012) et TYANO *et al.* (2019), les formules suivantes ont été utilisées pour calculer les biomasses sèches des différents compartiments de l'arbuste et la biomasse sèche totale du Pied :

- le taux de matière sèche de l'échantillon  $i$  :  $X_i = \frac{\text{Béchantillon sec } i}{\text{Béchantillon frais } i}$
- le taux de matière sèche moyen du compartiment :  $X_m = \frac{\sum X_i}{n}$
- la biomasse sèche du compartiment :  $B_s = X_m * B_f$
- la biomasse sèche aérienne :

$$B_s \text{ aérienne} = B_s \text{ tronc} + B_s \text{ Branches} + B_s \text{ Brindilles} + B_s \text{ Feuilles}$$

- la biomasse sèche moyenne d'un pied de *G. senegalensis* dans une classe donnée est :

$$Bms = \frac{Bst\ pied1 + Bst\ pied2 + \dots + Bst\ pied\ N}{N}$$

Avec :

- **Xi** : le taux de matière sèche de l'échantillon *i* ;
- **B échantillon sec *i*** : la biomasse sèche de l'échantillon *i* ;
- **B échantillon frais *i*** : la biomasse fraîche de l'échantillon *i* ;
- **Xm** : le taux de matière sèche moyen du compartiment ;
- **Bf** : la biomasse fraîche du compartiment ;
- **Bms** : la biomasse moyenne d'un pied de *G. senegalensis* dans une classe donnée ;
- **n** : le nombre d'échantillons ( $n = 5$ ) dans le cas de cette étude ;
- **N** : le nombre de pieds.

La biomasse à l'hectare a été obtenue en multipliant la biomasse moyenne par pied pour chaque classe de diamètre par la densité de pied de la classe correspondante.

### 1.3.2. Quantité de carbone

La quantité de carbone contenue dans la masse sèche correspond en moyenne à la moitié de La masse sèche (TYANO *et al.*, 2019). Le marché de carbone étant basé sur le CO<sub>2</sub> équivalent, la conversion du carbone en CO<sub>2</sub> est devenue obligatoire (Torres *et al.*, 2011). Pour aboutir au stock de carbone, les estimations de biomasse sont converties en valeurs de carbone à l'aide des fractions de carbone de la matière sèche. Ce facteur de conversion est de 50% par convention (GIEC, 2006). Cependant, il est recommandé d'utiliser des valeurs spécifiques si elles existent (MCGHEE *et al.*, 2016). Ainsi, à partir des fractions de carbone obtenues lors des analyses chimiques, il a été procédé au calcul du stock de carbone à l'aide de la formule suivante (DIMOBE *et al.*, 2018) :

$$Qc = Bs \times \%C$$

Avec :

- **Qc** : quantité du carbone du compartiment ;
- **Bs** : biomasse sèche du réservoir ;
- **%C** : fraction ou pourcentage de carbone.

Le stock de carbone par pied a été obtenu en sommant les stocks de carbone des différents réservoirs du pied :

$$QCt = (QC\ tronc + QC\ branches + QC\ brindilles + QC\ feuilles)$$

Le stock de carbone moyen d'un pied de *G. senegalensis* dans une classe donnée s'obtient par la formule suivante (TYANO *et al.*, 2019) :

$$Cbtm = \frac{Cbtpied1 + Cbtpied2 + \dots + CbtpiedN}{N}$$

### 1.3.3. Elaboration des équations allométriques

Les équations allométriques sont d'une importance capitale pour l'estimation de la contribution des formations forestières au cycle du carbone (PICARD *et al.*, 2012). L'ajustement d'un

modèle suppose d'une part, que les données sont déjà disponibles et mises en forme et d'autre part, que l'expression mathématique du modèle à ajuster est connue. Les paramètres dendrométriques retenus pour l'ajustement des modèles dans cette étude sont la circonférence à la base du tronc, la hauteur totale du pied et la surface du houppier. Aussi, les régressions linéaires ne donnant pas de bons résultats, avons-nous opté pour les modèles non linéaires. En effet, la régression non linéaire permet de modéliser des phénomènes complexes n'entrant pas dans le cadre de la régression linéaire. XLSTAT propose des fonctions préprogrammées parmi lesquelles l'utilisateur peut trouver le modèle décrivant le phénomène à modéliser. Tous les modèles non linéaires préprogrammés par Xlsat ont été testés et les modèles non linéaires suivants ont été retenus par ce plus performant dans le cadre de cette étude :

$$Y = pr1 * \text{Log}_{10}(X1) + pr2$$

$$Y = pr1 * \text{Exp}(pr2 * X1) + pr3$$

Y : biomasse sèche,

pr1, pr2, pr3 sont les paramètres du modèle

X1: paramètre dendrométrique utilisé pour ajuster le modèle (hauteur totale, circonférence à la base du tronc)

#### 1.3.4. Évaluation des modèles et tests statistiques

L'ajustement des modèles passe par la détermination des paramètres de précision et d'optimisation comme le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et les résidus du modèle (Picard et al., 2012). Pour chaque équation établie, le logiciel fournit les coefficients d'ajustement :

- le coefficient de détermination  $R^2$  : il permet d'avoir une idée globale de l'ajustement du modèle. Ce coefficient s'interprète comme le ratio de la variance expliquée par le modèle sur la variance totale. Il est compris entre 0 et 1 et plus il est proche de 1, meilleure est la qualité de l'ajustement. Nous nous sommes fixés 0,7 comme étant la valeur du  $R^2$  en dessous de laquelle, l'équation allométrique est rejetée ;
- la somme des carrés des erreurs (ou résidus) du modèle (SCE) : c'est la somme des carrés des valeurs résiduelles. Elle quantifie la variation des données non expliquées par le prédicteur (le paramètre dendrométrique). Plus la SCE finale est petite, mieux le modèle décrit la réponse (Biomasse) ;
- la moyenne des carrés des erreurs (ou résidus) du modèle (MCE) ; elle est mesurée en unités de la variable de réponse et représente la distance entre les valeurs de données et les valeurs ajustées. Plus elle est petite, mieux le modèle décrit la réponse.

Les résidus des modèles ont été soumis au test de normalité (Test de Shapiro-Wilk) au seuil de 5% pour vérifier la normalité des résidus :

- si p-value > 0,05, alors les résidus suivent la loi normale ;
- si p-value ≤ 0,05, alors les résidus ne suivent pas la loi normale.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique Xlstat (XLSTAT 2016.02.27444 Addinsoft, 2016).

## II. Résultats

### 2.1 Paramètres dendrométriques

Les individus Juvéniles échantillonnés ont une hauteur (h) moyenne 1,58 m (Tableau I). Quant aux individus de la classe intermédiaire, leur hauteur moyenne est de 1,29 m avec une circonférence moyenne à la base du tronc de 12,31. Les semenciers ont une hauteur de 3,71 m pour *G. senegalensis*

**Tableau 1** : Paramètres dendrométriques des arbustes échantillonnés

Paramètres	Juvéniles				Individus intermédiaires				Semenciers			
	Moy	SE	Min	Max	Moy	SE	Min	Max	Moy	SE	Min	Max
Hauteur (h, m)	1,58	0,43	1,00	2,00	2,54	0,43	1,10	3,50	3,64	0,43	2,55	4,86
Circonférence basale (C <sub>0,10</sub> , cm)	7,01	0,43	4,00	9,60	14,40	0,43	10,20	21,00	29,41	0,43	25,10	38,00
Diamètre houppier (D <sub>h</sub> , m)	1,03	0,43	0,56	1,95	1,82	0,43	1,16	3,50	3,22	0,43	2,31	5,73

### 2.2 Biomasses aérienne et quantité de carbone stockées

#### 2.2.1. Répartition de la biomasse aérienne en fonction des compartiments

Pour l'espèce *G. senegalensis*, c'est le tronc qui renferme la plus grande proportion de la biomasse sèche avec 37%, 42% et 44% respectivement pour les plus jeunes sujets, les sujets intermédiaires et les semenciers (Tableau II). Pour les sujets juvéniles ce sont les feuilles qui possèdent la deuxième plus grande proportion (29%), tandis que les branches occupent le second rang chez les individus de la classe intermédiaire (20%) et les semenciers (27%).

**Tableau II** : Répartition de la biomasse entre les différents pools du pied de *G. senegalensis*

Biomasse aérienne Compartiments	Classe de circonférence		
	Juvéniles	Individus intermédiaires	Semenciers
Tronc	37%	42%	44%
Branches	17%	20%	27%
Brindilles	18%	18%	15%
Feuilles	29%	20%	14%

#### 2.2.2. Teneur en carbone des compartiments

Les analyses chimiques montrent que les teneurs moyennes de carbone dans les organes de *G. senegalensis* sont environ 50% (Tableau III). Il n'existe pas de différence significative entre les différentes teneurs en carbone en fonction des organes et des types de sujet.

**Tableau III :** Teneur en carbone des différents compartiments en fonction des circonférences à la base du tronc

Organes	Carbone (%)		
	Classes de circonférence		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Tronc, branches, brindilles	55,98±0,37 <sup>a</sup>	55,70±0,98 <sup>a</sup>	56,65±0,64 <sup>a</sup>
Feuilles	54,87±0,33 <sup>a</sup>	54,06±0,85 <sup>a</sup>	55,19±0,93 <sup>a</sup>
K-W (p-value)	0,1565	0,1636	0,1825
Significativité	NS	NS	NS

**Légende :** Dans la même colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Kruskal-Wallis ; **NS** = non significatif

### 2.2.3. Quantité de biomasses et de carbone stockées

Les individus juvéniles de *G. senegalensis*, renferment en moyenne  $1,48 \pm 0,76$  tonnes de matière sèche à l'hectare au niveau de la partie aérienne (Tableau IV). La quantité de carbone stockée dans cette matière sèche est d'environ  $0,82 \pm 0,42$  tonnes. Cette quantité est significativement supérieure à celle emmagasinée intermédiaires ( $0,43 \pm 0,09$  tonnes). Les semenciers stockent  $0,16 \pm 0,02$  tonnes de carbone à l'hectare.

**Tableau IV :** Biomasses sèches et quantités de carbone

Quantités Classe de circonférence	Biomasse aérienne (tMS ha <sup>-1</sup> )	Carbone aérien (tC ha <sup>-1</sup> )
Juvéniles	1,48±0,76 <sup>a</sup>	0,82±0,42 <sup>a</sup>
Individus intermédiaires	0,78±0,17 <sup>b</sup>	0,43±0,09 <sup>b</sup>
Semenciers	0,62±0,06 <sup>c</sup>	0,35±0,03 <sup>c</sup>
KW (p-value)	0,3173	0,3173
Significativité	HS	HS

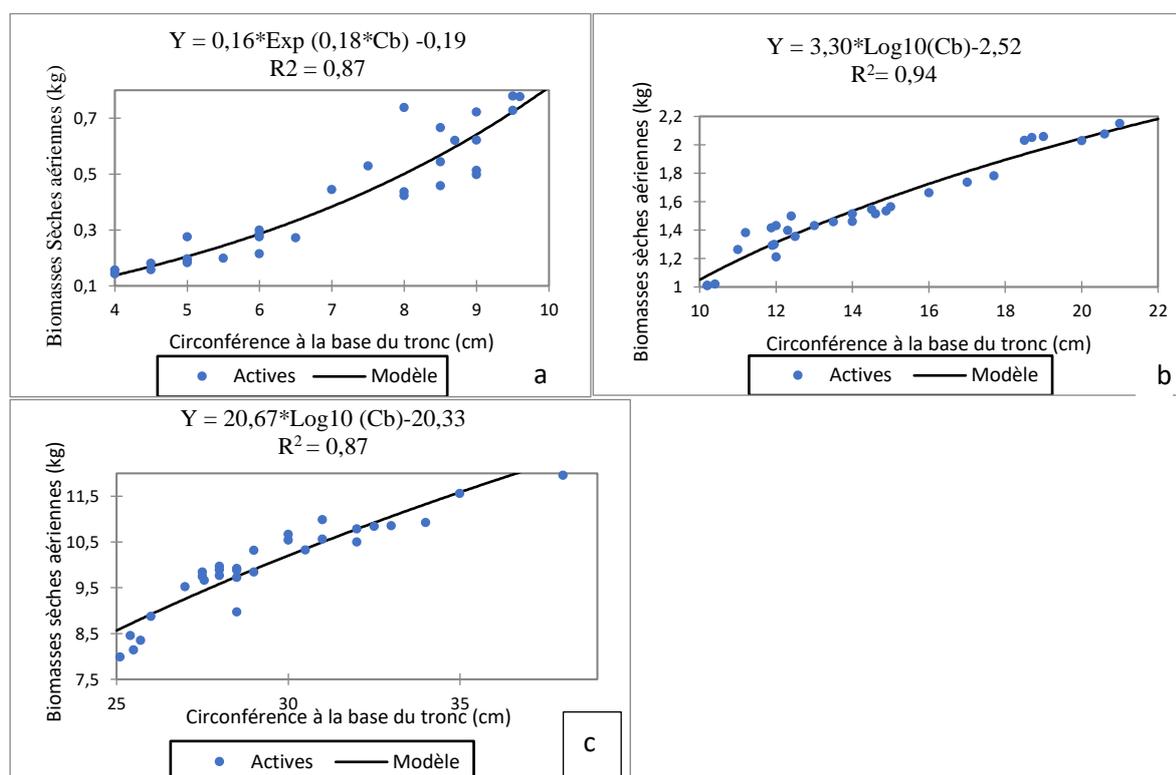
**Légende :** Dans la même colonne, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% selon le test de Kruskal-Wallis ; **tMS ha<sup>-1</sup>** = tonne de matière sèche à l'hectare ; **tC ha<sup>-1</sup>** = tonne de carbone stocké à l'hectare ; **HS** = hautement significatif ; **NS** : non significatif

### 2.3 Equations allométriques

Pour l'espèce *G. senegalensis*, c'est la circonférence à la base du tronc qui est le plus corrélée à la biomasse aérienne de pied pour tous les types de sujets (Tableau V). Les équations retenues sont :  $Y = 0,16 * \text{Exp}(0,18 * Cb) - 0,19$  pour les juvéniles ;  $Y = 3,30 * \text{Log}_{10}(Cb) - 2,52$  pour les individus intermédiaires et  $Y = 20,67 * \text{Log}_{10}(Cb) - 20,33$  pour les semenciers. Les nuages de points des équations retenues s'ajustent bien aux courbes de régressions (Figure 2).

**Tableau V :** Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne de *G. senegalensis*

Type de Sujets	Formules	R <sup>2</sup>	SCE	MCE	p-value
Juvéniles	$Y = 1,59 * \text{Log}_{10}(\text{Cb}) - 0,90$	0,75	1,67	0,01	0,03
	$Y = 2,19 * \text{Log}_{10}(\text{H}) - 2,56 \wedge (-3)$	0,83	0,22	0,008	0,15
	<b><math>Y = 0,16 * \text{Exp}(0,18 * \text{Cb}) - 0,19</math></b>	<b>0,87</b>	<b>0,17</b>	<b>0,006</b>	<b>0,17</b>
	$Y = -9,04 * \text{Exp}(-8,18 \wedge (-2) * \text{H}) + 8,36$	0,86	0,18	0,07	0,15
Individus intermédiaires	<b><math>Y = 3,30 * \text{Log}_{10}(\text{Cb}) - 2,52</math></b>	<b>0,94</b>	<b>0,18</b>	<b>0,007</b>	<b>0,1</b>
	$Y = 2,51 * \text{Log}_{10}(\text{H}) + 0,54$	0,7	0,95	0,03	0,004
	$Y = -1325325 * \text{Exp}(-1,40 * \text{Cb}) + 1,63$	0,41	1,79	0,06	0,003
	$Y = -17,89 * \text{Exp}(-3,54 \wedge (-2) * \text{H}) + 17,97$	0,82	0,57	0,02	0,03
Semenciers	<b><math>Y = 20,67 * \text{Log}_{10}(\text{Cb}) - 20,33</math></b>	<b>0,87</b>	<b>3,52</b>	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>
	$Y = 14,16 * \text{Log}_{10}(\text{H}) + 2,09$	0,86	3,79	0,13	0,09
	$Y = -9,12 \wedge (26) * \text{Exp}(-2,42 * \text{Cb}) + 10,20$	0,44	15,08	0,55	0,49
	$Y = -18,60 * \text{Exp}(-0,41 * \text{H}) + 14,14$	0,86	3,72	0,13	0,29
Ensemble des types de sujets	$Y = 13,74 * \text{Log}_{10}(\text{Cb}) - 11,79$	0,77	378	4,29	0,001
	$Y = 19,93 * \text{Log}_{10}(\text{H}) - 3,60$	0,64	592,69	6,73	0,0001
	$Y = -282,14 * \text{Exp}(-1,54 \wedge -3 * \text{Cb}) + 278,85$	0,91	139,33	1,6	0,0001
	$Y = 6,33 * \text{Exp}(0,27 * \text{H}) - 9,58$	0,76	396,95	4,56	0,46



**Figure 2 :** Courbes d'ajustement des modèles retenus pour la biomasse aérienne de *G. senegalensis*

**a :** juvéniles de, **b :** individus intermédiaires, **c :** semenciers

### III. Discussion

#### 3.1. Quantités de biomasses et de carbone

Le stock de carbone est proportionnel à la phytomasse et évoluerait dans le même sens que la masse de la végétation (IBRAHIMA et FANTA, 2008). Les quantités de carbone aérien stockées diffèrent selon les classes de circonférence. Les valeurs trouvées ont été de l'ordre de 0,82 tC/ha pour les jeunes sujets ; 0,43 et 0,35 tC/ha respectivement pour la classe intermédiaire et les semenciers. Au Sénégal, LUFABA *et al.* (2008) ont trouvé en moyenne pour *G. senegalensis*, 0,2 tC/ha au niveau aérien. Les quantités de carbone aérien obtenues dans la présente étude sont supérieures à celles obtenues par LUFABA *et al.* (2008). Ces résultats pourraient être liés aux conditions climatiques de notre site d'étude marquées par des précipitations annuelles (600 – 900 mm) supérieures à celles de leur site d'étude (540 mm). Dans ces conditions, les sujets ont d'abord installé leur partie souterraine au détriment de la partie aérienne. TYANO *et al.* (2019) ont remarqué dans notre zone d'étude que les pieds de 15 ans, 5 ans et 3 ans de *Piliostigma reticulatum* stockent respectivement 15 ; 1,86 et 0,014 tC/ha au niveau épigé. Ces quantités sont de loin supérieures à celles obtenues au cours de la présente étude pour les semenciers ( $0,35 \pm 0,03$ ) et la classe intermédiaire ( $0,43 \pm 0,09$ ) mais restent inférieures pour les jeunes individus ( $0,82 \pm 0,42$ ). Pour les pieds de 15 ans et 5 ans, les valeurs obtenues peuvent être expliquées par les densités de leur plantation pour chaque tranche d'âge (1100 pieds/ha). Ces densités sont largement supérieures à celles obtenues dans notre étude. Plus la densité est élevée, plus la quantité de carbone est élevée. Cela signifierait que *G. senegalensis* comporterait un fort potentiel de carbone. Les différences obtenues pour les petits sujets pourraient être dues au fait que les individus de *G. Senegalensis* de la présente étude sont issus d'une jachère tandis que les pieds de *P. reticulatum* qui ont fait l'objet de leur étude sont issus d'une plantation. Les pieds issus de la jachère proviendraient de rejets de souche disposant d'un système racinaire déjà développé favorisant la nutrition minérale tandis que l'installation des individus issus de plantation requiert plus de temps. Nos résultats corroborent néanmoins ceux obtenus par QASIM *et al.* (2016). Ces auteurs ont trouvé dans les formations savanicoles du Ranch de gibier de Nazinga, des quantités de carbone de l'ordre de 0,24 à 3,01 tC/ha. Par contre, nos résultats sont largement inférieurs à ceux obtenus par IBRAHIMA ET FANTA (2008). En effet, ces auteurs ont obtenu des quantités de carbone allant de 81,48 à 118,36 tC/ha dans les savanes soudano-guinéennes de Ngaoundéré au Cameroun. Ces différences pourraient être attribuées aux conditions climatiques. Pour ces auteurs, les savanes de Ngaoundéré présentent des conditions climatiques semblables à celles des savanes humides et sont situées entre les forêts tropicales humides du Sud et les savanes sèches du nord du Cameroun. Or d'après RUBIO (2009), la capacité de stockage du carbone est plus élevée dans les savanes humides que dans les savanes sèches.

#### 3.2. Equations allométriques

L'aptitude d'un modèle allométrique à estimer la biomasse d'un arbre varie d'une espèce à l'autre (BOGNOUNOU *et al.*, 2008 ; BOGNOUNOU *et al.*, 2013). KOALA (2016) a trouvé en zone nord soudanienne du Burkina Faso que le diamètre à hauteur de poitrine permet de bien estimer la biomasse racinaire de *Vitellaria paradoxa*. Dans le cadre de la présente étude ce paramètre n'a pas été utilisé du fait de la morphologie arbustive des individus étudiés. Les équations allométriques spécifiques sont préférables aux équations globales d'une communauté. En effet la densité du bois et l'architecture des arbres varient d'une espèce à une autre (KETTERINGS *et al.*, 2001). Une équation par espèce améliore de 12,5 % l'efficacité de l'estimation de la biomasse par rapport à une équation globale d'une communauté de ligneux (NAVAR *et al.*, 2004). Les tests réalisés pour la validation d'une équation allométrique sont nombreux et divers dans la littérature. Pour M'BOW (2009), l'évaluation des modèles est un

exercice délicat, dans la mesure où il n'y a pas de méthode de procédure standard. Les étapes sont nombreuses et connexes et ne peuvent être déconnectées du processus de mise en place de modèles forestiers (VANCLAY ET SKOVSGAARD, 1996). Un modèle doit être évalué à travers des tests quantitatifs qui cherchent à prouver qu'il est suffisamment bon pour prédire un facteur donné. Néanmoins le tout premier paramètre à prendre en compte dans l'évaluation des équations allométriques est le coefficient de détermination  $R^2$ . Les modèles avec un  $R^2$  élevé conduisent à des résidus (écarts entre le modèle et les valeurs observées) très faibles. C'est la raison pour laquelle, les équations allométriques établies au cours de cette étude ont été sélectionnées d'abord à partir de la valeur du  $R^2$ . Les équations ayant un  $R^2$  inférieur à 75% ont été rejetées. BAYERN *et al.* (2020) ont établi des équations allométriques pour *Senegalia dudgeoni*, *Senegalia gourmaensis*, *Vachellia nilotica* et *Vachellia tortilis* au Burkina Faso. La performance de leurs modèles a été testée à travers le  $R^2$ , l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur relative moyenne (MRE) et l'erreur de prédiction absolue moyenne (MAPE). KOALA (2016) pour l'élaboration d'équations allométriques pour *Anogeissus leiocarpa*, *Detarium microcarpum*, *Piliostigma thonningii* et *Vitellaria paradoxa* a testé les modèles à travers la distribution normale des résidus, le  $R^2$ , l'erreur standard. Selon cet auteur, le meilleur modèle est celui qui minimise le biais et maximise  $R^2$ . KONARE *et al.* (2019) au Mali ont testé les équations allométriques qu'ils ont élaborées pour la biomasse foliaire de *Azelia africana*, *Ficus gnaphalocarpa* et *Pterocarpus erinaceus* à travers la valeur du  $R^2$  seulement. Dans la présente étude, un effort a été réalisé dans les tests de robustesse des équations allométriques. Ainsi, la validation des équations a été réalisée à travers le  $R^2$ , la somme des carrés des erreurs (ou résidus) du modèle (SCE), la moyenne des carrés des erreurs (ou résidus) du modèle (MCE) et la distribution normale des résidus. La qualité d'une équation dépend aussi du nombre de pieds utilisé pour son établissement. Ce nombre de pieds utilisé pour l'établissement des équations allométriques varie beaucoup dans la littérature. Il y a des équations établies avec plus de 100 pieds (BELLEFONTAINE *et al.*, 1997 ; BAZILE 1998 ; SAWADOGO *et al.*, 2010), des équations établies avec 30 à 50 sujets (CISSE *et al.*, 1980 ; GUENDEHOU *et al.*, 2012 ; KOALA *et al.*, 2016) et des équations établies avec moins de 20 sujets (MANZO *et al.*, 2015 ; LAWANOU *et al.*, 2010 ; CHAIBOU *et al.*, 2012 ; KONARE *et al.*, 2019).

## Conclusion

La présente étude avait pour objectif d'évaluer le potentiel de stockage de carbone de *par la* biomasse aérienne de *G. senegalensis* en vue de contribuer à la réduction des émissions de  $CO_2$  dues à la déforestation. L'estimation de la biomasse renseigne que la mise en jachère d'arbres est une stratégie efficace pour améliorer le stock de carbone des agrosystèmes. Les régressions ont été développées avec comme prédicteur de biomasse, la hauteur totale et la circonférence à la base du tronc. Plusieurs équations ont été établies et l'évaluation des équations a permis de conclure sur leur robustesse. Les modèles retenus tiennent compte des conditions locales et serviront à l'ajustement de la biomasse de ces espèces au lieu d'utiliser les modèles exogènes qui sont inadaptés. Ils peuvent être utilisés pour estimer la biomasse de ces espèces par classe de sujet (juvéniles, individus de la classe intermédiaire et semenciers).

Ces résultats renseignent sur le potentiel de séquestration de carbone de la biomasse aérienne de l'espèce. L'application des modèles doit tenir compte de la gamme de paramètres dendrométriques utilisés pour chaque espèce et les caractéristiques éco-climatiques de la zone d'étude.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Fondation Internationale pour la Science (FIS) pour le soutien financier reçu pour la réalisation de cette étude.

## Références bibliographiques

ADDINSOFT (2016). Xlsat. <https://www.xlstat.com>.

AGO E. E. (2016). Dynamique des flux de carbone entre l'atmosphère et des écosystèmes ouest-africains : cas des forêts et savanes sous climat soudanien au Bénin. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 184p.

ALLEN S. E., GRIMSHAW H.M. and ROWLAND A. P., 1986. Chemical analysis. *In Methods in Plants Ecology. Blackwell Scientific Publications.* 285-344.

BAYEN P., NOULÈKOUNE F., BOGNOUNOU F., LYKKE A. M., DJOMOG A., LAMERSC J. P. A. AND THIOMBIANO A. (2020). Models for estimating aboveground biomass of four dryland woody species in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 180 (2020) 104205. 1-11.

BAZILE, D. (1998). La gestion des espèces ligneuses dans l'approvisionnement en énergie des populations, cas de la zone soudanienne du Mali-volume 2. Université de Toulouse-le-Mirail, Toulouse.

BELLEFONTAINE R. (2005). Pour de nombreux ligneux, la reproduction sexuée n'est pas la seule voie : analyse de 875 cas. *Sécheresse*, 16(4): 315-317.

BOGNOUNOU F., SAVADOGO M., BOUSSIM I. J. ET GUINKO S. (2008). Équations d'estimation de la biomasse foliaire de cinq espèces ligneuses soudanaises du Burkina Faso. *Sécheresse*, 19(3) : 201-205.

BOGNOUNOU F., OUÉDRAOGO O., ZERBO I., SANOU L., RABO M., THIOMBIANO A. AND HAHN K. 2013. Species-specific prediction models to estimate browse production of seven shrub and tree species based on semi-destructive methods in savannah. *Agroforestry Systems*, 8 : 1053-1063.

BOULIER J. et SIMON L. (2010). Les forêts au secours de la planète : quel potentiel de stockage du carbone ? *L'Espace Géographique*, 309-324.

CHAIBOU M., FAYE B., ALI M. et VIAS G. (2012). Evaluation du potentiel fourrager aérien du bassin laitier d'Agadez au Niger en Afrique de l'Ouest. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*. Numéro 71–Juin 2012.

CHAVAN B. L. AND RASAL G.B., 2011. Potentiality of Carbon Sequestration in six years ages young plants from University campus of Aurangabad. *Global Journal Research in Engineering*. 11 (7) : 15-20.

CIAIS P., BOMBELLI A., WILLIAMS M., PIAO S.L., CHAVE J., RYAN C.M., HENRY M., BRENDER P. and VALENTINI R., 2011. The carbon balance of Africa : synthesis of recent research studies. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* 369 : 2038-57.

CIESLA M. W., 1997. Le changement climatique, les forêts et l'aménagement forestier : aspects généraux. Rome, Italie, FAO, 139 p.

DIEDHOU I., DIALLO D., MBENGUE A., HERNANDEZ R. R., BAYALA R., DIEME R., DIEDHIOU P. M. AND SENE A. (2016). Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of *Jatropha curcas* L. in Senegal's Peanut Basin. *Biomass and Bioenergy*, 21 p.

DIMOBE K. (2017). Dynamique, séquestration de carbone et modèles de variations des savanes soudanaises du Burkina Faso et du Ghana (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique,

Spécialité Sciences et Phytoécologie, Laboratoire Biologie/Ecologie Végétale, Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso, 179 p

GIEC., 2013. Résumé à l'intention des décideurs, changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni et New York, USA, 204 p.

GIEC 2006. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Kangawa, Japon, 93 p.

GUENDEHOU G. H. S., LEHTONEN A., MOUDACHIROU M., MÄKIPÄÄ R. ET SINSIN B. (2012). Modèles de biomasse et de volume des tiges d'espèces d'arbres tropicaux sélectionnées en Afrique de l'Ouest, Southern Forests. *Journal of Forest Science*, 74:2, 77-88.

HENRY M., PICARD N., TROTTA C., MANLAY R.J., VALENTINI R., BERNOUX M. and SAINT-ANDRÉ L., 2011. Estimating tree biomass of sub-saharan African forests : a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45 :477-569.

KETTERINGS Q. M., COE R., VAN NOORDWIJK M., AMBAGAU Y. AND PALM C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3) : 199-209

KOALA J., SAWADOGO L., SAVADOGO P., AYNEKULU E., HEISKANEN J. AND SAÏD M. (2017). Allometric equations for below-ground biomass of four key woody species in West African savanna-woodlands. *Silva Fennica* , 51(3) :16-31.

KONARE D., COULIBALY L. ET SANGARE H. (2019). Équations allométriques pour l'évaluation de la biomasse foliaire de trois espèces ligneuses fourragères. Cas de *Azelia africana*, *Ficus gnaphalocarpa* et *Pterocarpus erinaceus*, des parcours naturels du cercle de Kéniéba au Sud-Ouest du Mali. *Revue Africaine des Sciences Sociales et de la Santé Publique*, Volume (1) N°2, 29-52

KUYAH S., DIETZ J., MUTHURI C., JAMNADASS R., MWANGI P., COE R. AND NEUFELDT H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Aboveground biomass. *Agric Ecosyst Environ* 158 : 216-224.

LARWANOU M., YEMSHAW Y. AND SAADOU M. (2010). Prediction models for estimating foliar and fruit dry biomasses of five Savannah tree species in the West African Sahel. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6) : 2245-2256.

LUFABA A., BOLTE J., WRIGHT D., KHOUMA M., DIEDHIOU I., DICK R. P., KIZITO F., DOSSA E. AND NOLLER J. S. (2008). Regional carbon stocks and dynamics in native woody shrub communities of Senegal's Peanut Basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73 (3) : 260-266.

MANZO L. O., MASSAOUDOU M., ISSOUFOU H. B. A., ABDOULAYE D., MOROU B., YOUSSEFI S., MAHAMANE A. ET PAUL R. (2015). Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne de *Faidherbia albida* (Del.) Achev dans les agrosystèmes d'Aguié, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4) : 1863-1874.

MBOW C. (2009). Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat, Institut des Sciences de l'Environnement, ISE, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 291 p.

MASSAOUDOU M., LARWANOU M. AND MAHAMANE S. (2015). Allometric Equations for Biomass Estimation of Woody Species and Organic Soil Carbon Stocks of Agroforestry Systems in West African : State Of Current Knowledge. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry* 2(10) : 19-33.

- MCGHEE W., SAIGLE W., PADONOU E. A. ET LYKKE A. M. (2016). Méthodes de calcul de la biomasse et du carbone des arbres en Afrique de l'Ouest. *Annales des Sciences Agronomiques* 20, spécial Projet Undesert-UE : 79-98.
- NAVAR J., MENDEZ E., NAJERA A., GRACIANO J., DALE V. AND PARRESOL B. (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *J Arid Environ* 59 : 657-674.
- PELTIER R. (2019). Quelle place pour l'agroforesterie dans l'avenir des forêts tropicales ? Bois et Forêts des Tropiques. Volume 341-3e trimestre-juillet 2019-p. 3-4.
- PICARD N., ANDRE L. S. 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. Rome, Montpellier, CIRAD et FAO, 220 p.
- QASIM M., POREMBSKI S., SATTTLER D., STEIN K., THIOMBIANO A. and Lindner A.; 2016. Vegetation Structure and Carbon Stocks of Two Protected Areas Within the South Sudanian Savannas of Burkina Faso, West-Africa. *Environments*, 25(3) : 1-30.
- RUBIO M., 2009. Forêts et cycle du carbone. In Rendez-vous techniques, Guyane, Office national des forêts. 30-34.
- SAVADOGO P. AND ELFVING B. (2007). Prediction models for estimating available fodder of two savanna tree species (*Acacia dudgeoni* Craib ex Holland and *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile) based on field and image analysis measures", *African Journal of Range and Forage Science*, 24(2) : 63–71. DOI : 10.2989/AJRFS.2007.24.2.2.156.
- SAVADOGO S., OUÉDRAOGO A. AND THIOMBIANO A. (2010). Perception, Mode of Management and Vegetation of Sacred Woodlands in Northern Burkina Faso. *Flora et Vegetatio Sudano-Sambesica*, 13, pp. 10–21. doi: 10.21248/fvss.13.11
- SAVADOGO L., SAVADOGO P., TIVEAU D., DAYAMBA S., ZIDA D., NOUVELLET Y., ODEN P. AND GUINKO S. (2009). Allometric prediction of above-ground biomass of eleven woody tree species in the Sudannia savanna-woodland of West Africa. *Journal of Forestry Research*, 21(4) : 475-481.
- TSAYEM D. M. (2009). Le protocole de Kyoto, le clivage Nord-Sud et le défi du développement durable. Espace Géographique, Éditions Belin, 2009, pp.139-156.
- TORRES C. M. M., JACOVINE L. A. G., TOLEDO D. P., SOARES C. P. B., RIBEIRO S. C. and MARTINS M. C., 2011. Biomass and carbon stock in *Jatropha curcas* L. *Scientific Information System*, 17 (3) : 353-359.
- TYANO A., YELEMOU B., HIEN M. ET KOALA J., 2019. Evaluation du stock de carbone aérien de *Piliostigma reticulatum* (DC.) en zone soudanienne du Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*. 144 : 14784-14800.
- YELEMOU B., YAMEOGO G., MILLOGO-RASOLODIMBY J. ET HIEN V., 2007. Germination sexuée et dynamique de développement de *Piliostigma reticulatum* (D.C.) Hochst, une espèce agroforestière du Burkina Faso. *Sécheresse*. 18(3) : 185-192.
- YUSSUFU E. K., 2014. Carbone stocké dans un essai de provenances d'*Acacia mangium* Willd à Ibi Village sur le plateau des Batéké en République Démocratique du Congo. Mémoire de Maitrise, Université Laval, Québec, Canada, 89 p.