Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo
Volume 15. P. 24-34, Octobre (2020)
Print ISSN : 2409-1693 / Online ISSN : 2412-3005

Estimation des volumes bruts exploitables d'Okan (*Cylicodiscus gabunensis harms*) au Sud du Cameroun

Seka J.M.[1] et Bégin J.[2]

(1) Ministère des Forêts et de la Faune (MINFOF), École Nationale des Eaux et Forêts, Mbalmayo, Cameroun / e-mail : sekajulien@yahoo.fr
(2) Département des sciences du bois et de la forêt, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Université Laval, Québec, QC, Canada, G1V 0A6

DOI : 10.5281/zenodo.4044040

Résumé

L'Okan, au Cameroun, est une espèce très sollicitée par les industries forestières et les riverains des forêts. L'objectif de l'étude a été d'élaborer des tarifs de cubage pour l'estimation des volumes bruts sur écorce d'Okan. Au total, 205 tiges de Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) compris entre 65 et 167 cm ont été cubées à l'Unité Forestière d'Aménagement (UFA) 09 004b située au sud du Cameroun. Les relations entre les volumes calculés et les variables dendrométriques relevées ont été établies au moyen de régressions pondérées. Le tarif à une entrée V=f(DHP) produit lors de l'étude, lorsqu'il est comparé au tarif en vigueur proposé par l'administration forestière dans la zone, montre que ce dernier sous-estime significativement les volumes d'Okan. Ce tarif à une entrée peut être amélioré en lui ajoutant un second diamètre mesuré plus haut sur la tige (Dx) ou la longueur du fût (Lf) comme le montrent les coefficients de détermination (R^2) (97%, 88%, 83%, 75%) et l'Akaike Information Criterion (AIC) (477, 763, 843, 919) respectivement pour les modèles V_b=f(DHP, Lf, Dx), V_b =f(DHP, Lf), V_b =f(DHP, Dx) et V_b =f(DHP). Sur la base de l'échantillon mesuré, les tarifs à deux entrées fournissent un gain de précision même lorsque les méthodes et instruments utilisés sont sujets à des erreurs de mesure, normalement distribuées et centrées sur zéro, de la longueur du fût (écart type <1,8 m) et du deuxième diamètre (écart type <3,25 cm). Les valeurs maximales de ces écarts types pour l'équation à trois entrées sont de 7,5 cm et 3,5 m. Ces résultats contribuent à une gestion plus rationnelle du potentiel ligneux d'Okan.

Mots clés : *Tarifs de cubage, volume brut, Okan, Sud du Cameroun*

Abstract

In Cameroon, Okan is a species highly demanded by forest industries and forest dwellers. The objective of the study was to elaborate volume equations for the estimation of gross volumes over bark of Okan. In total, 205 stems with a Diameter at Breast Height (DBH) between 65 and 167 cm were scaled at Forest Management Unit (FMU) 09 004b in southern Cameroon. The relationships between the calculated volumes and the measured dendrometric variables were established using weighted regressions. The volume equation with one entry V=f(DHP) produced during the study, when compared to the volume equation proposed by the forest administration in that zone, shows that the latter significantly underestimates Okan volumes. This volume equation with one entry can be improved by adding a second diameter, measured higher on the stem (Dx) or the bole length (Lf) as shown by the determination coefficient (R^2) (97%, 88%, 83%, 75%) and Akaike Information Criterion (AIC) (477, 763, 843, 919) respectively for the V_b=f(DHP, Lf, Dx), V_b =f(DHP, Lf), V_b =f(DHP, Dx) and V_b =f(DHP) models. Based on the measured sample, volume equations with two entries provide a gain in accuracy even when the methods and instruments used are subject to measurement errors, normally distributed and centred on zero, on the bole length (standard deviation <1.8 m) and the second diameter (standard deviation <3.25 cm). The maximum values of these standard deviations for equations with three entries, are 7.5 cm and 3.5 m. These results contribute to a better and rational management of Okan's timber potential.

Keywords : *Volume equations, gross volume, Okan, South of Cameroon*

1. Introduction

Les tarifs de cubage sont des outils d'estimation du volume des arbres sur pied. Ils sont utilisés entre autres pour le calcul des Volumes bruts (V_b) exploitables (ATIBT, 2006). Au Cameroun, les tarifs au volume brut utilisés sont sujets à controverses (Tchatat et al.,

2008). Ils causent des différends entre les sociétés forestières et l'État. Ces sociétés font face à des incohérences entre le volume et le nombre de tiges autorisés dans les Permis Annuel d'Opération (PAO) pour certaines essences. Dans certains cas, le nombre de tiges est atteint et le volume pas, tandis que dans d'autres cas, le volume est atteint le nombre de tige pas. Cette discordance entre les prévisions de volume brut et la réalité est attribuable à l'application de tarifs de cubage non adaptés à ces stations (Beutchou, 2010 ; Nitcheu, 2010) et possiblement aux méthodes utilisées pour estimer ces volumes (Dubart et al., 2017).

Cette étude porte sur *Cylicodiscus gabunensis* qui, depuis 2008, fait partie des cinq espèces les plus exploitées du Bassin du Congo pour la production du bois (Bayol et al., 2010). Au Cameroun, les volumes exploités de l'espèce ont été constamment croissants entre 1998 et 2014 (MINFOF, 2014). En 2016, l'espèce était encore l'une des plus exploitées du Bassin du Congo (Makemba et al., 2019). Le tarif de cubage de *Cylicodiscus gabunensis*, comme celui proposé par l'administration, est de la forme V_b=f(DHP). V_b représente le volume brut (en m^3) situé entre la hauteur d'abattage et la base des grosses branches où passe le trait de scie qui permet l'étêtage de la grume (ONADEF, 1992). Le Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) est le diamètre de référence (exprimé en cm), mesuré par les prospecteurs à 1,3 m de hauteur du sol. Les autres caractéristiques des tarifs proposés par l'administration :

- sont généraux [plus adaptées pour une utilisation au niveau des phases qu'à une utilisation au niveau des Unités Forestières d'Aménagement (UFA)];
- dans certains cas, ont été proposés pour des groupes d'essences ;
- les tiges échantillons sont cubées au relascope;
- les échantillons ont une taille de 100 tiges ou moins ;
- des arbres en dessous du DME (Diamètre Minimum d'Exploitation) ont été inclus dans les échantillons (ONADEF, 1992).

La première piste envisagée pour améliorer la qualité des tarifs utilisés pour l'Okan est de cuber les arbres localement, dans les forêts exploitées, en utilisant une méthode adéquate (Paget et al., 2005). La seconde amélioration est de cuber les arbres en nombre suffisant pour l'espèce étudiée (Okan). La troisième est de se concentrer sur les classes d'arbres exploitables, supérieures ou égales au DME de l'Okan dans lesquelles le tarif sera utilisé (Rondeux, 1999).

Les autres pistes envisagées procèdent par le développement de tarifs de cubage qui utilisent d'autres entrées en plus du (DHP). Celles-ci pourraient être la longueur / hauteur du fût (L_f) ou un second diamètre (D_x) pris sur l'arbre V_b=f(DHP, D_x), V_b=f(DHP, L_f), V_b=f(DHP, D_x, L_f) (Rondeux, 1999; CTFC, 1989). La longueur du fût est la longueur comprise entre la hauteur d'abattage et la section située à la base des grosses branches où est effectuée la coupe d'étêtage. En ce qui concerne le second diamètre, deux niveaux par rapport au sol ont été considérés, 5 et 7 m. Ces niveaux ont été choisis en tenant compte du fait qu'ils devraient être plus aisément mesurables que la longueur du fût, pour contourner l'obstruction visuelle parfois constatée en forêt tropicale. Cette approche prend en compte l'évolution de la ressource au Cameroun (Ligot et al., 2019) et l'hétérogénéité observée au sein des espèces, les arbres de la même espèce variant d'une phase à l'autre.

Les équations proposées ont été complétées par des informations relatives à leur utilisation. En effet, l'une des lacunes associées aux équations proposées par l'administration est le manque d'informations sur leurs conditions d'utilisation (Jara, 2014). En plus des précisions sur l'espèce, la partie de l'arbre mesurée a été clairement désignée (Henry et al., 2011).

L'objectif principal de l'étude a été d'élaborer des tarifs de cubage pour l'estimation des volumes bruts sur écorce d'Okan. Cette étude présente deux particularités. La première est qu'un grand nombre d'individus de l'espèce choisie est cubé, ces individus étant repartis dans toutes les classes de diamètre exploitables de l'espèce. La seconde est que les équations proposées pour l'espèce utilisent le DHP et d'autres entrées permettant : (i) d'offrir divers possibilités de mesure de la tige; (ii) augmenter la précision des équations; (iii) offrir des gains de précisions même lorsque l'utilisateur des équations passe de la forêt à la région ou d'une région à une autre. Trois hypothèses ont été formulées pour être vérifiées.

1) Les tarifs nationaux V_b=f(DHP) présentent, dans le cas de l'Okan, des divergences par rapport à un tarif élaboré en sélectionnant les arbres à une échelle locale.
2) La longueur du fût apporte un gain de précision aux tarifs de cubage, cependant, en raison des difficultés à la mesurer en zone tropicale (Samba,

2011 ; Chave et al., 2005), l'utilisation d'une seconde mesure de diamètre offre une alternative à son utilisation pour bonifier les tarifs comportant pour seule entrée le DHP.

3) En raison de la distance entre l'arbre et l'observateur, la mesure de la hauteur ou d'un second diamètre pourrait être entachée d'une erreur préjudiciable à la qualité des estimations effectuées.

Les tarifs pour l'estimation des volumes bruts ont été élaborés à partir de paramètres dendrométriques mesurés sur 205 tiges. La sensibilité des tarifs proposés à une erreur de mesure a été évaluée en effectuant une analyse de sensibilité à partir du jeu de données analysé.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Zone d'étude

Les travaux ont porté sur des pieds d'Okan localisés dans l'UFA 09 004b située dans le Sud du Cameroun. Elle est localisée entre 2°03' et 2°26' de latitude Nord et entre 6°42' et 6°48' de longitude Est (figure 1).

Le climat est de type équatorial humide avec quatre saisons. Les précipitations annuelles varient entre 1450 et 2100 mm avec une moyenne annuelle de 1650 mm. L'insolation moyenne mensuelle est comprise entre 84 et 188 heures avec une moyenne de 148 heures (FIPCAM, 2016).

2.2.2. Collecte des données

La collecte a consisté en : (i) le repérage des tiges abattues à cuber et (ii) la mesure des fûts (diamètres et longueur).

Repérage des tiges d'Okan à cuber

Les fûts d'Okan ont été cubés aux pieds des souches après abattage, avant le passage des engins de débusquage et de débardage. Pour les retrouver, les données d'inventaire des Assiettes Annuelles de Coupe (AAC) en cours ont été couplées aux plans journaliers de travail pour les localiser parmi les nombreuses espèces abattues. Ces tiges atteignaient toutes au moins le Diamètre Minimum d'Exploitabilité (DME_{adm}) de l'Okan fixé par l'administration forestière, soit 60 cm au Cameroun.

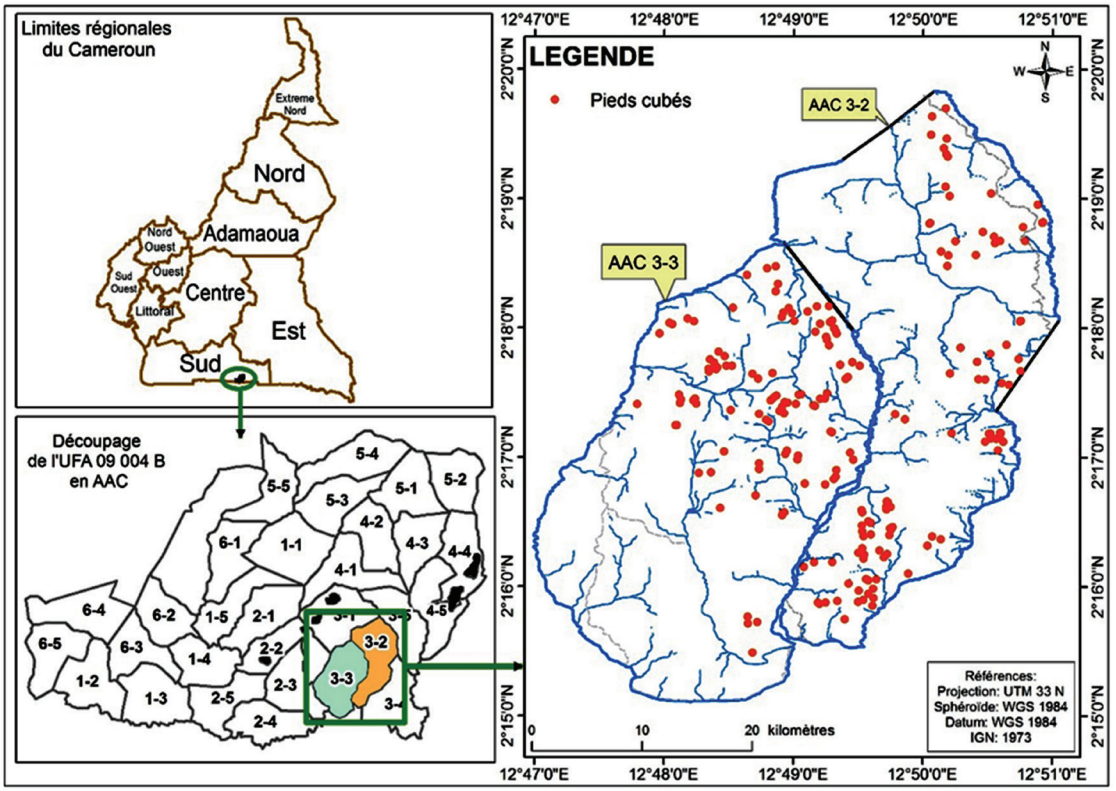

Figure 1 : Localisation de l'UFA 09 004b et des tiges d'Okan cubées.

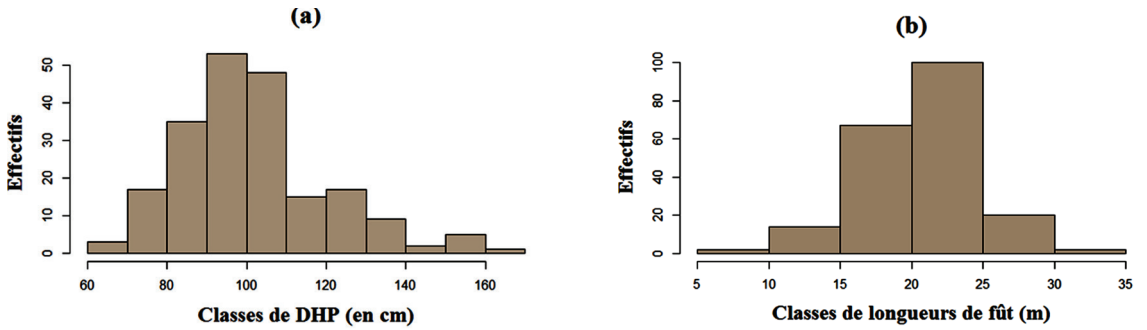

Figure 2 : Distribution des tiges cubées dans les différentes classes de DHP (a) et de longueurs (b).

Procédure de mesure des tiges

Au total, 205 tiges d'Okan ont été cubées et suivies en utilisant la méthode de cubage par billons successifs. La longueur du fût (L_f) a été mesurée pour chacune des tiges. Les diamètres ont été mesurés sur ces tiges, à chaque mètre sur les 3 premiers mètres, puis à tous les deux mètres jusqu'au fin bout. Deux mesures perpendiculaires de diamètre ont été effectuées à chaque découpe grâce à un compas forestier. La distribution des tiges cubées, par classe de diamètre et de longueur, est présentée à la figure 2.

2.3 Méthodes

2.3. 1. Analyse des données

Les données ont été analysées de façon à : (i) construire différents tarifs de cubage pour l'estimation des volumes bruts d'Okan ; (ii) comparer le tarif V_b=f(DHP) élaboré à celui de l'administration; (iii) effectuer une analyse de sensibilité des équations produites à l'erreur de mesure.

Calcul des volumes, construction des tarifs de cubage et comparaison au tarif administratif

Les volumes bruts des billons ont été calculés sur écorce en utilisant la formule de Smalian (Samba et al., 2011; Rondeux, 1999). Les tarifs de cubage estimant les volumes bruts ont été obtenus en trouvant les équations s'ajustant le mieux aux observations (figure 3) et en effectuant des régressions linéaires entre le volume (V_b) et les variables indépendantes relevées sur les fûts (DHP, D_x et L_f).

Diverses transformations de variables ont été utilisées afin d'identifier celles s'ajustant le mieux aux données. L'équation utilisée pour le cubage de l'Okan dans la zone de l'étude est celle de la phase 1 qui est la suivante : $V=-0{,}00676+0{,}0008579\ DHP^2$.

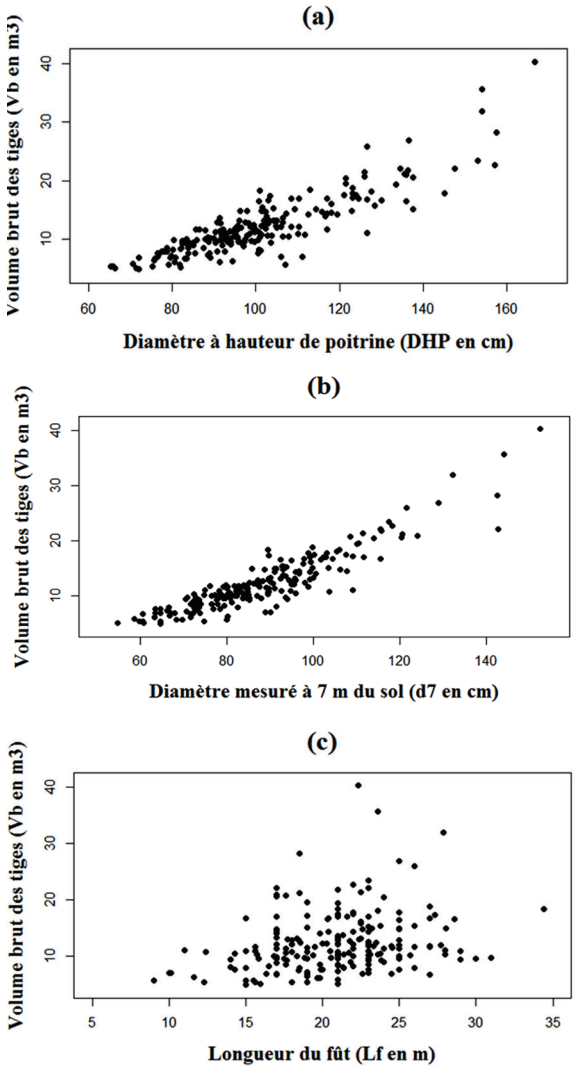

Figure 3 : Nuage de points formé par le volume brut des 205 tiges cubées et les variables indépendantes ayant été utilisées pour construire les tarifs de cubage que sont le DHP (a), le diamètre à 7 m du sol (b) et la longueur du fût (c).

La comparaison entre ce tarif et celui à une entrée proposé a été faite par une régression des écarts de volume en fonction du DHP.

Analyses statistiques, comparaisons et validation des équations

Les analyses statistiques et les coefficients des équations produites ont été calculés grâce à la fonction lm () du logiciel R Core Team (2016). La pertinence des variables retenues a été évaluée grâce à l'ANOVA du modèle, puis confirmée par leur valeur de p. Les meilleurs ajustements des équations aux données ont été distingués sur la base de trois critères que sont le coefficient de détermination (R^2), l'écart type estimé des résidus (RSE) et le critère d'Akaike (AIC). Les performances des modèles de régression ont été évaluées à l'aide de la validation croisée (leave one out cross validation). Celle-ci s'appuie sur le jeu de données utilisé, en retirant un arbre à la fois et en répétant la procédure autant de fois qu'il y a d'arbres. La fonction cv.lm () dans la bibliothèque DAAG de R (Maindonald et Braun, 2015) a permis de calculer le R^2 et l'erreur quadratique moyenne (RSE) de l'échantillon de validation.

L'hétéroscédasticité a été gérée par : i) la recherche de la variable expliquant le mieux la distribution des résidus (observation graphique et régression de la valeur absolue des résidus) ; ii) la pondération inverse au moyen de l'instruction « weights » de lm (). La pondération de toutes les équations a été effectuée en utilisant le même poids (weights = DHP^{-2}).

Analyse de sensibilité

Les équations à plusieurs entrées V_b=f(DHP, D_x), V_b=f(DHP, L), V_b=f(DHP, D_x, L_f) ont été comparées au modèle de base V=f(DHP) de façon à identifier la tolérance à l'erreur de mesure sur les paramètres additionnels au DHP, qui sont en général plus sujets à une erreur de mesure. Cela a été effectué grâce à 1000 itérations simulant des erreurs normalement distribuées, centrées sur zéro selon un gradient croissant d'écarts types (S) sur le (ou les) paramètre(s) autre(s) que le DHP. Pour chaque valeur d'écart type, la comparaison a été effectuée sur la base du rapport

$$\frac{RSE_{\text{équation à 2 ou 3 entrées}}}{RSE_{\text{équation à 1 entrée}}}$$

Les valeurs d'écarts types pour lesquelles aucune itération ne dépasse un rapport de 100% ont été considérées. Elles indiquent jusqu'à quel niveau d'erreurs de mesure un modèle à plusieurs entrées est supérieur au modèle de base. Multipliés par 2 (c'est-à-dire à ± 2S), ils définissent l'intervalle de probabilité de 95% des erreurs de mesure, centrées sur zéro, pouvant être tolérées lors de la mesure du/des paramètre(s) additionnel(s). En ce qui concerne l'équation à trois entrées, deux intervalles de valeurs ont été définis en considérant chaque fois l'erreur comme étant totalement due à un seul des deux paramètres. En effet, l'erreur faite au niveau de cette équation est une combinaison des erreurs faites au niveau des paramètres mesurés individuellement.

Tableau 1 : Modèle de base et caractéristiques statistiques de l'équation du volume brut sur écorce (pondéré avec le poids DHP^{-2}), proposée pour l'Okan, en fonction du DHP.

Équation 1 - ($V_b=b_0 + b_1 DHP^2$)			
	Sum Sq	**Df**	**Pr(>F)**
DHP^2	4475,5	1	<2.2e-16
Résidus	1295,9	203	
	Estimé	**Erreur-type**	**Pr(>|t|)**
b_0	6,36e-01	4,40e-01	0,15
b_1	1,10 e-03	4,41e-05	<2e-16
	R^2 (%)	**RSE (m^3 cm^{-1})**	**AIC**
	75,2	0,0226	919
	CV R^2 (%)	**CV RSE (m^3 cm^{-1})**	
	74,8	0,0229	

3. Résultats

3.1. Tarif à une entrée V_b=f(DHP) et comparaison au tarif administratif

L'équation proposée au tableau 1 exprime le volume brut en fonction du DHP. Elle est présentée avec la valeur de ses coefficients, son R^2, son RSE, son AIC et sa valeur de p. Les erreurs types et les valeurs de p de chacun des paramètres sont également présentées.

L'équation 1 (tableau 1) a un coefficient de détermination (R^2) de 75,2%, un AIC de 919 et un écart type résiduels (RSE) de 0,0226 m^3 cm^{-1}.

L'équation proposée (équation 1) a été comparée à l'équation utilisée pour le cubage de l'Okan dans la zone de l'étude (phase 1) à la figure 4.

Cette figure montre que l'équation proposée par l'administration sous-estime systématiquement les volumes bruts par rapport à celle proposée dans cette étude. La régression effectuée sur les écarts de volume brut sur écorce en fonction du DHP

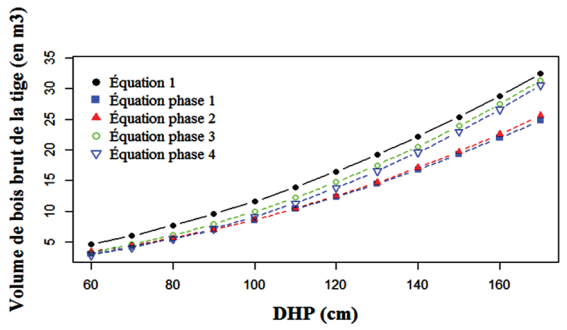

Figure 4 : Estimations du volume brut sur écorce faites par l'équation proposée au cours de l'étude (équation 1) et celles de l'administration forestière pour les différentes phases d'inventaire au Cameroun (phases 1, 2, 3 et 4).

Tableau 2 : Modèle de base et caractéristiques statistiques de l'équation du volume brut (pondéré avec le poids DHP $^{-2}$) sur écorce en fonction du DHP et de la longueur du fût (L_f).

Équation 2 - ($V_b=b_0 + b_1 DHP^2 + b_2 DHP^2.L_f$)			
	Sum Sq	**Df**	**Pr(>F)**
DHP^2	4475,5	1	<2.2e-16
$DHP^2.L_f$	632,1	203	<2.2e-16
Résidus	663,8	202	
	Estimé	**Erreur-type**	**Pr(>|t|)**
b_0	3,50e-01	3,00e-01	0,25
b_1	2,97 e-04	6,03e-05	1,73e-06
b_2	4,00 e-05	2,61 e-06	< 2e-16
	R^2 (%)	**RSE (m^3 cm^{-1})**	**AIC**
	88,5	0,0154	763
	CV R^2 (%)	**CV RSE (m^3 cm^{-1})**	
	88,1	0,0157	

(résultats non présentés) s'est révélée statistiquement significative (p = 2,258e-08). Des équations utilisées pour estimer les volumes bruts d'Okan au Cameroun, celle de la phase 1 fournit les plus faibles volumes, à DHP équivalents.

3.2. Tarifs de cubage à plusieurs entrées

Tarif utilisant la longueur du fût $V_b=f(DHP, L_f)$

La longueur du fût est le second paramètre utilisé après le DHP. Elle peut être mesurée avec une précision adéquate lorsque le couvert est ouvert. L'équation 2 l'utilisant et ses coefficients sont présentés au tableau 2.

L'utilisation de la longueur du fût [modèle $V_b=f(DHP, L_f)$ *vs* $V_b=f(DHP)$ améliore l'ajustement de la courbe aux données. Cette observation est confirmée par les valeurs du R^2 (88% *vs* 75%) et de l'AIC (763 *vs* 919). La pondération effectuée aboutit à une valeur du RSE de 0,015 m^3 cm^{-1} pour le modèle retenu.

Tableau 3 : Modèles de base et caractéristiques statistiques des équations du volume brut sur écorce (pondéré avec le poids DHP^{-2}) sur écorce en fonction du DHP, de la longueur du fût (L_f) et d'un second diamètre (D_x).

Équation 3 - à 5 m du sol $V_b=b_0 + b_1 DHP + b_2 DHP^2.\left(\frac{D_5}{DHP}\right)$			
	Sum Sq	**Df**	**Pr(>F)**
DHP^2	86,7	1	1,02e-05
$DHP^2.\left(\frac{D_5}{DHP}\right)$	560,3	1	< 2.2e-16
Résidus	854,7	202	
	Estimé	**Erreur-type**	**Pr(>|t|)**
b_0	6,71	1,89	0,00049
b_1	-0,13	0,0037	0,00039
b_2	0,002	0,0002	<2e-16
	R^2_{ajs}(%)	**RSE (m^3 cm^{-1})**	**AIC**
	82,4	0,0191	849,9
	CV R^2 (%)	**CV RSE (m^3 cm^{-1})**	
	81,9	0,0194	

Équation 3 - à 7 m du sol $V_b=b_0 + b_1 DHP + b_2 DHP^2.\left(\frac{D_7}{DHP}\right)$			
	Sum Sq	**Df**	**Pr(>F)**
DHP^2	77	1	2,32e-05
$DHP^2.\left(\frac{D_7}{DHP}\right)$	586,9	1	< 2.2e-16
Résidus	828,3	202	
	Estimé	**Erreur-type**	**Pr(>|t|)**
b_0	6,23	1,77	0,00054
b_1	-0,12	0,034	0,00046
b_2	0,002	0,0002	< 2e-16
	R^2_{ajs}(%)	**RSE (m^3 cm^{-1})**	**AIC**
	83	0,0188	843,3
	CV R^2 (%)	**CV RSE (m^3 cm^{-1})**	
	82,5	0,0191	

Tarifs utilisant un second diamètre (mesuré à 5 ou à 7 m du sol). $V_b=f(DHP, \frac{D_x}{DHP})$

La mesure d'un second diamètre sur la tige a été envisagée pour améliorer la qualité des tarifs utilisant

le DHP, mais aussi comme alternative aux problèmes de visibilité inhérents à l'utilisation de la longueur du fût. Le tableau 3 présente les tarifs de cubage utilisant le DHP et un second diamètre pris à 5 ou à 7 mètres du sol, avec leurs coefficients.

L'utilisation d'un second diamètre V_b=f(DHP, D_x) *vs* V_b=f(DHP) améliore l'équation comme le montrent le R^2 (83% vs 75%) et l'AIC (843 vs 919) des équations 3 (à 7 m du sol) et 1. Cependant, la longueur apporte plus d'améliorations à la qualité de l'ajustement de la courbe qu'un second diamètre V_b=f(DHP, L_f) *vs* V_b=f(DHP, D_x). La comparaison du coefficient de détermination de ces deux modèles le montre : 88% *vs* 83% et 763 *vs* 843 respectivement pour le R^2 et l'AIC. Les valeurs de R^2, RSE et AIC du modèle utilisant un diamètre à 7 m du sol, sont proches de celles à 5 m.

Tableau 4: Modèle de base et caractéristiques statistiques de l'équation du volume brut1 sur écorce en fonction du DHP, de la longueur du fût (L_f) et d'un second diamètre (D_x) pris à 7 m du sol.

Équation 4 $V_b=b_0+b_1.L_f.DHP^2+b_2\,[DHP^2.(\frac{D_7}{DHP})]+b_3.L_f.[DHP^2.(\frac{D_7}{DHP})]$			
	Sum Sq	**Df**	**Pr(>F)**
$L_f.DHP^2$	84,64	1	< 2.2e-16
$DHP^2.(\frac{D_7}{DHP})$	267,0	1	< 2.2e-16
$L_f.[DHP^2.(\frac{D_7}{DHP})]$	319,3	1	< 2.2e-16
Résidus	146,9	201	
	Estimé	**Erreur-type**	**Pr(>|t|)**
b_0	-2,27 e-01	1, 51e-01	0,135
b_1	-3,56 e-05	3,66 e-06	< 2e-16
b_2	3,81e-04	3,46 e-05	< 2e-16
b_3	8,80 e-05	4,47e-06	< 2e-16
	R^2(%)	**RSE (m^3 cm^{-1})**	**AIC**
	97,2	0,008	477,4
	CV R^2 (%)	**CV RSE (m^3 cm^{-1})**	
	97,1	0,008	

Tarif utilisant un second diamètre et la longueur du fût V_b=f(DHP, D_x, L_f)

L'utilisation du DHP, d'un second diamètre et de la longueur du fût fournit un meilleur ajustement de la courbe par rapport aux données comme le montre le tableau 4. L'équation 4 y est présentée avec ses coefficients. Cette équation, par rapport aux autres équations estimant les volumes bruts, a un R^2 (97,2%) plus élevé et un AIC (477,4) plus bas que celui des équations 1 à 3.

3.3. Sensibilité des équations proposées aux erreurs de mesure

De tous les paramètres mesurés (DHP, D_x et L_f), le DHP est le plus accessible et le plus facile à mesurer sur une tige sur pied. Il peut être mesuré avec plus de précision que les autres paramètres cités. Le tarif utilisant ce paramètre comme unique entrée a été pris comme référence. Le tableau 5 présente l'écart type de l'erreur de mesure tolérée pour chacune des équations (2, 3 et 4) présentée tout en obtenant un écart type des résidus inférieur à celui du modèle V_b=f (DHP).

Avec l'équation 2 et le jeu de données utilisé, on pourrait tolérer une erreur de mesure aléatoire de la longueur, normalement distribuée (de moyenne 0) et d'écart type de 1,8 m, tout en obtenant un écart type des résidus toujours inférieur ou égal à celui du

Tableau 5 : Écarts types (ET) des erreurs de mesure tolérées déterminés en comparant les RSE des équations 2, 3 et 4 à celui du modèle de base [V=f(DHP)] à partir de 1000 itérations simulant une erreur de mesure sur le/les paramètre(s) additionnel(s) au DHP.

Équation de référence	**Équations comparées**		
	(Équation 2) **V=f(DHP, L_f)**	**(Équation 3)** **V=f(DHP, d_5 ou d_7)**	**(Equation 4)** **V=f(DHP, d_7, L_f)**
(Équation 1) **V=f(DHP)**	ET_{Lf}=1,8m	ET_{d5}=3,25cm ET_{d7}=3,25cm	ET_{Lf}=0m; E_{d7}=7,5cm ET_{Lf}=3,5m; E_{d7}=0cm

ET_{Lf}: Écart type de l'erreur de mesure tolérée de la longueur du fût;
ET_{d5} : Écart type de l'erreur de mesure tolérée du diamètre à 5 mètres;
ET_{d7} : Écart type de l'erreur de mesure tolérée du diamètre à 7 mètres;
(1) Cas extrême d'une erreur de mesure entièrement due au second diamètre ; l'écart type de l'erreur de mesure tolérée pouvant atteindre 7,5 cm.
(2) Cas extrême d'une erreur de mesure entièrement due à la hauteur ; l'écart type de l'erreur de mesure tolérée pouvant atteindre 3,5 m.

modèle V_b=f (DHP). Avec une telle valeur d'écart type, l'erreur de la mesure de la longueur devrait être inférieure à ±3,6 mètres dans 95% des mesures effectuées. L'écart type des erreurs de mesure devrait être inférieur à 3,25 cm au niveau du second diamètre (équation 3). Pour l'équation 4, qui a deux entrées, l'écart type des erreurs de mesure tolérées (centrée sur 0) est de 3,5 m et 7,5 cm respectivement pour la longueur et le second diamètre de la tige.

4. Discussion

Échantillonnage et validité des tarifs proposés

L'effectif de tiges cubées (205) est supérieur au nombre de tiges cubées par espèce au cours de précédents travaux effectués au Cameroun (Fayolle et al., 2013; Samba et al., 2011 ; Tchatat et al., 2008). Cet effectif est également conforme aux normes Camerounaises d'études d'arbres (ONADEF, 1992). Seules les classes de qualité jugées commerciales d'après les normes ONADEF en vigueur au Cameroun ont fait l'objet d'intérêt. Les tiges d'Okan ont été mesurées au fur et à mesure que le chantier d'exploitation forestière progressait et la concentration des DHP autour des classes modales 90-100 cm et 100-110 cm s'est faite au hasard. Les tarifs proposés sont valables pour l'Okan, dans les classes exploitables au-dessus du DME_{adm}, (60 cm) qui ont constitué l'échantillon (Rondeux, 1999). L'UFA 09 004b, dans laquelle les arbres ont été mesurés, appartient à la phase 1 d'inventaire effectuée dans le Sud du Cameroun.

Qualité du tarif administratif utilisé pour l'Okan au Cameroun (dans la phase 1) et possibilités d'améliorations

Les tarifs de cubage proposés par l'administration et dans les études disponibles sont de la forme V_b=f (DHP). Les résultats montrent que celui proposé pour l'Okan par l'administration, dans la phase 1, sous-estime systématiquement les volumes bruts par rapport au tarif proposé au cours de cette étude (figure 3). Cette différence est significative, pour le volume brut qui a été calculé sur écorce.

La nécessité de réviser les tarifs de cubage utilisés à l'échelle nationale au Cameroun a déjà été évoquée (Fayolle et al., 2013 ; Tchatat et al., 2008). Cette préoccupation est valable pour l'Okan. Cela pourrait se justifier par : (i) le fait que les tarifs administratifs ont été parfois produits pour des groupes d'essences (ONADEF, 1992) ; (ii) la petite taille de l'échantillon par rapport à celui de l'étude (iii) la possibilité que les échantillons ayant servi à les construire soient non représentatifs (Projet API, 1995); (iv) l'approche utilisée pour le cubage des tiges (Dubart et al., 2017; ONADEF, 1992). Bien que la cause des écarts pour l'Okan n'ait pas été identifiée, il n'en demeure pas moins que les nouveaux tarifs, produits localement, fournissent des estimations de bois significativement différentes de celles du tarif de la phase 1. Il resterait encore à vérifier si les écarts observés découlent d'une particularité locale des Okans étudiés, le tarif administratif étant alors bon en moyenne pour la région de la phase 1, ou bien si les écarts témoignent plutôt d'un biais généralisé.

La mesure d'une seconde ou d'une troisième variable améliore l'ajustement des courbes aux données dans les équations estimant les volumes bruts. Cela se voit par l'amélioration des valeurs de R^2, RSE et AIC lorsqu'on passe des modèles à une entrée V_b=f(DHP) (tableau 1) à ceux à plusieurs entrées V_b=f(DHP, D_x), V_b=f(DHP, L_f) ou V_b=f(DHP, D_x, L_f) (tableaux 2, 3 et 4).

Le gain associé à l'utilisation de la relation V_b=f(DHP, L_f) ou V_b=f(DHP, D_x, L_f) serait encore plus intéressant lorsque le rapport H/D moyen des tiges change d'une région à l'autre. Il en est de même si les estimations de volume sont faites à l'aide d'une fonction de décroissance (FAO, 1981), ce qui rendrait l'utilisation de la relation V_b=f(DHP, D_x) plus intéressante si le rapport D_x/DHP change d'une région à l'autre. L'utilisation d'une équation à une variable pourrait alors générer localement des biais qui sont évités lorsqu'on utilise celle à 2 ou 3 variables.

Le gain associé à l'utilisation des équations à deux entrées n'est réel que dans la mesure où, les méthodes et instruments utilisés fournissent des estimés en moyenne non biaisés; que les erreurs de mesure sont normalement distribuées et d'un écart type de 3,25 centimètres pour le second diamètre et 1,8 mètre pour la longueur du fût. Ces écart types sont plus élevés pour l'équation à trois entrées.

Implications dans l'estimation des stocks de bois

Le Cameroun et la majorité des pays du Bassin du Congo travaillent en ce moment à mettre en œuvre les engagements pris dans le cadre des Accords de Partenariat Volontaire (APV) signés avec l'Union Européenne. Dans cette perspective, en plus de ce qui était déjà fait (mesure du diamètre,

classement et localisation dans une parcelle), des efforts supplémentaires ont été consentis pour géo-référencer les tiges lors des inventaires (MINFOF, 2016) et assurer leur traçabilité. Ces efforts pourraient être complétés par la mesure d'un second paramètre (longueur ou second diamètre) sur les tiges retenues pour l'exploitation. En adoptant cette approche, les estimations des volumes du bois gagneraient en exactitude.

En général, la qualité du tarif a été croissante avec l'effort mis dans le cubage. L'équation à trois entrées présente un meilleur ajustement, suivie de celles à deux puis à une entrée. Les coefficients de détermination (R^2) sont par exemple de 0,75 et 0,97; les AIC de 919 et 477 respectivement pour les modèles V_b=f (DHP) et V_b=f(DHP, D_x, L_f). Ainsi, lorsque des paramètres additionnels sont ajoutés au DHP, il a été montré que la qualité des estimations s'améliore (Rondeux, 1999). Parmi les équations à deux entrées, celle s'appuyant sur la longueur de la tige est meilleure que celles s'appuyant sur un second diamètre.

Des deux paramètres utilisés (hauteur et second diamètre), l'effort de mesure de la hauteur est celui qui améliore le plus l'ajustement de l'équation. Les coefficients de détermination sont de 0,88 et 0,83; les AIC de 763 et 843 respectivement pour les modèles V_b=f (DHP, L_f) et V_b=f(DHP, D_x). Ceci justifierait la raison pour laquelle la hauteur est le paramètre le plus usuellement mesuré après le DHP (Chave, 2005). Le second diamètre a été envisagé comme alternative, en raison des problèmes de visibilité inhérents à l'utilisation de la longueur du fût. Des deux équations utilisant un second diamètre, celle utilisant le diamètre le plus élevé (à 7 m du sol) a fourni un résultat légèrement supérieur à celui de l'équation utilisant un diamètre pris à 5 m du sol.

5. Conclusion

Des hypothèses formulées, il se dégage que : (i) l'équation proposée par l'administration sous-estime systématiquement les volumes bruts par rapport à celle établie dans la zone étudiée ; (ii) la qualité des équations s'améliore avec l'ajout d'un paramètre supplémentaire ; (iii) l'utilisation d'une seconde mesure de diamètre constitue une alternative à l'utilisation de la longueur ; (iv) les améliorations potentielles apportées en ajoutant une mesure supplémentaire ne sont effectives que si l'erreur effectuée lors des mesures est contrôlée.

Des études antérieures à celle-ci avaient déjà relevé l'importance, d'une révision des tarifs de cubage en vigueur au Cameroun. Cette observation est valable pour l'Okan. La particularité pour l'Okan, dans la phase 1, est que cette révision est dans l'intérêt de l'État car les tarifs actuels conduisent à une sous-estimation du potentiel sur pied d'Okan. De plus, ce tarif est une source potentielle de divergences entre les parties prenantes impliquées dans l'exploitation du bois de l'espèce.

Remerciements

Ces travaux qui peuvent accompagner le Ministère des Forêts et de la Faune (MINFOF) du Cameroun dans une révision des tarifs de cubage en vigueur ou tout au moins pour l'Okan et d'autres essences principales ont été rendus possible grâce :

- au Programme Elargi de Formation en Gestion des Ressources Naturelles dans le Bassin du Congo (PEFOGRN-BC) de l'Université Laval et du Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale d'Afrique Centrale (RIFFEAC) qui ont apporté ou mis à disposition des fonds et du matériel;
- aux hautes instances du MINFOF-MINFOPRA du Cameroun qui ont donné leurs quitus afin que le temps de l'auteur principal soit essentiellement consacré à la formation et la recherche;
- des remerciements spécifiques à Marie-Rose Ndedi, Directeur de l'ENEF de 2009 à 2012 qui a délivré les premières recommandations;
- aux Drs Ibrahim Linjouom et Soulemane Sambo (de regrettée mémoire) ayant accompagné les processus de sélection.

Les auteurs remercient :

- la Fabrique Camerounaise des Parquets (FIPCAM), notamment sa direction et son unité d'aménagement, pour avoir facilité l'accès au site de l'étude;
- Simon Njependa (de regrettée mémoire), Christian Mey, et Lucien Kageu pour avoir participé à la collecte des données.

Références

ATIBT (2006). Formation de forestier aménagiste et de gestionnaire forestier ; *Module 2 : Dendrométrie et topographie*. 47 p.

Bayol, N., Demarquez, B., Wasseige, C., Eba'a,

A.R., Fisher J-F., Nasi R., Pasquier, A., Rossi, X., Steil, M. et Vivien C. (2010). La gestion des forêts et la filière bois en Afrique centrale. Dans : Les forêts du Bassin du Congo : *État des forêts 2010*. pp 43-62.

Beutchou, A.P. (2010). Élaboration des tarifs de cubage, étude de récolement et analyse des causes d'abandon et de mortalité pour quelques essences exploitées par la CFC dans l'UFA 10 001-1-2-3-4. *Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention d'un Master II en aménagement et gestion participative des ressources forestières. CRESA Forêt-Bois*. 97 p.

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

CIRAD (1998). Le projet d'aménagement pilote intégré de Dimako, Cameroun. CIRAD-Forêt, *Campus International de Baillarguet*; BP 5035; 34032 Montpellier cedex; France. 169 p.

CTFT (1989). Mémento du forestier. 3e éd. *Ministère de la Coopération et du Développement*, 1989. pp 252-261.

Dadzie, P.K. (2013). Potential contribution of branchwood quantity, left after logging operations, towards reducing depletion rate and preserving Ghana's forest ecosystem. *American Journal of Agriculture and Forestry*; Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 32-39. doi: 10.11648/j.ajaf.20130102.12

Dubart, N., Hapi, T.M., Ligot, G., Fayolle, A. (2017). Amélioration continue des plans d'aménagement au Cameroun ; Volet 1 : « Étude pilote sur la révision des tarifs de cubage au Cameroun pour une sélection d'essences commerciales et de promotion. *2ème réunion du Comité Consultatif Scientifique*. Yaoundé, Avril 2017 (présentation).

FAO (1981). Manuel d'inventaire forestier. *Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture*. Rome 1981. pp 115-116.

Fayolle, A., Rondeux, J., Doucet J-L., Ernst, G., Bouissou, C., Quevauvillers, S., Bourland, N., Fétéké, R., Lejeune, P. (2013). Réviser les tarifs de cubage pour mieux gérer les forêts du Cameroun. Dans : Bois et Forêts des Tropiques, 2013, N° 317 (3).15 p.

Fournier-Djimbi, M. et Fouquet, D. (1998). Estimation de la qualité des arbres sur pied. *Série FORAFRI*, Document 9. 27 p.

Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R.J., Valentini, R., Bernoux, M., Saint-André, L. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. Silva Fenn. 45, 477–569.

Jara, M.C., Henry, M., Réjou-Méchain, M., Wayson, C., Zapata-Cuartas, M., Piotto, D., Guier, F.A., Lombis, H.C., López, E.C., Lara, R.C., Rojas, K.C., Pasquel, J.D.Á., Montoya, Á.D., Vega, J.F., Galo, A.J., López, O.R., Marklund, L.G., Fuentes, J.M.M., Milla, F., Chaidez, J. de J.N., Malavassi, E.O., Pérez, J., Zea, C.R., García, L.R., Pons, R.R., Saint-André, L., Sanquetta, C., Scott, C., Westfall, J. (2014). Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. *Ann. For. Sci*. 72, 763–768. doi:10.1007/s13595-014-0415-z

Lanly, J.P. et Lepitre, C. (1970). Estimation des volumes commercialisables dans les inventaires forestiers tropicaux par sondages. *Bois et Forêts des Tropiques* n°129. 20 p.

Ligot, G., Dubart, N., Tchowo, H.M, Bauwens, S., Doucet, J-L, Fayolle, A. (2019). Réviser les tarifs de cubage pour prendre en compte l'évolution de la ressource au Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* N°338. 15 p.

Louppe, D., Oteng-Amoako, A.A., Brink, M. (2008). Ressources végétales de l'Afrique Tropicale 7(1). Bois d'œuvre 1. Traduction de plant : *Plant Ressources of Tropical Africa*. *Timbers* 1. 2008. Fondation PROTA, Wageningen, Pays-Bas/Backhuys Publisher Lieden, Pays-Bas/CTA, Wageningen, Pays-Bas. pp 200-203.

Maindonald, J.H. et Braun W.J. (2015). DAAG: Data Analysis and Graphics Data and Functions. *R package version 1.22*. https://CRAN.R-project.org/package=DAAG. 195 p.

Makemba, R.N., Tosso, F., Moupela C., Daïnou K., Doucet J-L. (2019). Cylicodiscus gabunensis Harms: une espèce prisée dans le commerce international. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 23(3), 188-202. 15 p.

Malnoury, G., Zoyiem, E.N., Larrubia, J.C., Vermeulen, C. (2014). Valorisation des résidus de bois issus de l'exploitation artisanale des forêts communautaires au Cameroun : Cas de la forêt communautaire de Mambioko (GIC CRVC). *TROPICULTURA*, 32, 2, 90-94.

MINFOF (2016). Directives d'inventaires d'exploitation. Ministère des Forêts et de la Faune. 29 p.

Nitcheu, T.S. (2010). Élaboration des tarifs de cubage et étude de récolement et du stock de carbone de quelques essences commerciales des UFA 10007,10015 et 10011 du groupe Vicwood Thanry. *Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention d'un Master II en aménagement et gestion participative des ressources forestières.* CRESA Forêt-Bois. 99 p.

ONADEF (1992). Normes d'étude d'arbres. 56 p.

Paget, D., Desmet, O., Embon, L.P., Ngongo J.-M., Demarquez, B. (2005). Études dendrométriques pour l'aménagement des UFA Kabo, Pokola, Loundoungou et Toukoulaka (nord Congo) : tarifs de cubage. Cellule Aménagement CIB ; Agence Française de Développement ; *Deutsche Gesellschaft*. 30 p.

Paget, D., Desmet, O., Embon, L.P., Ngongo, J.M., Demarquez, B. (2005). Coefficients d'exploitabilité et de commercialisation (UFA Pokola, Kabo, Toukoulaka, Loundoungou) : étude de récolement pour l'estimation des volumes commercialisables. Cellule Aménagement CIB ; Agence Française de Développement ; *Deutsche Gesellschaft*. 10 p.

Projet API. (1995). Projet aménagement pilote intégré de Dimako; Généralités sur l'aménagement des forêts de production de la province de l'Est. *Ministère de l'environnement et des forêts, Direction des forêts*. 123 p.

Rondeux, J. (1999). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. *Les presses agronomiques de Gembloux*. 519 p.

Samba, D., De Madron, L.D., Fontez, B., Giraud, A., Riera, B. (2011). Établissement d'équations entre le diamètre et le volume total de bois des arbres, adaptées au Cameroun. *Dans : Bois et Forêts des Tropiques*, 2011, N° 308 (2). 9 p.

Seka, J.M. (2019). Tarifs de cubage et régénération naturelle de Cylicodiscus gabunensis (Okan) au sud Cameroun. *Thèse de doctorat en sciences forestières. Université Laval*. 132 p. https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/37175/1/35360.pdf

Tchatat, M., Ndoumbè, N.M., Abena, J.C. et Foahom, B. (2008). Volumes de bois autorisés à l'exploitation au Cameroun : détermination des valeurs maximales de dépassement tolérable. Dans : *Bois et Forêts des Tropiques*, 2008, N° 295 (1). 12 p.