

Modèle allométrique d'estimation du carbone aérien séquestré par *Balanites aegyptiaca* (L.) Del dans la partie Sud-Ouest du Niger

Salissou ADAMOU^{1*}, Abdou AMANI², Harouna MAIGUIWA MAHAMADOU¹
et Aissetou DRAME YAYE¹

¹ Faculté d'Agronomie de l'Université Abdou Moumouni (UAM) de Niamey, Niger

² Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (IRAN)

* Correspondance, courriel : djikalissou1@gmail.com

Résumé

Cette étude vise à élaborer un modèle spécifique de quantification de la biomasse aérienne et d'évaluer le potentiel de séquestration de carbone de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del par la méthode non destructive. Un échantillon de 240 carottes prélevées sur 120 arbres de différents diamètres a été placé au laboratoire à l'étuve à 105°C pendant 48 heures jusqu'à la stabilité du poids. Le taux d'humidité observé varie de 17 % à 78 % et la densité de 0,44 g/cm³ à 0,90 g/cm³ avec une moyenne de 0,64 g/cm³. Six modèles ont été élaborés : trois avec la biomasse sèche totale, deux avec la biomasse du fût et un avec la biomasse branche. La quantité moyenne de carbone aérien séquestré dans les sites s'élève à 14,66 t/ha à Sansani Haoussa, 6,85 t/ha à Tamou et 6,71 t/ha à Torodi. Cette étude peut être utilisée pour évaluer la biomasse aérienne et la capacité de séquestration de carbone de *Balanites aegyptiaca* (au Niger; elle contribue aussi à combler le gap de données sur l'atténuation de la Contribution Déterminée Nationale (CDN).

Mots-clés : *Balanites aegyptiaca*, échantillonnage non destructif, équation allométrique, carbone, Niger.

Abstract

Allometric model for estimating of above ground carbon sequestered by *Balanites aegyptiaca* (L.) Del in the southwestern part of Niger

This study aims at developing a specific model for the quantification of the above-ground biomass that is used to assess the carbon sequestration potential of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. by the non-destructive method. A sample of 240 carrots from 120 trees of different diameters was collected and placed in the laboratory in the oven at 105°C for 48 hours until the weight stabilizes. The humidity ranged from 17 % to 78 % and the density from 0.44 g/cm³ to 0.90 g/cm³ with an average of 0.64 g/cm³. Six models were developed among which three with total biomass, two with bole biomass and one with branch biomass. The amount of carbon per hectare in the sites is 14.66 t/ha in Sansani Hausa, 6.85 t/ha in Tamou and 6.71 t/ha in Torodi. The amount of carbon per hectare is 14.66 t / ha in Sansani Hausa, 6.85 t / ha in Tamou and 6.71 t/ha in Torodi. This study can be used to assess the above ground biomass and the capacity of carbon sequestration of *Balanites aegyptiaca*. It can also contribute to filling in the gap in data on the attenuation of the National Determined Contribution (NDC of Niger).

Keywords : *Balanites aegyptiaca*, Non-destructive sampling, Carbon stock, Niger.

1. Introduction

La Septième Conférence des Parties (COP 7) tenue à Marrakech en 2001, souligne la séquestration de carbone par les formations végétales comme une option pertinente pour atténuer le taux de carbone dans l'atmosphère. La diversité des écosystèmes et forêts font de l'Afrique un véritable réservoir de biomasse [1] qu'il est difficile de conserver à cause d'une déforestation en faveur des activités agricoles ou pour satisfaire d'autres besoins énergétiques. Au Sahel, les parcs agroforestiers constituent les formations végétales qui assurent des rôles écologiques et socioéconomiques, et constituent une importante source de séquestration de carbone [2, 3]. Il s'avère essentiel d'évaluer la quantité de carbone dans les forêts mais aussi dans les parcs agroforestiers afin de comprendre le rôle de ces derniers et notamment leur potentiel de séquestration. Les mesures des stocks de carbone forestier prennent une importance accrue pour les pays qui projettent de contribuer à l'atténuation des changements climatiques via leurs activités forestières. Plusieurs modèles ont été développés en Afrique de l'Ouest [2, 4 - 8] pour faciliter l'estimation du carbone et la compréhension de la contribution des différents écosystèmes à l'atténuation du changement climatique. Pour la plupart des études sur la biomasse, le choix du modèle a été fait en utilisant le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) uniquement [9] ; le DHP et la hauteur totale [10] ; le DHP, la densité du bois et la hauteur totale [11, 12] ont eu à développer des équations allométriques applicables à certaines espèces ligneuses d'Afrique subsaharienne dont *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. Les équations qui considèrent la hauteur et le diamètre ont une meilleure prédiction du volume et de biomasse de l'arbre [8]. Au Niger, des équations allométriques ont été développées à travers la méthode destructive des arbres [13 - 15]. Ce travail par contre s'appuie sur une méthode non destructive d'évaluation qui n'exige pas l'abattage des arbres échantillons. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel de séquestration de carbone aérien de *Balanites aegyptiaca* dans la partie Sud-ouest du Niger. De façon spécifique, il s'agit de : (i) déterminer la densité et l'humidité du bois ; (ii) développer un modèle spécifique de biomasse en utilisant l'approche de l'échantillonnage non destructive ; (iii) estimer la quantité de carbone aérien stocké par *Balanites aegyptiaca* en utilisant les modèles d'évaluation développés.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

La présente étude a été réalisée dans 3 communes de la région de Tillabéry (**Figure 1**): Torodi (N 13°08'605", E : 1°45'852"), Kourtheye (Sansani Haoussa, N : 13°50'957", E : 001°37'235") et Tamou Kaina (N : 12°46'159", E : 002°11395). Le choix des communes a été guidé par les critères suivants : le type du climat de la localité, l'abondance de pieds de *Balanites aegyptiaca* et les activités socio-économiques développées autour de l'espèce.

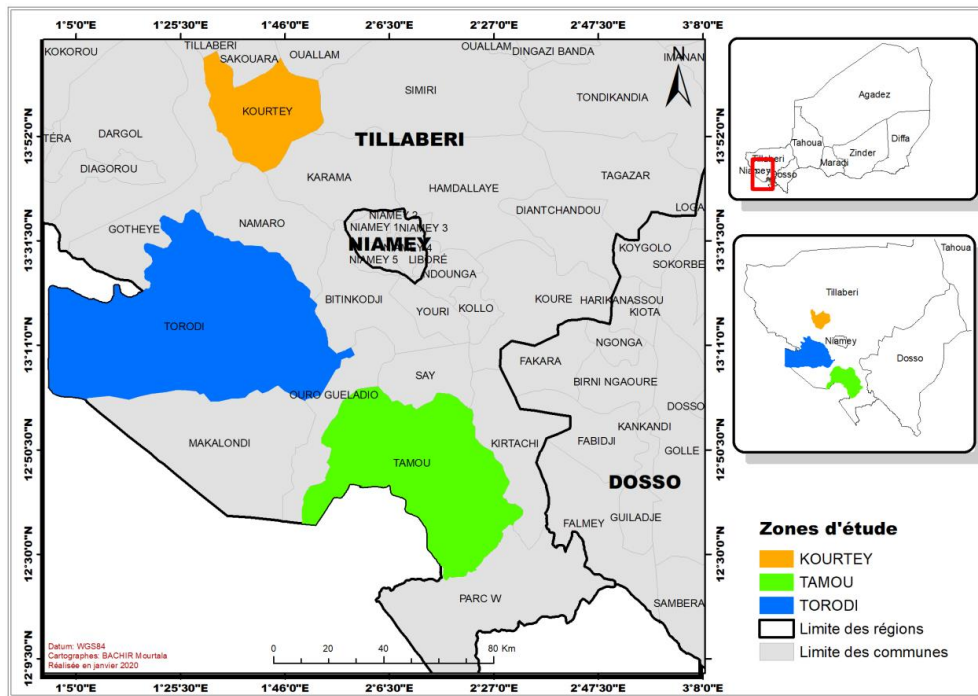


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2-2. Méthodes

2-2-1. Inventaire, échantillonnage et choix des individus

Des inventaires ont été réalisés dans les parcs à *Balanites aegyptiaca*. Les dimensions des placettes inventoriées varient en fonction du type de végétation rencontré. Au total 48 placettes ont été investiguées dont 26 placettes de 50 m x 50 m dans les parcs agroforestiers et 22 placettes de 50 m x 20 m dans les savanes. L'analyse de la structure en classes de diamètre des ligneux a été faite sur la base de 383 pieds de *Balanites aegyptiaca* collectés. L'échantillonnage non-destructif par le prélèvement de carottes à l'aide de la tarière de Pressler a porté sur 120 arbres répartis en 4 classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) : [5-25] ;] 25-45] ;] 45-65] ;] 65-85]. Ces 120 arbres échantillonnés sont également répartis sur les trois sites, à raison de 40 arbres par site, respectant une distance d'au moins 100 m entre deux pieds qui se suivent.

2-2-2. Prélèvement et séchages des échantillons

Les paramètres dendrométriques mesurés sont le diamètre du tronc à la base (D_{base}), à 20 cm du sol (D_{20}) et à 1,30 m du sol (D_{130}), l'envergure du houppier et la hauteur totale. Pour les branches, seuls les diamètres des deux extrémités ainsi que leur longueur ont été mesurés. Les diamètres ont été mesurés à l'aide du compas forestier et la hauteur totale de l'arbre au moyen d'un clinomètre. Il a été également prélevé pour chaque arbre-échantillon des carottes à 1,30 m et à 2,30 m avec la tarière de Pressler. Au total 240 carottes ont été collectées et sont séchées à l'étuve au laboratoire à une température de 105°C pendant 72 heures jusqu'à la stabilité de la masse de la carotte. La masse sèche a été mesurée à l'aide d'une balance électronique de précision de marque Sartorius Pratum I24-IS et la densité anhydre calculée par le rapport de la masse sèche au volume frais.

2-2-3. Traitement et analyse des données

2-2-3-1. Taux d'humidité et densité du bois

La densité du bois est le rapport de la biomasse sèche (séchage à l'étuve jusqu'à stabilisation de la masse sèche) sur le volume frais du bois [16]. La densité à l'état anhydre (D_a) est donnée par *l'Equation (1)*:

$$D_a = \frac{\text{Masse à l'état anhydride}}{\text{Volume à l'état frais}} \quad (1)$$

Le taux d'humidité (H%) est donné par *l'Equation (2)*:

$$H (\%) = \frac{(M_f - M_s)}{M_f} * 100 \quad (2)$$

M_f et M_s sont respectivement la masse fraîche et la masse sèche de l'échantillon.

2-2-3-2. Estimation de volume, de biomasse et du carbone

Le volume du bois du tronc et des branches a été calculé par la formule du tronçon de cône ou formule de Newton [16] décrit par *l'Equation (3)*.

$$V = (3,14 * h / 12) * ((d_1^2 + d_2^2 + (d_1 * d_2))) \quad (3)$$

V = volume de la section, h = hauteur, d₁ et d₂ les diamètres de deux extrémités.

La biomasse aérienne de chaque arbre est calculée en multipliant la densité de base du bois par le volume de l'arbre.

$$\text{Biomasse aérienne observée} = \text{volume total de l'arbre} \times \text{la densité du bois} \quad (4)$$

Dans les études non destructives, le contenu du carbone le plus communément utilisé est celui recommandé par le [17], c'est-à-dire 0,47. Ainsi le carbone contenu dans la biomasse a été calculé en utilisant *l'Equation (5)*:

$$CA = B \times F_c \quad (5)$$

où CA représente le carbone emmagasiné dans la biomasse (Kg C ha⁻¹), B la biomasse (Kg ha⁻¹) et F_c le facteur de conversion (47 %).

$$\text{Quantité de carbone} = \text{Biomasse sèche} \times 0,47 \quad [17]. \quad (6)$$

2-2-4. Elaboration des modèles

La construction des modèles après épurement des données a comporté trois étapes : l'ajustement, la sélection et la validation des modèles. L'analyse statistique a été effectuée avec le logiciel R [18]. Plusieurs fonctions linéaires de volume et biomasse, utilisant comme variables les hauteurs, D₂₀, D₁₃₀, de la tige ont été testés. Les modèles ont été ajustés selon des régressions linéaires par la méthode des moindres carrés ordinaires

(MCO) dont les conditions d'application selon [19] sont : (i) la significativité des coefficients (test t de Student) ; (ii) la significativité globale du modèle (Test F de Fisher) ; (iii) la normalité des résidus (test de Shapiro wilk) ; (iv) l'indépendance des résidus (test de Durbin Watson) ; (v) l'homoscédasticité des résidus (test de Breusch Pagan) ; (vi) la moyenne nulle des résidus (Test univarié de moyenne nulle) ; (vii) la linéarité entre la variable expliquée et la ou les variables explicatives (test de RESET de non linéarité). En général, les données biologiques telles que les biomasses sont hétéroscedastiques, d'où la nécessité de log-transformer les variables pour respecter les conditions de normalité et d'homoscédasticité. Cependant, la log-transformation entraîne une sous-estimation de la biomasse [11], mais elle est corrigée en multipliant la biomasse par un coefficient de correction (CF) dont la **Formule** est :

$$CF = e^{(RSE^2/2)} \quad (7)$$

RSE est l'écart type résiduel. Trois critères ont été utilisés pour sélectionner les meilleurs modèles ajustés : (i) Le critère d'information d'Akaike (AIC) : le meilleur modèle est celui qui a l'AIC le plus faible ; (ii) l'écart type résiduel (RSE) : le meilleur modèle est celui qui a le RSE le plus faible ; (iii) le coefficient de détermination ajusté (R^2) : le R^2 ajusté traduit à la fois la qualité de l'ajustement et la complexité du modèle. Sa valeur varie de 0 à 1. La valeur proche de 1 indique un bon ajustement du modèle. La validation des modèles a été faite avec la biomasse de 30 individus indépendants prévus à cet effet. Trois approches complémentaires utilisant comme critères, le test de Student sur les données appariées, la régression linéaire simple et l'erreur de prédiction ont été utilisées [13]. Pour tester la consistance du modèle, des échantillons de 30 individus indépendants ont été utilisées. Le modèle élaboré avec la biomasse totale a été comparé à 3 modèles existants, celui de [9,11, 20].

2-2-5. Evaluation du stock de carbone aérien

Le stock de carbone aérien a été évalué en utilisant le modèle validé prenant en compte la densité de la population de *Balanites aegyptiaca* dans les différents sites. La biomasse totale obtenue est multipliée par le taux 47 % de carbone pour trouver le stock carbone des sites.

3. Résultats

3-1. Humidité et densité du bois de *Balanites aegyptiaca*

L'humidité du bois de *Balanite aegyptiaca* n'est pas uniforme dans chaque partie de l'arbre et varie en fonction des sites et du niveau de prélèvement de la carotte (**Tableau 1**). Les taux d'humidité les plus élevés en moyennes ont été observés au niveau 2,30 m du sol comparativement à ceux obtenus au niveau 1,30 m du sol dans le fut de l'arbre.

Tableau 1 : Taux d'humidité (%) en fonction de la hauteur de prélèvement des carottes

Site	Taux d'humidité (%) par niveau de prélèvement de la carotte		
		à 1,3 m du sol	à 2,3 m du sol
Tamou	Min	43,59	48,11
	Max	142,86	75,18
	Moyenne $\pm \sigma$	62,10 \pm 14,67	60,99 \pm 6,18
Sansani Haoussa	Min	10,17	50
	Max	68,33	65,89
	Moyenne $\pm \sigma$	57,56 \pm 14,11	58,27 \pm 4,77
Torodi	Min	48,46	50
	Max	81,72	71,76
	Moyenne $\pm \sigma$	58,92 \pm 7,51	61,17 \pm 5,99

Il ressort que la moyenne de cette densité est de $0,66 \pm 0,05$ (g/cm³) avec une variation de 0,57 g/cm³ à 0,74 g/cm³ à 2,30 m du sol. La densité du bois de *Balanites aegyptiaca* varie faiblement le long du tronc de l'arbre. Globalement, la densité moyenne du bois de *Balanites aegyptiaca* est de 0,64 g/cm³ (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Densité du bois en fonction de la hauteur de prélèvement de la carotte (g/cm³)

Site	Densité (g/ cm ³) par niveau de prélèvement de la carotte		
		à 1,3 m du sol	à 2,3 m du sol
Tamou	Min	0,45	0,57
	Max	0,73	0,74
	Moyenne $\pm \sigma$	0,66 \pm 0,05	0,66 \pm 0,04
Sansani Haoussa	Min	0,55	0,53
	Max	0,74	0,9
	Moyenne $\pm \sigma$	0,63 \pm 0,04	0,64 \pm 0,06
Torodi	Min	0,56	0,54
	Max	0,71	0,82
	Moyenne $\pm \sigma$	0,63 \pm 0,04	0,63 \pm 0,05

3-2. Ajustement et sélection des modèles

Les modèles sélectionnés ont respecté les conditions de la normalité, de l'indépendance, de l'homoscédasticité et de la moyenne nulle des résidus (P-value supérieure à 0,05) (**Tableau 3**). De plus, les coefficients estimés des modèles sont très hautement significatifs ($P < 0,001$) ce qui a été traduit par une significativité globale ($P < 0,001$). Les modèles M1, M2 et M3 élaborés avec la biomasse totale et M1 et M2 élaborés avec la biomasse du fût ont les valeurs de AIC et de RSE les plus faibles et les valeurs de R² ajusté les plus fortes. Le modèle M1 élaboré avec la biomasse de branches montrent les valeurs de AIC et de RSE plus grande.

Tableau 3 : Caractéristiques des modèles de biomasse retenus

Taille échantillon	N°	Type de modèle de biomasse aérienne sèche totale (kg)	Significativité des coefficients		TSG	TNR	THR	TIR	TLR	TNMR	R ² ajusté	RSE	AIC	
			a	b										F
Biomasse Totale														
90	M1:	$M1 : \ln Y = a + b \cdot \ln D_{130}$	-2,29799***	2,22487***	F _{1,88} 7719	p < 0,001	0,334	0,286	0,795	0,417	0,978	0,988	0,104	-148,819
	M2	$\ln Y = a + b \cdot \ln (D_{20}^2 H)$	-2,94108***	0,92874***	F _{1,88} 2142	p < 0,001	0,463	0,270	0,535	0,290	0,999	0,96	0,194	-36,032
	M3	$\ln Y = a + b \cdot \ln (D_{130}^2 H)$	-2,41388***	0,89267***	F _{1,88} 2517	p < 0,001	0,271	0,268	0,560	0,399	0,989	0,966	0,179	-50,029
Biomasse du Fût														
50	M1	$\ln Y = a + b \cdot \ln D_{130}$	-1,94818***	1,97745 ***	F _{1,48} 580,2	p < 0,001	0,6347	0,561	0,234	0,098	0,913	0,922	0,273	15,864
	M2	$\ln Y = a + b \cdot \ln (D_{20}^2 H)$	-2,76972***	0,84898***	F _{1,48} 551,3	p < 0,001	0,4164	0,682	0,155	0,1451	0,934	0,918	0,279	18,219
Biomasse des branches														
50	M1	$\ln Y = a + b \cdot \ln D_{20}$	-5,6079***	2,7807 ***	F _{1,48} 471,9	p < 0,001	0,412	0,095	0,175	0,878	0,985	0,906	0,398	53,659

'***' Très hautement significatif ; AIC : Akaike information criterion D_{20} diamètre à 20 cm du sol, D_{130} ; Diamètre à 1,30 m du sol ; H : hauteur totale de l'arbre ; RSE : Residual standar error ; TIR : Test d'Indépendance des résidus ; TNR : Test de normalité des résidus ; TNMR : Test de la nullité de la moyenne des résidus ; THR : Test d'homoscédasticité des résidus ; TLR : Test de la linéarité de la relation entre la variable expliquée et la variable explicative ; TSG : test de significativité globale ; P : P-value à l'issue du test statistique ; F : Statistique de Fisher.

3-3. Validation des modèles de biomasse élaborés

Six modèles allométriques spécifiques de *Balanites aegyptiaca* ont été validés (**Tableau 4**). Le coefficient de détermination ajusté R^2 issu de la régression simple ($y = ax + b$) entre les valeurs observées et les valeurs prédites a varié de 0,89 à 0,98 pour les modèles de biomasse totale. Il est de 0,91 à 0,95 pour les modèles de biomasse fût ainsi que celui des Branches. L'erreur d'estimation varie de -0,54 à 5,57 pour l'ensemble des modèles mais cette erreur n'est pas significative car toutes les valeurs de P-values sont supérieures à 0,05 (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Critères de validation des modèles

Modèle	t	P	R ² ajusté	EF	Somme de masses (kg)		Erreur (%)
					MP	MO	
Biomasse totale							
M1	-1,305	0,2023	0,98	0,97	11100,15	10735,22	3,40
M2	-0,843	0,4064	0,89	0,83	11333,64	10735,22	5,57
M3	-0,849	0,4031	0,93	0,92	11158,06	10735,22	3,94
Biomasse du fût							
M1	0,194	0,8473	0,95	0,953	4799,93	4826,10	-0,54
M2	-0,058	0,9541	0,90	0,873	4839,01	4826,10	0,27
Biomasse des branches							
M1	-1,092	0,2838	0,98	0,974	3289,11	3189,09	3,14

EF : Efficacité de la modélisation ; *MP* = Masse prédite ; *MO* = Masse observée ; *P* : P-value à l'issue du test de Student apparié ; *t* : Statistique de Student à l'issue du test de Student apparié.

Les résultats du Test de Student apparié au seuil de 5 % sur les données de l'échantillon de validation indiquent qu'il n'existe aucune différence significative entre la masse observée (mesurée) et la masse prédite par ces modèles (p -value > 0,05) et que la fiabilité prédictive de ces modèles est consistante. Les valeurs de l'efficacité de modélisation (EF) très proches de celles des coefficients de détermination confirment la qualité prédictive de ces modèles. Les valeurs des erreurs de prédiction des modèles montrent, selon le signe de l'erreur, des surestimations (signe positif) et des sous-estimations (signe négatif). Mais ces sous-estimations et surestimations ne sont pas significatives vu que la p -value du test de Student apparié est supérieure à 0,05 pour l'ensemble des modèles. En général, les valeurs de l'erreurs des modèles de biomasse totale M1, M2 et M3 présente les plus grandes valeurs contrairement aux valeurs des erreurs du modèle M2 élaboré avec la biomasse du fût et le modèle élaboré avec biomasse de branches. La transformation inverse exponentielle des formes logarithmiques des modèles a donné des modèles de type puissance ($y = cx^b$) (**Tableau 5**). Cette relation allométrique traduit une variation de b % de la biomasse à chaque variation de 1 % de la variable explicative. Toutes valeurs de b (coefficient d'allométrie) supérieures à 1 indiquent une concavité des courbes.

Tableau 5 : Récapitulatif des modèles de biomasse de *Balanites aegyptiaca* validés

Nombre d'individus	N° Modèle	Formule logarithmique Modèle de biomasse sèche (kg)	Modèle puissance de biomasse sèche (kg)
Biomasse sèche totale			
90	M1	$\ln Y = -2,29799 + 2,22487 * \ln D_{130}$	$Y = 0,101 * (D_{130})^{2,225}$
	M2	$\ln Y = -2,94108 + 0,92874 * \ln (D_{20}^2 H)$	$Y = 0,054 * (D_{20}^2 H)^{0,929}$
	M3	$\ln Y = -2,41388 + 0,89267 * \ln (D_{130}^2 H)$	$Y = 0,091 * (D_{130}^2 H)^{0,893}$
Biomasse Fût			
50	M1	$\ln Y = -1,94818 + 1,97745 * \ln D_{130}$	$Y = 0,1479 * (D_{130})^{1,977}$
	M2	$\ln Y = -2,76972 + 0,84898 * \ln (D_{20}^2 H)$	$Y = 0,0652 * (D_{20}^2 H)^{0,849}$
Biomasse Branches			
50	M1	$\ln Y = -5,6079 + 2,7807 * \ln D_{20}$	$Y = 0,0040 * (D_{20})^{2,781}$

D₂₀ : Diamètre à 20 cm du sol ; *D₁₃₀* : Diamètre à 1,30 m du sol, *H* : hauteur totale de l'arbre

3-4. Représentation graphique des modèles

La représentation graphique des modèles de forme puissance révèle des relations allométriques traduites par des courbes concaves M1 issue de la biomasse totale, M1 issue de la biomasse fût et M1 issue de la biomasse branche (**Figures 2, 3 et 4**). Cette concavité de ces courbes signifie que les coefficients d'allométrie sont supérieurs à 1.

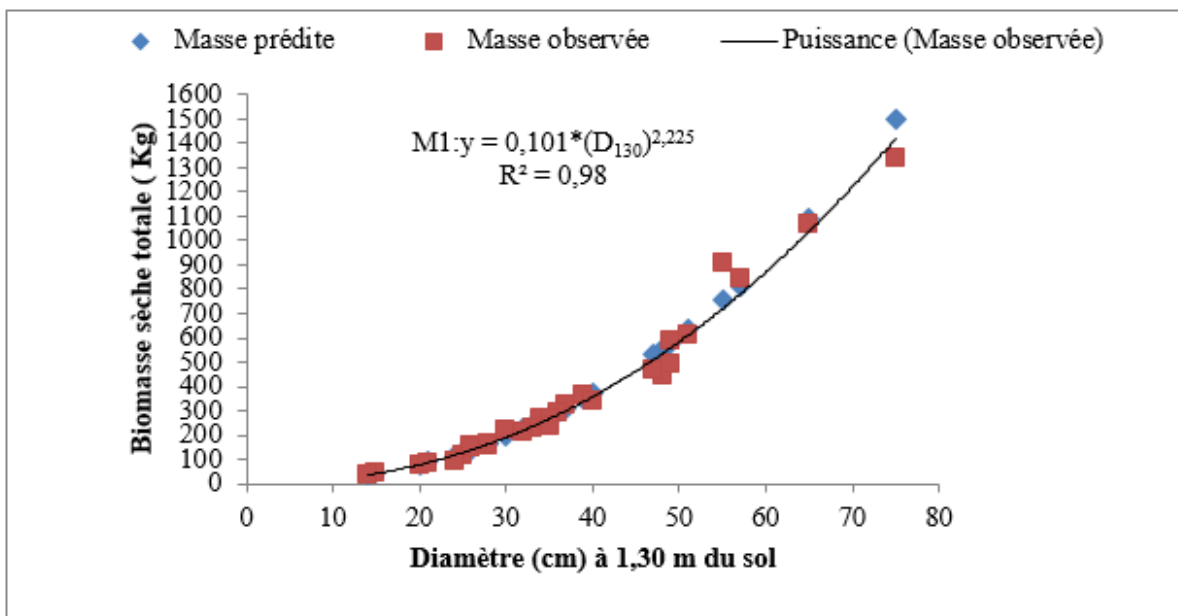


Figure 2 : Représentation graphique du modèle M1 élaborés avec la biomasse sèche totale

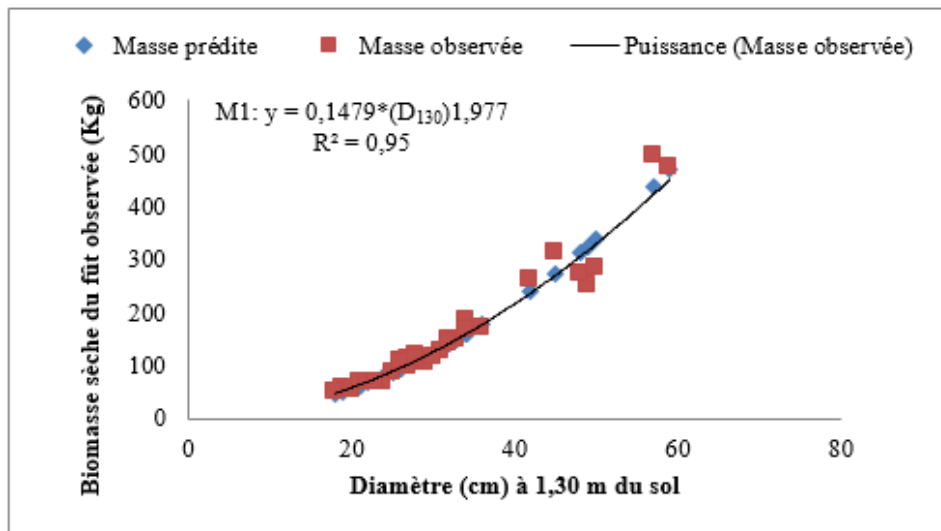


Figure 3 : Représentation graphique du modèle M1 élaboré avec la biomasse du fût

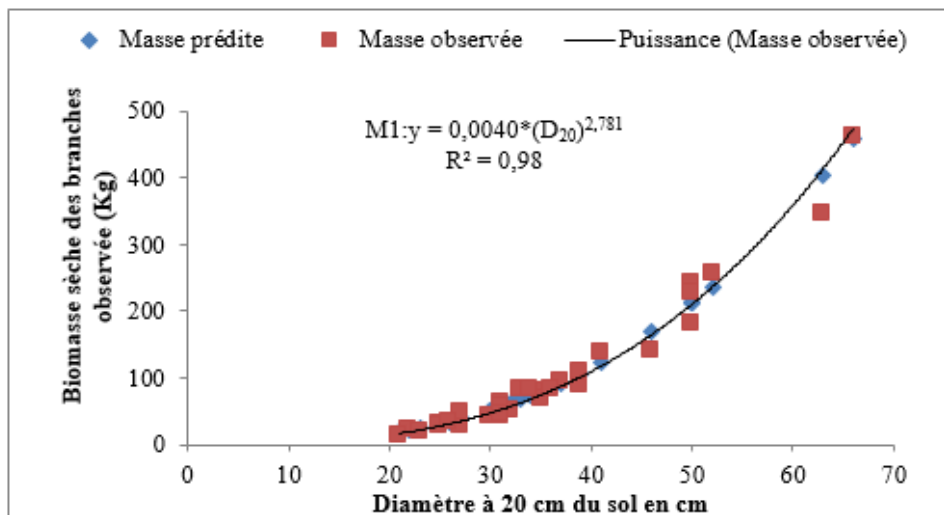


Figure 4 : Représentation graphique de modèle M1 élaboré avec la biomasse des branches

3-5. Evaluation de carbone aérien

Les résultats de l'estimation du stock total de carbone aérien de l'espèce sont en moyenne égaux à 152,48 kg/pied (**Tableau 6**). La biomasse moyenne par arbre est de 322,24 kg à Torodi, 418,58 kg à Sansani Haoussa et 256,19 kg à Tamou. La capacité de séquestration de carbone par arbre est évaluée en moyenne à 151,45 kg à Torodi, 196,73 kg à Sansani Haoussa et 120,41 kg à Tamou. Étant donné que des densités de la population de *Balanites aegyptiaca* au niveau des sites de Torodi, Sansani Haoussa et Tamou sont respectivement de 45,23 pieds/ha, 74,52 pieds/ha et 55,71 pieds/ha, les quantités de biomasse sèche en tonne/hectare respectives de 14,57 ; 31,19 et 14,27 ont été obtenues. Pour ce qui est de la quantité de carbone séquestrée, les valeurs de 14,66 t/ha ont été obtenues à Sansani Haoussa, 6,85 t/ha à Torodi et 6,71 t/ha à Tamou. Ceci donne, une quantité de carbone séquestré à l'hectare plus élevée au niveau du site de Sansani haoussa que dans les deux autres sites. Cette différence s'explique par la différence de la densité de la population de *Balanites aegyptiaca* au niveau des différents sites (**Tableau 6**).

Tableau 6 : Estimation du stock du carbone aérien par site

Site	Densité de la population (pieds/ha)	Biomasse moyenne par pieds (kg)	Carbone moyenne par pieds (Kg)	Biomasse t/ha	Taux de carbone (t/ha)
Torodi	45,23	322,24	151,45	14,57	6,85
Sansani Haoussa	74,52	418,58	196,73	31,19	14,66
Tamou	55,71	256,19	120,41	14,27	6,71

t/ha : tonne/hectare

3-6. Comparaison avec les modèles existants

Les caractéristiques de ces modèles sont déclinées ci-dessous (**Tableau 7**).

Tableau 7 : Caractéristiques des modèles allométriques comparés au modèle M1 de la biomasse sèche totale

Type de modèle	Formation végétale et zones climatiques	Variables explicatives (cm)	Variable réponse et compartiment	Intervalle de validité (cm)	n, R ² adj	RSE	Auteurs
Pantropical toutes espèces	Forêts sèches mexicaines P < 900 mm	D = Dbh	Y (kg) ; BA	4-112	n non indiqué ; 0,92	Non indiqué	Brown (1997)
Equation	$Y = 21,297 - 6,953(D) + 0,740(D^2)$						
Pantropical toutes espèces	Forêts sèches mexicaines indiennes P > 900 mm	D = Dbh	Y (kg) ; BA	5-63,4	404 ; 0,97	0,32	Chave et al., 2005
Equation	$Y = \rho * \exp[-0,667 + 1,784 \ln(D) + 0,207(\ln(D))^2 - 0,0281(\ln(D))^3]$						
Générique	Rain forests	D = Dbh H = hauteur (m)	Y (kg) ; BA		4004 ; R ² non indiqué		Chave et al., 2014
Equation	$Y = 0,0673 \times (\rho \times D^2 H)^{0,976}$						

n : Taille de l'échantillon ; RSE : Residual standard error ; Dbh : Diamètre à hauteur de poitrine ; BA : Biomasse aérienne ; ρ : Densité anhydre du bois ; la densité moyenne du bois africain (0,6 g/cm³) (GIEC, 2006) a été utilisée dans le modèle de Chave et al (2005)

L'analyse comparative des modèles existants et du modèle M1 élaboré (**Tableau 9**) sur l'échantillon de 30 données indépendantes a montré que le modèle générique de [20] a donné des estimations non biaisées (p-value supérieure à 0,05). Par contre, les modèles pantropicaux de [9] et de [11] n'ont pas fourni des estimations fiables (p-value inférieure à 0,05).

Tableau 9 : Comparaison de la prédiction du modèle M1 élaboré et des modèles existants avec des données indépendantes

Paramètres statistiques	Masse Observée (kg)	Masses (kg) prédites par les modèles			
	Échantillon de validation (30 arbres)	Brown (1997)	Chave et al. (2005)	Chave et al., (2014)	Modèle M1
	10735,22	27404	26507,42	11764,33	11100
P-value		p < 0,001	p < 0,001	p = 0,10	p = 0,20
Erreur (%)		155	147	-8,75	3,4

E: erreur de prédiction ; P : P-value à l'issue du test de Student apparié

4. Discussion

4-1. Humidité et densité du bois de *Balanites aegyptiaca*

Le taux d'humidité et la densité anhydre sont deux caractéristiques physiques importantes et interdépendantes et qui varient en fonction des stations, de l'état du peuplement, de l'espèce et de la partie de l'arbre [2, 16]. Dans la présente étude, le taux humidité du bois et la densité ont varié en fonction des sites et du niveau de prélèvement de la carotte. Les moyennes du taux d'humidité les plus élevés ont été observés au niveau 2,30 m du sol tandis que la densité du bois n'a pas varié dans le fût. L'humidité varie donc de la base vers le sommet de l'arbre. Cette variation de l'humidité est confirmée par les résultats de [13] selon lesquels le taux d'humidité des Combrétacée varie suivant le gradient fût, branche et feuille. Cette croissance de la teneur en eau de l'arbre est due à la décroissance de la lignine dont la teneur décroît dans le sens fût-branche rameaux [21]. La densité moyenne du bois du tronc de l'arbre, varie faiblement par site et par niveau du prélèvement. Elle a varié de 0,5 à 0,90 g/cm³ pour l'ensemble des sites avec une moyenne de 0,64 g/cm³. Cette valeur de la moyenne de la densité confirme celle (0,63 g/cm³) trouvée par [17]. Ces résultats sont comparables à ceux de certaines études sur la densité du bois en Afrique notamment celle de nombreuses espèces dans les forêts d'Afrique subsaharienne où [12] ont trouvé une gamme de densité entre 0,15 et 1,2 g/cm³. Dans les parcs agroforestiers du Cameroun [24] ont noté une densité du bois de karité (*Vitellaria paradoxa*) de 0,62 g/cm³.

4-2. Modèles allométriques de biomasse

La méthode non destructive de la présente étude a été appliquée sur un échantillon de 120 individus. La taille de l'échantillon dans l'élaboration des modèles allométriques est variable, dans la littérature, et tient compte des ressources et du temps alloué à l'étude [16]. Des modèles allométriques ont été élaborés avec un nombre d'arbres supérieur à 100 [9, 11, 22]. Cependant d'autres modèles portaient essentiellement sur un nombre d'arbres inférieur à 20 [23 - 26]. [6, 27] ont utilisé respectivement selon les espèces des arbres de diamètres inférieurs à 17,509 cm et 41,5 cm pour établir les équations allométriques. Les modèles puissances ont été retenu dans cette étude comme ils sont les plus fréquemment utilisés dans beaucoup de synthèses réalisées

en Europe par [28], en Afrique subsaharienne par [12] et en Afrique Australe par [29]. Il ressort de l'analyse des données que les 6 modèles ont chacun un coefficient de détermination R^2 ajusté proche de 1 et répondent aux différents tests statistiques préliminaires. Les valeurs de RSE ont varié par rapport à celles du RSE de 0,10 à 0,39 ; et celles de l'AIC de -148,8 à 15,9. Ces critères sont pris individuellement ou ensemble dans le choix des meilleurs modèles par beaucoup d'auteurs. Il s'agit notamment de [30] qui a construit des équations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne des arbres sur les terres agricoles et dont les sélections ont été faites sur la base de critère 'information d'Akaike (AIC). Pour [28] la sélection était basée principalement sur la faible valeur de l'erreur résiduelle standard (RSE). Pour chaque modèle élaboré, la RSE est inférieure à 0,19 tout comme la RSE de certains de modèles M1 et M3 élaborée avec la biomasse sèche totale. Dans cette étude, les meilleurs modèles ont des faibles valeurs de RSE et AIC. Ce résultat corrobore celui de [31], qui sélectionnaient des modèles de tarifs de cubage en combinant la RSE à l'AIC. Pour ces auteurs, le meilleur modèle est celui ayant la plus faible valeur de l'AIC et de la RSE.

4-3. Comparaison avec les modèles existants et évaluation du stock de carbone aérien

Pour tester la consistance du modèle M1, il a été comparé à trois modèles existants (équations de [20]). Les résultats de la comparaison du modèle M1 avec les trois modèles évoqués ci-dessus ont démontré que le modèle M1 présente une estimation sans biais (P -value $> 0,05$) de même qu'avec le modèle générique de [20]. L'erreur de prédiction du modèle M1 est de 3,4 % contrairement à celle du modèle générique de [20] qui est de -8,75 %. Ces valeurs de l'erreur ne sont pas significatives dans la mesure où les P -values qui leurs sont associées sont supérieurs au seuil (0,05). Les estimations obtenues par le modèle pantropical de [9] et celles de [11] n'ont pas été fiable. Les valeurs de l'erreur prédictive étant grandes (supérieure à 100 %) et toutes positives entraînent une surestimation de la biomasse par rapport aux résultats de cette étude. La convergence d'estimation du modèle M1 et du modèle générique de [20], prouve que le modèle M1 est approprié pour estimer désormais la biomasse de *Balanites aegyptiaca* dans la zone d'étude. En effet, la surestimation élevée de la biomasse générée par les modèles pantropicaux peut s'expliquer par le fait que l'erreur de prédiction d'un modèle multi-spécifique est en général toujours plus grande que celle d'un modèle spécifique [32]. La moyenne de biomasse par arbre calculée dans les trois sites à travers la méthode non destructive est de 322,24 kg à Torodi, 418,58 kg à Sansani Haoussa et 256,19 kg à Tamou. Ces moyennes de la biomasse sont proches de la moyenne de biomasse déterminée par [14] avec la méthode destructive sur *Prosopis africana* (306,44 kg) et 433,21 kg pour *Faidherbia albida*. Les résultats de l'estimation du stock de carbone de *Balanites aegyptiaca* par arbre sont en moyenne à 151,45 kg à Torodi, 196,73 kg à Sansani Haoussa et 120,41 kg à Tamou. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par [14], qui ont trouvé une moyenne de stock de carbone de 170,32 kg pour *Prosopis africana* et 245,24 kg pour *Faidherbia albida*. Cette différence du stock du carbone par arbre par rapport aux résultats de cette étude est probablement liée à la différence spécifique des espèces. Selon la densité de la population de *Balanites aegyptiaca* dans les différentes communes concernées, la capacité de séquestration était de 14,66 t/ha à Sansani haoussa, 6,85 t/ha à Torodi et 6,71 t/ha à Tamou. Les résultats trouvés à Sansani Haoussa sont supérieurs à ceux obtenus par [13], à savoir 1,33 t/ha à Simiri et de 7,38 t/ha à Tamou en utilisant le modèle spécifique sur des combrétacées (*Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans* et *Guiera senegalensis*). Le stock de carbone trouvé à Tamou et Torodi est supérieur à celui trouvé par [13] sur le site de Simiri mais proche de celui trouvé à Tamou. Ces résultats confirment que la capacité du stockage du carbone est liée à l'espèce et à la densité du peuplement.

5. Conclusion

Six (6) modèles spécifiques ont été construits à partir de deux valeurs explicatives simples, le diamètre à 20 cm du sol et le diamètre à 1,30 cm du sol. Ces modèles sont globalement significatifs, les conditions d'application de modèles ont été validées avec d'autres données indépendantes. La comparaison avec les modèles existants a permis de vérifier leur qualité et leur capacité prédictive. La densité du bois anhydre a varié de 0,5 à 0,90 g/cm³ avec une valeur en moyenne de 0,64 g/cm³. Le modèle de la biomasse totale a été utilisé pour estimer la biomasse aérienne sèche de *Balanites aegyptiaca* ainsi que sa capacité de séquestration du carbone dans la zone d'étude. Les résultats indiquent que la capacité de séquestration de carbone de parcs à *Balanites aegyptiaca* peut contribuer à l'atténuation du changement climatique. Les modèles obtenus pourraient être utilisés dans les zones similaires aux sites d'étude pour évaluer la biomasse aérienne et la capacité de séquestration de carbone de *Balanites aegyptiaca*. Cette étude est aussi une contribution pour combler le gap de données sur l'atténuation de la contribution déterminée au niveau nationale (CDN) du Niger.

Remerciements

Les remerciements des auteurs vont particulièrement aux étudiants de la Faculté d'Agronomie de l'université Abdou Moumouni de Niamey et les exploitants des sites de la zone d'étude qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Références

- [1] - C. ROMEFLEURANT, J. DUCHESNE and P. RAIMBAULT, "An allometric model for trees", *J. Theor. Biol.*, 227 (2004) 137 - 147
- [2] - M. HENRY, A. BESNARD, W. A. ASANTE, J. ESHUN, S. ADU-BREDU, R. VALENTINI, M. BERNOUX and L. SAINT-ANDRÉ, "Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa", *Forest Ecology and Management*, 260 (2010) 1375 - 1388
- [3] - A. SAIDOU, A. F. E. DOSSA, P. C. GNANGLE, I. BALOGOUN et N. AHO, "Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.) et à néré (*Parkia biglobosa* Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin", *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, Numéro spécial Agriculture & Forêt - Novembre, (2012) 1 - 9
- [4] - V. A. J. ADEKUNLE, "Non-linear regression models for timber volume estimation in natural forest ecosystem, southwest Nigeria", *Research Journal of Forestry*, 1 (2007) 40 - 54
- [5] - S. O. AKINDELE and V. M. LEMAY. "Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rainforest area of Nigeria". *Forest Ecology and Management*, 226 (2006) 41 - 48
- [6] - L. SAWADOGO, P. SAVADOGO, D. TIVEAU, S. D. DAYAMBA, D. ZIDA, Y. NOUVELLET, P.C. ODEN and S. GUINKO, "Allometric prediction of above-ground biomass of eleven woody tree species in the sudanian savanna-woodland of West Africa", *Journal of Forestry Research*, 21 (2010) 475 - 481
- [7] - G. H. S. GUENDEHOU, A. LEHTONEN, M. MOUDACHIROU, R. MÄKIPÄÄ and B. SINSIN, "Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa" *South Forests*, 74(2) (2012) 77 - 88
- [8] - C. A. GOUSSANOU, S. GUENDEHOU, A. E. ASSOGBADJO, M. KAIRE, B. SINSIN and A. CUNI-SANCHEZ, "Specific and generic stem biomass and volume models of tree species in a West African tropical semi-deciduous forest", *Silva Fennica*, ISSN 1474 50 (2) (2016) 1 - 22

- [9] - S. BROWN, "Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer", *FAO Forestry Paper*, Rome, 134 (1997) 55 p.
- [10] - S. BROWN, I. SANDRA and R. LOUIS, "Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review*", 4(3) (1992) 366 - 384
- [11] - J. CHAVE, C. ANDALO, S. BROWN, M. A. CAIRNS, J. Q. CHAMBERS, D. EAMUS, H. FÖLSTER, F. FROMARD, N. HIGUCHI, T. KIRA, J. P. LESCURE, B.W. NELSON, H. OGAWA, H. PUIG, B. RIÉRA and T. YAMAKURA, "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests", *Oecologia*, 145 (2005) 87 - 99
- [12] - M. HENRY, N. PICARD, C. TROTTA, R. J. MANLAY, R. VALENTINI, M. BERNOUX and L. SAINT-ANDRE, "Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations", *Silva Fennica*, 45 (3B) (2011) 477 - 569
- [13] - A. AMANI, "Croissance et potentiel de séquestration de carbone de quatre espèces de Combretaceae en zones sahélienne et nord-soudanienne au Niger (Afrique de l'Ouest)", Thèse de doctorat : Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), (2016) 222 p.
- [14] - M. MASSAOUDOU and M. LARWANOU, "Allometric models for estimating aboveground biomass and carbon in *Faidherbia albida* and *Prosopis africana* under agroforestry parklands in drylands of Niger", *Journal of Forestry Research*, 29 (6) (2018) 1703 - 1717
- [15] - H. RABIOU, D. ABDOULAYE, A. B. BABOU, N. S. KOSSI, A. KOSSI ; D. K. ADZO, R. RAOUFOU, K. KOUAMI, A. MAHAMANE and M. SAADOU, "Structure des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. Dans le domaine soudanien, au Niger et au Burkina Faso", *Bois et forêts des tropiques*, 325 (3) (2015), 71 - 83
- [16] - N. PICARD, L. SAINT-ANDRE and M. HENRY, "Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction", Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, (2012) 222 p.
- [17] - GIEC, "Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre", Volume 4 Agriculture, foresterie et autres affectations des terres (2006), <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol4.html> (Juillet 2019)
- [18] - P. DAALGARD, R DEVELOPMENT CORE TEAM, "A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing", Vienna, Austria. ISBN, 3(900051-07-0) (2010), URL: <http://www.R-project.org> (August 2019)
- [19] - D. SHIRLEY, W. STANLEY and C. DANIEL, "Statistics for research third edition", New York, USA, wiley series in probability and statistics, (2004) 634 p.
- [20] - J. CHAVE, M. R. MECHAIN, A. BURQUEZ, E. CHIDUMAYO, M. S. COLGAN and W. B. DELITTI, "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees", *Global*, 20(2014) 3177 - 3190
- [21] - S. THIAM, B. SAMBOU, C. MBOW et A. GUISSSE, "Elaboration de modèles allométriques d'*Acacia Senegal* L. Willd pour l'analyse du carbone ligneux en milieu sahélien : cas de la zone sylvo-pastorale au Sénégal", *Afrique SCIENCE*, 10 (2014) 304-315
- [22] - T. M. BASUKI, P. E. VAN LAAKEM, A. K. SKIDMORE and Y. A. HUSSIN, "Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests", *Forest Ecology and Management*, 257 (2009) 1684 - 1694
- [23] - I. F. BROWN, L. A. MARTINELLI, W. W. THOMAS, M. Z. MOREINA, R. A. VICTORIA and C. A. C. FERREIRA. "Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondonia, Brazil", *Forest Ecology and Management*, 75 (1-3) (1995) 175 - 189
- [24] - R. PELTIER, C. N. FORKONG, F. MAMA, M. NTOUPKA, R. MANLAY, M. HENRY and V. MORILLON. "Evaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord Cameroun", *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 294 (4) (2007) 1 - 12

- [25] - M. LARWANOU, Y. YEMSHAW and M. SAADOU, "Prediction models for estimating foliar and fruit dry biomasses of five Savannah tree species in the West African Sahel", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(6) (2010) 2245 - 2256
- [26] - J. EBUY, D. J. P. LOKOMBÉ, Q. PONETTE, D. SONWA and N. PICARD, "Biomass equation for predicting tree aboveground biomass at Yangambi, RDC". *Journal of Tropical Forest Science*, 23 (2) (2011) 125 - 132
- [27] - C. MBOW, M. MICHEL, B. S. VERSTRAETE, T. AMADOU and N. HENRY, "Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan-Guinean ecosystems of Southern Senegal", *J. For. Res.*, 19 (2013) 340 - 347
- [28] - D. ZIANIS, P. MUUKKONEN, R. MÄKIPÄÄ, and M. MENCUCINI, "Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe", *Silva Fennica*, 4, (2005) 63 p.
- [29] - O. Hofstad, "Review of biomass and volume functions for individual trees and shrubs in Southeast Africa", *Journal of Tropical Forest Science*, 17 (2005) 151 - 162
- [30] - S. KUYAH, J. DIETZ, C. MUTHURI, R. JAMNADASS, P. MWANGI, R. COE and H. NEUFELDT, "Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: Aboveground biomass", *Agric. Ecosyst. Environ.*, 158 (2012) 216 - 224
- [31] - A. FAYOLLE, J. RONDEUX, J. L. DOUCET, G. ERNST, C. BOUISSOU, S. QUEVAUVILLERS, N. BOURLAND, R. FETEKE and P. LEJEUNE, " Réviser les tarifs de cubage pour mieux gérer les forêts du Cameroun", *Bois et Forêts des Tropiques*, 317 (3) (2013) 35 - 49
- [32] - B. W. NELSON, R. MESQUITAA, J. L. G. PEREIRAB, G. T. BATISTAD and L. B. COUTO, "Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon", *Forest Ecology and Management*, 117 (1999) 149 - 167