

**AMELIORATION CONTINUE DES PLANS
D'AMENAGEMENT AU CAMEROUN (ACPAC) :
Volet 1 : Etude pilote sur la révision des tarifs de
cubage**

Rapport

**Coopération financière COMIFAC - Allemagne
Programme de «Promotion de l'exploitation certifiée des forêts »**

COMIFAC/KFW

Projet N° BMZ: 2008 66 707



en coopération avec



**Votre interlocuteur
à GFA Consultant Group GmbH est**

Romain LORENT

**Coopération financière COMIFAC - Allemagne
Programme de «Promotion de l'exploitation certifiée des forêts »
COMIFAC/KFW
Projet N° BMZ: 2008 66 707
PPECF**

AMELIORATION CONTINUE DES PLANS D'AMENAGEMENT AU CAMEROUN : Volet 1 : Etude pilote sur la révision des tarifs de cubage

Auteur du Rapport :



Address
GFA Consulting Group GmbH
Eulenkrogstraße 82
D-22359 Hamburg
Germany
Phone +49 (40) 6 03 06 – 211
Fax +49 (40) 6 03 06 - 119
Email: afrika@gfa-group.de



ACPAC :

Amélioration Continue des Plans d'Aménagement au Cameroun

Volet 1 : Etude pilote sur la révision des tarifs de cubage

Contrat C054/ACPAC

Rapport de l'étude pilote sur la révision des tarifs de cubage

Mai 2017



Nicolas Dubart¹
Adeline Fayolle²
Gauthier Ligot³

¹ Nature Plus ASBL. WINSTAR Park, Rue Provinciale, 62. 1301 Wavre

² Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, Passage des Déportés, 2. 5030 Gembloux

³ Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, Passage des Déportés, 2. 5030 Gembloux

Table des matières

1. Introduction	3
1.1 Contexte.....	3
1.2 Constats	3
1.3 Le Projet ACPAC	4
2. Objectifs	5
3. Méthodes	6
3.1 Sites d'étude	6
3.2 Essences sélectionnées et arbres échantillonnés.....	7
3.3 Données destructives de volume	8
4. Traitement et analyse des données	10
5. Résultats et discussion	12
5.1 Aperçu du jeu de données.....	12
5.2 Ajustement des modèles	13
5.3 Différences entre sites et regroupement d'essences	14
5.4 Tests de prédiction.....	16
6. Conclusion et perspectives	18
7. Remerciements	19
8. Liste des références	20
9. Annexes	22

1. Introduction

1.1 Contexte

En Afrique centrale les forêts occupent près de 180 millions d’hectares et fournissent de nombreux biens et services à un grand nombre d’acteurs. Environ 26% de ces surfaces sont allouées à des sociétés forestières pour l’exploitation du bois (De Wasseige et al. 2009, 2012). L’exploitation est extrêmement sélective, quelques essences seulement sont ciblées, et les prélèvements sont relativement faibles (moins de 1 arbre par hectare à chaque rotation d’une durée comprise entre 20 et 30 ans) en comparaison aux autres régions tropicales. Les forêts de production d’Afrique centrale sont considérées comme un “modèle” de gestion, par rapport aux autres régions tropicales, et, outre la production de bois, leur rôle essentiel pour la conservation de la biodiversité et du carbone est fréquemment souligné (Nasi et al. 2012).

La connaissance du volume exploitable est une information essentielle pour le gestionnaire forestier et ce à différentes étapes clés de l’aménagement forestier et de la gestion forestière. Initialement, à partir des inventaires d’aménagement, la connaissance du volume exploitable pour les essences d’intérêt et sa répartition spatiale permettent l’aménagement de la forêt et la division de la concession forestière en blocs quinquennaux “équivolumes”. Ensuite, à partir des inventaires d’exploitation, le calcul du volume par essence dans l’assiette annuelle de coupe permet l’établissement des budgets annuels de fonctionnement essentiels au fonctionnement de toutes les activités commerciales de l’entreprise ainsi que la planification des opérations d’exploitation. Ce budget est transmis à l’administration dans le Plan Annuel d’Opération (PAO).

1.2 Constats

Pour calculer le volume des arbres à partir des données de diamètre, issues des inventaires d’aménagement ou d’exploitation, des équations de volume, plus généralement appelées tarifs de cubage, sont utilisées. Les tarifs de cubage sont établis par essence ou groupe d’essences, pour une zone géographique et pour une gamme de diamètres donnée. Si les règles d’aménagement sont relativement comparables entre les pays du bassin du Congo (Fargeot et al. 2004), les normes sont cependant spécifiques à chaque pays.

Il y a par ailleurs des difficultés qui semblent être spécifiques au Cameroun. En effet, au Cameroun les sociétés forestières ont l’obligation légale d’utiliser les tarifs de cubage de l’administration qui sont implémentés dans le logiciel de Traitement Informatique Appliqué à la Modélisation des Aménagements (TIAMA). Or de nombreuses sociétés reportent une inadéquation entre les volumes commerciaux calculés lors de la planification de l’exploitation (PAO) et les volumes effectivement exploités estimés sur parc (Tchatat, 2008). L’écart entre ces volumes est systématique et la plupart des sociétés forestières n’exploitent qu’une partie des arbres prévus dans le PAO, les volumes étant atteints avec un nombre de tiges bien inférieur à celui prévu.

Il a par ailleurs été démontré dans une étude préliminaire menée sur les chantiers d’exploitation d’une entreprise forestière que les tarifs de cubage de l’administration camerounaise ont tendance à sous-estimer le volume de façon significative pour l’Assamela, le Tali, et le Sapelli, et que cette sous-estimation augmente avec la taille des arbres (Fayolle et al. 2013b). Le fait que les tarifs de cubage imposés par l’administration sous-estiment le volume des arbres pourrait expliquer les écarts entre les volumes prévus dans le PAO et les volumes exploités estimés sur parc.

1.3 Le Projet ACPAC

Aujourd'hui, une réelle volonté existe de la part des partenaires privés engagés dans le processus de gestion forestière responsable de revoir les tarifs de cubage pour les essences qu'ils exploitent. Il en est de même pour l'administration forestière, qui s'est avancée vers les aménagements de seconde génération et la révision des normes d'aménagement.

En effet depuis 2013, à travers le projet C2D – PSFE2 financé par l'Agence Française de Développement (AFD) portant sur l'aménagement et le suivi du couvert forestier en lien avec la stratégie REDD+, il est prévu d'appuyer le Ministère des Forêts et de la Faune (MINFOF) du Cameroun dans le cadre de la réalisation de certaines études à caractère stratégique devant permettre d'aboutir à l'amélioration des pratiques en matière d'aménagement forestier. Parmi ces études figure en bonne place une étude nationale sur la révision des tarifs de cubage, précédée par la mise sur pied d'un Comité Scientifique Consultatif de suivi des activités de recherche dans les forêts du domaine forestier permanent. Cette activité est réalisée par le MINFOF et en particulier par la Sous-Direction des Inventaires et Aménagement Forestiers (SDIAF) qui est chargée entre autres prérogatives d'examiner les tarifs personnalisés proposés par les exploitants forestiers.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le Projet Amélioration Continue des Plans d'Aménagement au Cameroun (ACPAC), financé par la COMIFAC dans le cadre du Programme de Promotion de l'Exploitation Certifiée des Forêts (PPECF). Le projet ACPAC a été mis en œuvre entre juillet 2014 et mai 2017 par l'association belge Nature+ (<http://www.natureplus.be>) qui œuvre pour le développement et la recherche appliquée au service des milieux tropicaux, et qui est spécialisée dans la gestion durable des ressources naturelles. Le projet ACPAC comportait trois volets, à savoir : une étude pilote sur la révision des tarifs de cubage (volet 1), une étude pilote sur l'évaluation des plans d'aménagement (volet 2) et une étude pilote sur la révision des plans d'aménagement (volet 3).

2. Objectifs

L'objectif général de ce rapport est de restituer les résultats de l'étude pilote sur la révision des tarifs de cubage au Cameroun pour une sélection d'essences commerciales et de promotion (volet 1 du projet ACPAC).

Ces résultats ont été présentés à l'administration forestière lors de la seconde session du Comité Scientifique Consultatif de suivi des activités de recherche dans les forêts du domaine forestier permanent qui s'est tenue à Yaoundé le 26 avril 2017, la méthodologie ayant été préalablement présentée et validée en 2015 lors de la première session du Comité Scientifique Consultatif.

Spécifiquement, et en accord avec les recommandations du Comité Scientifique Consultatif, nous avons cherché dans cette étude à :

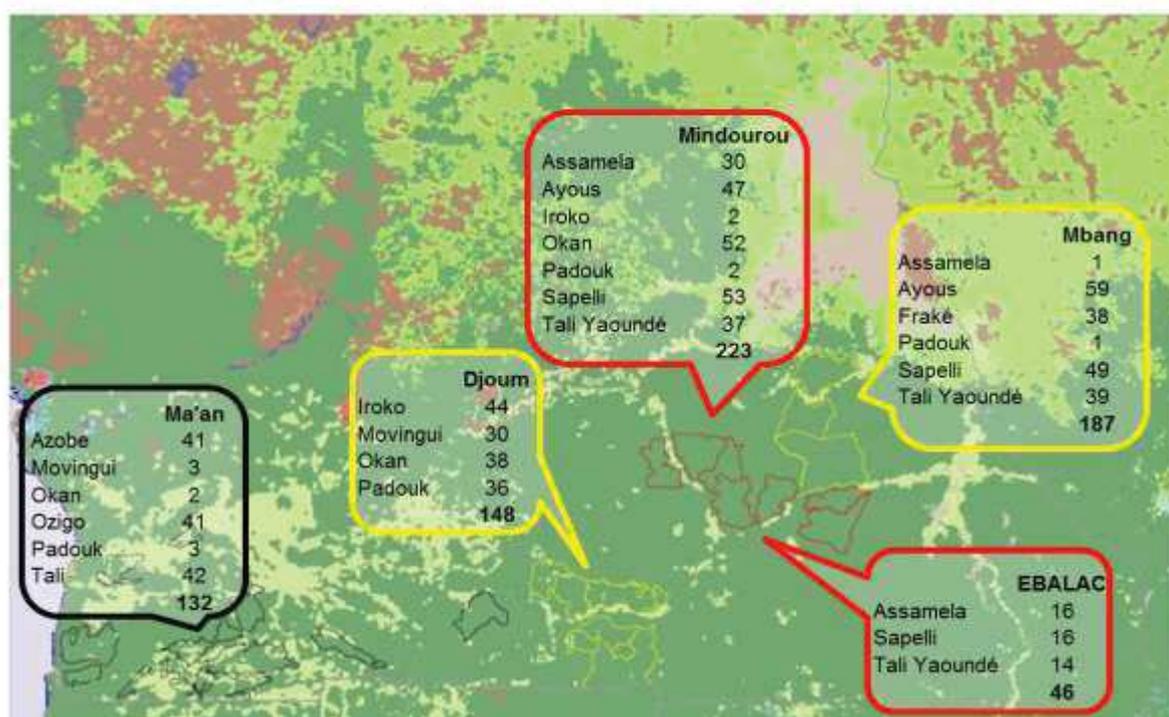
1. Ajuster un tarif de cubage spécifique pour les principales essences forestières exploitées au Cameroun, à partir de données destructives acquises localement à l'échelle de l'arbre par la méthode des billons successifs et selon une méthodologie régionale validée;
2. Tester les différences entre sites pour les essences présentes dans plusieurs sites;
3. Regrouper les essences qui présentent la même allométrie en vue de réviser les tarifs de cubage par essence et/ou groupe d'essences;
4. Tester les prédictions des tarifs existants, comprenant les tarifs en vigueur au Cameroun et issus du logiciel TIAMA, et les tarifs recensés dans la plateforme GlobAllomTree (Henry et al. 2013, <http://www.globalloometree.org/>);
5. Evaluer la possibilité d'utiliser les données DF10 en vue d'établir des tarifs de cubage.

3. Méthodes

3.1 Sites d'étude

La collecte des données a été réalisée dans quatre sites d'étude (Figure 1) qui sont exploités par trois sociétés forestières partenaires du projet ACPAC. Le site de Ma'an (société Wijma) est situé au sud du Cameroun près de la frontière avec la Guinée équatoriale, et présente une forêt de terre ferme de basse et moyenne altitude de type sempervirent. Les sites de Djoum (groupe Rougier) et de Mindourou (Pallisco) se situent respectivement au sud et à l'est de la Réserve de faune du Dja, et présentent une forêt de transition entre les types sempervirent et semi-caducifolié. Le site de Mbang (groupe Rougier) situé plus au Nord de la Réserve de faune du Dja présente une forêt de type semi-caducifolié. Les données du Projet EBALAC ayant été collectées (selon la même méthode) sur le site de Mindourou, ont été jointes aux données ACPAC.

Figure 1. Localisation des sites d'étude au Cameroun et échantillonnage réalisé.



Les quatre sites d'étude sont bien représentatifs des forêts du Cameroun, si l'on se réfère à la stratification forestière réalisée dans le cadre de la Composante 2b du Projet de Renforcement des Capacités Institutionnelles en matière de REDD pour la gestion durable des forêts dans le bassin du Congo (PREREDD+, Fayolle et al. 2014). Dans le cadre de cette composante 2b, qui vise à établir des équations allométriques de biomasse pour les forêts du bassin du Congo, une stratification des forêts à l'échelle régionale avait été réalisée à partir de données de télédétection et des cartes phytogéographiques nationales (Annexe 1). L'utilisation de cette stratification comme zonation écologique pour les forêts du Cameroun et spécifiquement pour l'établissement de tarifs de cubage (équations allométriques de volume) dans le cadre du projet ACPAC avait été validée en 2015 lors de la première session du Comité Scientifique Consultatif. En plus des types de forêts et/ou zone écologique, les sites d'études couvrent par ailleurs une certaine variabilité climatique, avec des précipitations variant de 1500 à 2000 mm par an, entre respectivement le site de Mbang et de Ma'an.

3.2 Essences sélectionnées et arbres échantillonnés

Ce sont 12 essences qui ont été sélectionnées dans le cadre de cette étude (Tableau 1). Il s'agit des principales essences commerciales exploitées au Cameroun pour le bois d'oeuvre (de Wasseige et al. 2009, 2012). Dans la mesure du possible, et en fonction de la répartition géographique des essences, mais aussi des pratiques et du calendrier d'exploitation des différents sites et sociétés partenaires, les essences ont été échantillonnées dans plusieurs sites (Figure 1).

L'échantillonnage réalisé est le suivant :

- Assamela (n=2 sites, Mbang et Mindourou),
- Ayous (n=2, Mindourou et Mbang),
- Azobe (n=1, Ma'an),
- Fraké (n=1, Mbang),
- Iroko (n=2, Djoum et Mindourou),
- Movingui (n=2, Djoum et Ma'an),
- Okan (n=3, Djoum, Ma'an et Mindourou),
- Ozigo (n=1, Ma'an),
- Padouk (n=4 sites),
- Sapelli (n=2, Mbang et Mindourou),
- Tali (n=1, Ma'an)
- Tali Yaoundé (n=2, Mbang et Mindourou).

Une distinction est faite entre Tali et Tali Yaoundé car il s'agit de deux espèces différentes, respectivement *Erythrophleum ivorense* et *Erythrophleum suaveolens*, bien que ces deux espèces soit exploitées sous le même nom commercial Tali (Duminil et al. 2010).

Pour chaque essence étudiée, l'échantillonnage des arbres repose sur une analyse préalable des structures de population (disponibilité des tiges dans chaque classe de diamètre) réalisée à partir des données d'inventaire d'aménagement et/ou d'exploitation.

Une première phase de prospection a également permis d'identifier un certain nombre d'arbres bien répartis sur la gamme de diamètre (5 tiges par classe de diamètre de 10 cm d'amplitude, soit 30 à 50 tiges au total par essence).

Afin de respecter la législation camerounaise qui interdit l'abattage des arbres en dessous du Diamètre Minimum d'Aménagement (DMA, qui selon les sites et les essences est supérieur ou égal au Diamètre Minimum d'Exploitation, DME, fixé par l'administration forestière), les arbres ayant un diamètre de référence inférieur au DMA ont dans un premier temps été prélevés lors de l'ouverture et de la réhabilitation des routes. Dans un second temps, un permis d'exploitation pour la récolte des produits forestiers à des fins scientifiques a été délivré par l'administration forestière pour l'abattage des arbres ayant un diamètre inférieur au DMA, dans le cadre de ce projet. Malgré cela, pour 3 essences, l'échantillonnage des arbres en dessous du DMA reste cependant limité à l'issue de la campagne de collecte de données destructives de volume (l'Azobé (DMA = 60 cm), le Movingui (DMA = 60) et les deux Talis (DMA = 50)).

Tableau 1. Liste des essences étudiées et caractéristiques de l'échantillonnage (effectifs et diamètres).

Essence	Projet ACPAC				Projet EBALAC	TOTAL
	Échantillonnage prévu		Échantillonnage réalisé		Échantillonnage réalisé	
	n	Diamètre (cm)	n	Diamètre (cm)	n	n
Assamela	35	[40-110]	31	[38,0-108,2]	16	47
Ayous	60	[40-160]	108	[27,1-279,7]		108
Azobe	50	[40-140]	40	[53,1-187,5]		40
Fraké	50	[40-140]	38	[44,3-132,1]		38
Iroko	45	[40-130]	46	[49,9-186,7]		46
Movingui	35	[50-120]	33	[65,0-137,8]		33
Okan	50	[40-140]	92	[31,1-217]		92
Ozigo	40	[40-120]	41	[29,2-120,3]		41
Padouk	35	[50-120]	41	[47,2-133,9]		41
Sapelli	60	[40-160]	102	[31,0-173,9]	16	118
Tali	55	[40-150]	42	[46,8-145,7]		42
Tali Yaoundé			78	[47,0-135,2]	14	92
TOTAL	515		692		46	738

3.3 Données destructives de volume

La méthodologie de travail retenue pour la collecte des données de volume nécessaire à l'établissement de tarifs de cubage (et validée lors de la première session du Comité Scientifique Consultatif en juin 2015) correspond à une approche relativement classique en sciences forestières à savoir l'échantillonnage destructif par la méthode des billons successifs (voire notamment Rondeux 1999).

L'adaptation au contexte spécifique de l'Afrique centrale, avec des arbres de très grandes dimensions et avec des déformations parfois importantes, a été réalisée à partir des travaux préliminaires menées par Rondeux et Bourland (2010) au Congo et par Fayolle et al. (2013b) au Cameroun dans le cadre du projet d'Estimation de la Biomasse Aérienne Ligneuse en Afrique Centrale (EBALAC, Fayolle et al. 2013a).

Figure 2. Estimation du volume par la méthode des billons successifs : A) mesure de la longueur de la bille, B) marquage à la craie des billons, et C) mesures du diamètre des billons (crédit photo, Nature+, 2016).



Avant l'abattage, les arbres préalablement repérés lors de la prospection et/ou des opérations de triage ont été marqués et numérotés. Le diamètre de référence (à hauteur de poitrine, c'est à dire à 1,30 m ou 30 cm au-dessus des contreforts/déformations le cas échéant) a été mesuré au ruban diamétrique afin de reporter l'arbre dans le plan d'échantillonnage prévu (Tableau 1), et la hauteur de mesure du diamètre a été marquée à la peinture.

Après l'abattage, sur site d'abattage, les souches et les culées ont été mesurées (les diamètres sont mesurés au ruban diamétrique et les longueurs sont mesurées à la chevillière) afin d'estimer le volume résiduel laissé en forêt. Comme pour la hauteur de mesure du diamètre de référence, la limite de la bille (première grosse branche) a également été marquée à la peinture.

Sur parc, le volume exploité (c'est-à-dire le volume sur écorce de la bille) a été estimé par la méthode des billons successifs. La longueur de la bille a tout d'abord été mesurée à la chevillière (Figure 2A). La longueur des billons de un à deux mètres de long (un mètre au début de la bille puis deux mètres par la suite quand la bille devient plus régulière) a ensuite été délimitée à la craie (Figure 2B). Les diamètres gros bout et petit bout de chaque billon ont enfin été mesurés au ruban diamétrique (Figure 2C).

L'ensemble de la collecte des données, à l'exception du site de Mindourou, a été réalisé par le même ingénieur forestier, Mauriad TCHOWO HAPI. Tout au long de la collecte un contrôle qualité des données, sur le terrain et à distance, a été régulièrement mené par Nature+, en charge de l'expertise long terme sur le projet. L'ensemble des données collectés est stocké et archivé par Nature+, et disponible à la demande.

Pour chaque arbre échantillonné, les données de cubage à renseigner dans les documents sécurisés DF10 (diamètre gros bout, diamètre petit bout et longueur de la bille) ont également été mesurées.

4. Traitement et analyse des données

En préalable aux analyses, le volume de chacun des billons a été déterminé par la formule du tronc de cône (Rondeux, 1999). Le volume de la bille correspond à la somme de tous les billons.

Les données de volume du projet EBALAC (Fayolle et al. 2013a) ont également été intégrées à l'analyse (Figure 1 et Tableau 1). Ces données ont été collectées dans un des quatre sites d'étude, le site de Mindourou, avec exactement le même protocole, et pour trois essences sélectionnées dans le projet ACPAC, à savoir l'Assaméla, le Sapelli et le Tali Yaoundé (Fayolle et al. 2013b).

Plusieurs entrées, en général le diamètre et la hauteur des arbres, peuvent être utilisées pour développer des tarifs de cubage (voir par exemple l'ajustement du modèle de Schumacher-Hall par Akindélé et LeMay 2006 pour les principales essences commerciales au Nigéria). Comme les données de hauteur sont rarement disponibles dans les données d'inventaire d'aménagement et d'exploitation au Cameroun, seuls des tarifs à une entrée, le diamètre, ont été considérés dans cette étude.

Différents modèles incluant des modèles polynomiaux (m1 à m4) et le modèle puissance avec (m5) ou sans terme additif (m6) ont été ajustés sur l'ensemble du jeu de données disponibles pour chaque essence (tous sites confondus). Les modèles ont été ajustés pour le volume exploité/exploitable (c'est-à-dire le volume sur écorce de la bille).

$$(m1) \quad V = cD^2$$

$$(m2) \quad V = a + cD^2$$

$$(m3) \quad V = bD + cD^2$$

$$(m4) \quad V = a + bD + cD^2$$

$$(m5) \quad V = a + bDc$$

$$(m6) \quad V = bDc$$

Pour prendre en compte l'hétéroscédasticité des données, la variance résiduelle a été modélisée lors de l'ajustement des modèles (voir par exemple, Saint-André et al. 2005). En effet, il existe généralement une forte hétéroscédasticité dans les données dendrométriques, la variance du volume augmentant fortement avec le diamètre des arbres (Picard et al. 2012).

Deux approches ont été prises en compte pour modéliser la variance, une approche "fixe" où l'erreur (ϵ) dépend de la variance (σ) et du diamètre (D^2), et une approche "puissance" où l'erreur (ϵ) dépend de la variance (σ) et du diamètre (D^2) à la puissance ψ .

Différents critères ont été considérés pour sélectionner le meilleur modèle pour chaque essence, c'est-à-dire le meilleur tarif de cubage. Il s'agit notamment du Critère d'Information d'Akaike (AIC) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, pour Root Mean Square Error, en m^3) pour l'ensemble des modèles, mais aussi du coefficient de détermination (R^2) pour les modèles linéaires (m1 à m4).

La structure des résidus a également été analysée graphiquement, et prise en compte pour choisir le meilleur modèle.

En outre, des validations croisées de type "leave one out" ont été réalisées et ont assuré la qualité des ajustements proposés.

Pour tester les différences d'allométrie entre sites pour les essences suffisamment représentées dans au moins deux sites (soit pour 4 essences: Ayous, Okan, Sapelli et Tali Yaoundé), différents modèles dérivés du modèle m3 et incluant ou non un effet site sur les paramètres du modèle ont été ajustés aux données. Toutes les combinaisons (effet site sur un ou sur tous les paramètres du modèle) ont été testées, et différents critères de sélection (AIC, RMSE) ont été utilisés pour identifier le meilleur modèle (incluant ou non un effet site).

Pour regrouper les essences qui présentent la même allométrie, une première approche basée sur la comparaison des paramètres d'un même modèle, le modèle m3, ajusté pour toutes les essences a été réalisée. La question de la nécessité de regrouper les essences pour la gestion des forêts est cependant posée.

Enfin, afin de tester les prédictions des tarifs existants, l'ensemble des tarifs disponibles pour les essences sélectionnées a été extrait de la plateforme GlobAllomeTree (Henry et al. 2013, <http://www.globalloometree.org/>). Les prédictions des tarifs de l'administration forestière pour les quatre zones écologiques ont également été testées, ainsi que les volumes à renseigner dans les documents sécurisés DF10. Les prédictions ont été comparées aux données observées (volumes estimés par la méthode des billons successifs), et le biais et sa significativité (test de Student sur données appariées), le RMSE et l'erreur relative (en %) ont notamment été calculés.

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé avec le logiciel libre R (R Development Core Team 2017).

5. Résultats et discussion

5.1 Aperçu du jeu de données

692 arbres appartenant à 12 essences commerciales majeures en Afrique centrale ont été échantillonnés au Cameroun dans le cadre de cette étude. Si l'on ajoute les 46 arbres du projet EBALAC échantillonnés pour la biomasse mais pour lesquels le volume exploitable a été quantifié selon la même méthode, un total de 738 arbres est donc disponible pour la présente étude pilote de révision des tarifs de cubage au Cameroun.

Si le jeu de données peut sembler restreint par rapport aux données disponibles pour certaines essences tempérées, et particulièrement dans les pays scandinaves (parfois > 1000 arbres, Zianis et al. 2005), il faut néanmoins souligner l'importance de ces données récoltées dans quatre sites au Cameroun avec la même méthodologie et par les mêmes personnes.

Sur l'ensemble des 738 arbres, deux gros Ayous n'ont cependant pas été intégrés dans l'analyse des données car trop dispersés par rapport à l'ensemble du jeu de données.

S'il apparaît nécessaire aujourd'hui pour un certain nombre d'acteurs de la gestion forestière de réviser les tarifs de cubage des essences exploitées ou potentiellement exploitables au Cameroun, il faut être conscient des difficultés associées à la collecte de ce genre de données. Dans le cadre de ce projet réalisé en partenariat avec des sociétés forestières, la collecte de ces données a nécessité une parfaite coordination avec les opérations d'exploitation. Les difficultés suivantes ont été rencontrées sur le terrain :

1. La faible disponibilité des tiges à collecter pour les classes de diamètre recherchées sur la zone en cours d'exploitation, en particulier pour les tiges d'avenir, a conduit à allonger la période de collecte sur l'ensemble des sites.
2. L'absence d'avance d'arbres abattus par rapport au débardage (soit le nombre de pieds abattus avant le débusquage) a conduit l'ingénieur terrain à collecter les données sur quelques arbres à la fois sur site d'abattage et sur parc et non sur un plus grand nombre afin d'assurer une prise de mesure précise pour chacune d'entre elles dans un laps de temps très court conduisant à ralentir les travaux.
3. Le manque de disponibilité des engins (bulldozer, skidder et fourchettes) nécessaires pour effectuer une prise de mesure rigoureuse à amener à plusieurs reprises à suspendre de manière temporaire la collecte des données, rallongeant ainsi la période de collecte.
4. Le déplacement des chantiers d'exploitation des entreprises partenaires hors de la zone écologique prédéfinie (cas de l'Azobé pour l'entreprise Wijma) ou hors de l'aire de répartition de l'essence (cas du Movingui pour l'entreprise SFID à Djoum) a empêché tout complément ultérieur de collecte sur ces zones.

5.2 Ajustement des modèles

Six modèles allométriques ont été testés sur les données destructives de volume collectées au Cameroun par la méthode des billons successifs. **Pour la plupart des essences** (pour 11 essences sur 12), le meilleur modèle sélectionné sur base de l'AIC et du RMSE est **le modèle m3, $V = bD + cD^2$** (Tableau 2). **Pour le Sapelli, le modèle m4, $V = a + bD + cD^2$** qui inclut un paramètre de plus, une ordonnée à l'origine, est légèrement meilleur. La forme globale du modèle est néanmoins comparable pour toutes les essences, et les modèles s'ajustent bien aux données.

Ces résultats vont dans le sens d'une relative simplification des modèles allométriques (Zianis et Mencuccini 2004). Les performances des modèles sont néanmoins variables, avec un RMSE variant entre 1,33 m³ pour l'Ozigo et 4,10 m³ pour l'Ayous, ce qui peut paraître considérable. Il faut néanmoins rappeler que cette dernière essence présente des volumes sur pieds extrêmement importants, allant fréquemment jusqu'à 40 m³ voire même 93 m³ dans ce jeu de données pour un arbre de près de 280 cm de diamètre (non pris en compte pour le calcul du RMSE).

Tableau 2. Ajustement des modèles allométriques reliant le volume (exploitable et sur écorce, en m³) au diamètre (en cm) des arbres pour les 12 essences étudiées. La significativité des paramètres ajustés a, b et c est indiquée avec * pour P<0,05, ** pour P<0,01, *** pour P<0,00, et n.s. pour "non significatif".

Essence	a	b	c	ψ	σ	AIC	RMSE (m ³)
Assamela		-6.6e-03 n.s.	1.1e-03 ***	1.19	4.6E-05	185	1.97
Ayous		-2.9e-02 ***	1.7e-03 ***	1.22	2.9E-05	488	3.47
Azobe		1.4e-02 n.s.	9.3e-04 ***	1.26	1.4E-05	167	2.42
Fraké		-1.3e-02 *	1.6e-03 ***	1.04	1.3E-04	148	1.44
Iroko		-2e-02 **	1.4e-03 ***	1.20	2.9E-05	233	2.87
Movingui		5.1e-03 n.s.	1.1e-03 ***	0.53	2.3E-02	195	2.94
Okan		-6.9e-03 n.s.	1.2e-03 ***	1.14	6.9E-05	474	4.10
Ozigo		-8.5e-03 n.s.	9.9e-04 ***	0.83	8.5E-04	146	1.33
Padouk		-1.4e-03 n.s.	1.3e-03 ***	1.14	6.4E-05	189	2.10
Sapelli	7.7e-02 ***	-2.2e-02 ***	1.4e-03 ***	1.18	4.6E-05	502	3.28
Tali		-1e-02 n.s.	8.8e-04 ***	0.61	5.8E-03	190	1.71
Tali Yaoundé		-2.4e-02 ***	1.3e-03 ***	1.04	1.3E-04	332	1.68

Etant donné qu'il existe une forte hétéroscédasticité dans les données dendrométriques (Picard et al. 2012), une approche de modélisation de la variance a été utilisée et a fourni des résultats extrêmement satisfaisants, comme montré par Saint André et al. (2005) à Pointe Noire au Congo pour l'allométrie des Eucalyptus en plantation. En effet, en plus d'un bon ajustement des modèles aux données, l'analyse des résidus des meilleurs modèles pour chacune des essences ne présente plus d'hétéroscédasticité. La dispersion des résidus est tout à fait acceptable et ne présente pas de biais sur l'ensemble de la gamme de diamètre (Annexe 2).

Il faut cependant noter que l'approche "fixe" de modélisation de la variance n'apparaît pas suffisante pour corriger l'hétéroscédasticité et que l'approche "puissance" retenue dans cette étude (voir les valeurs de ψ dans le Tableau 2) donne des meilleurs résultats.

5.3 Différences entre sites et regroupement d'essences

Les différences d'allométrie entre sites, et la nécessité d'établir des tarifs de cubage spécifiques pour chaque site, ont été testées pour les quatre essences suffisamment représentées dans au moins deux sites, et ce sur l'ensemble de la gamme de diamètre. Pour ces quatre essences testées, les différences entre sites sont négligeables.

- Les différences ne sont pas significatives pour l'Ayous et le Sapelli,
- Les différences sont légèrement significatives pour le Tali Yaoundé,
- Les différences sont significatives pour l'Okan, dont les individus présentent en moyenne des volumes un peu plus élevés à Mindourou qu'à Djoum, pour un même diamètre.

Ces différences de volume peuvent être liées d'une part à la hauteur et donc potentiellement à la fertilité du site car les arbres sont plus hauts à Mindourou et les grumes plus longues, et d'autre part aux pratiques différentes d'exploitation (valorisation commerciale des grumes) menées par les sociétés. L'importante hauteur des arbres sur le site de Mindourou a par ailleurs déjà été démontrée pour un certain nombre d'essences à partir de données dendrométriques non-destructives (Fayolle et al. 2016).

En outre, pour le Tali Yaoundé et Okan, bien que les allométries entre sites soient statistiquement différentes les différences d'allométrie sont ténues (Figure 3, annexe 4).

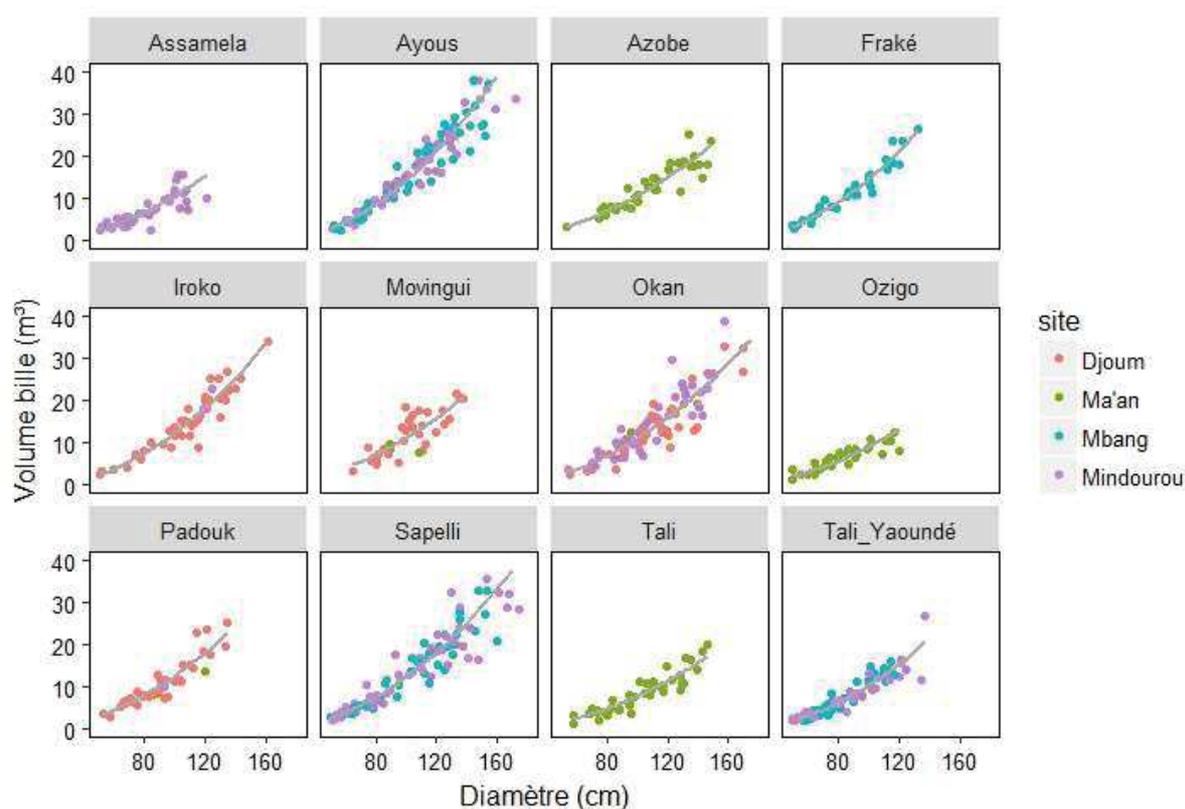


Figure 3. Modélisation du volume (en m³) exploitable en fonction du diamètre (en cm) des arbres. Les courbes correspondent aux ajustements présentés dans le tableau 2, reliant le volume (en m³) exploitable en fonction du diamètre (en cm) des arbres.

La possibilité de regrouper les essences qui présentent la même allométrie, et ce dans le but de réviser les tarifs de cubage par essence et/ou groupe d'essences, a ensuite été examinée. Il n'y a cependant pas de méthode ou d'approche consensuelle pour répondre à cette question.

Au Nigéria, Akindélé et LeMay (2006) ont ajusté un modèle générique pour 33 essences bien représentées, avec le modèle de Schumacher-Hall, $V = \alpha + \beta D \gamma H \delta$, et ils ont classé ces 33 essences en 5 groupes par une approche de classification hiérarchique sur la valeur des paramètres. Ils ont ensuite utilisé une approche d'analyse discriminante pour affecter les 44 autres essences moins bien représentées dans leur jeu de données à un des 5 groupes précédemment établis.

Si cette approche est séduisante et relativement facile à mettre en œuvre, elle ne prend néanmoins pas en compte la variabilité des paramètres du modèle (Figure 4) notamment liée à des différences d'échantillonnage. Une approche légèrement différente basée sur la valeur ajustée des paramètres et l'intervalle de confiance autour de cette valeur a été développée. Ces premiers résultats quoique intéressants n'ont pas été approfondis sachant que l'aménagement et la gestion des forêts de production au Cameroun se fait essence par essence, et qu'il n'apparaît, dans ce contexte, pas forcément nécessaire de regrouper les essences.

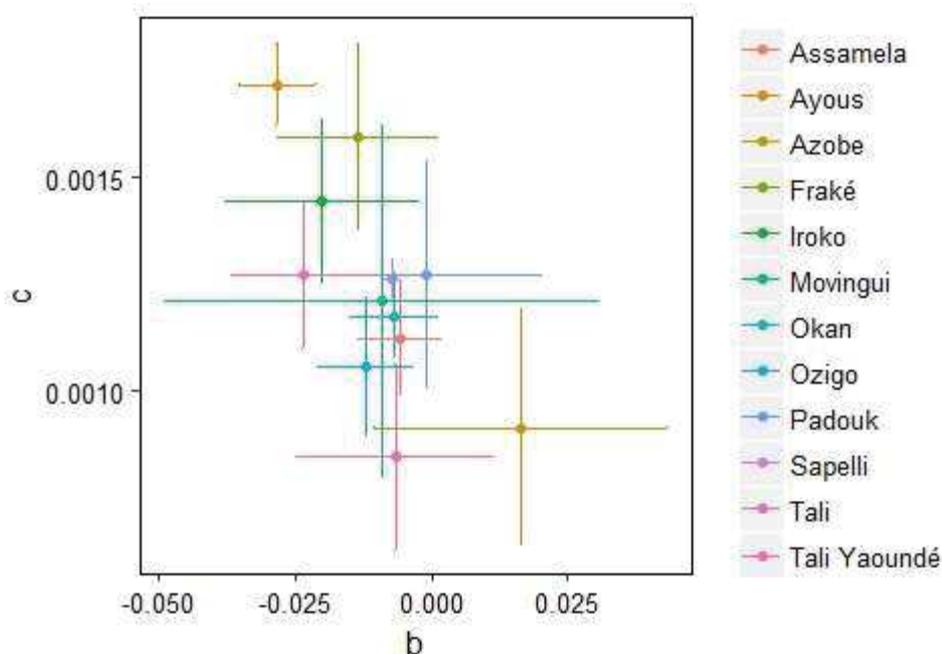


Figure 4. Variabilité de la valeur des paramètres du modèle m_3 , $V = bD + cD^2$, reliant le volume (en m^3) exploitable en fonction du diamètre (en cm) des arbres. Pour chaque essence la valeur moyenne et l'intervalle de confiance sont donnés pour chacun des paramètres du modèle. Par exemple, on peut noter que l'Okan et l'Assamela ont des allométries qui se ressemblent mais divergent par exemple de celle de l'Ayous et du Sapelli.

5.4 Tests de prédiction

Pour tester les prédictions des tarifs en vigueur au Cameroun et issus du logiciel TIAMA, et évaluer la possibilité d'utiliser les données renseignées dans les documents sécurisés DF10 en vue d'établir des tarifs de cubage, une comparaison des volumes prédits par TIAMA et estimés par l'approche DF10 a été faite avec les données observées obtenues par la méthode des billons successifs (Tableau 3).

Ces résultats montrent une **sous-estimation significative** (biais significatif et négatif) et **quasi systématique** (pour toutes les essences sauf le Tali) **des tarifs imposés par l'administration camerounaise**. Ces résultats qui couvrent la plupart des essences exploitées au Cameroun sont en accord avec les résultats déjà reportés au Cameroun pour 3 essences par Fayolle et al. (2013b), et confirment la nécessité de réviser les tarifs de cubage en vigueur au Cameroun.

En ce qui concerne **l'utilisation des données DF10 pour l'établissement de tarifs de cubage, les résultats sont extrêmement hétérogènes entre les essences, et dépendent notamment de la forme des arbres**. Pour l'établissement et/ou la révision de tarifs de cubage, il est nécessaire d'utiliser une méthodologie appropriée, et l'échantillonnage destructif par la méthode des billons successifs est l'approche adéquate, car il s'agit d'un consensus en sciences forestières (Rondeux 1999).

Tableau 3. Test des prédictions des tarifs de l'administration et des contrôles effectués sur parc (DF10) sur les données observées (billons successifs) de volume exploitable. Le biais et sa significativité, le RMSE (en m³) et l'erreur relative (en %) sont donnés pour chacune des essences. La significativité du biais est indiquée, avec * pour P<0,05, ** pour P<0,01, *** pour P<0,00, et n.s. pour "non significatif".

Essence	Administration (TIAMA)			DF10		
	Biais	RMSE (m ³)	Erreur (%)	Biais	RMSE (m ³)	Erreur (%)
Assamela	-0.997 ***	2.153	29.9	0.853 ***	1.211	14.5
Ayous	-4.177 ***	5.901	24.3	0.535 n.s.	3.098	13.1
Azobe	-2.493 ***	3.385	21.3	0.521 **	1.222	7.0
Fraké	-3.961 ***	4.697	38.7	-0.254 n.s.	2.188	15.7
Iroko	-4.051 ***	5.475	23.7	0.604 *	1.998	9.5
Movingui	-3.646 ***	4.930	29.2	0.537 n.s.	1.777	11.5
Okan	-2.385 ***	4.672	23.3	1.297 ***	2.995	10.3
Ozigo	-1.357 ***	1.986	28.0	0.412 ***	0.771	11.4
Padouk	-3.423 ***	4.334	30.0	0.317 n.s.	1.799	10.2
Sapelli	-3.035 ***	4.861	22.7	1.422 ***	2.806	14.8
Tali	0.743 **	1.863	25.8	0.004 n.s.	0.913	7.1
Tali Yaoundé	-0.844 ***	2.081	17.1	-0.356 **	1.043	9.8

Les prédictions des équations allométriques de volume recensées dans la plateforme GlobAllomeTree (Henry et al. 2013, <http://www.globallometree.org/>) pour les 12 essences étudiées ont également été testées, avec la même approche (bais, RMSE et erreur relative). Dans l'ensemble, à l'exception de l'Ayous à Mindourou et de l'Iroko à Djoum, les tarifs de cubage existants donnent globalement de bonnes prédictions du volume exploitable tel que défini dans cette étude, volume sur écorce de la bille (Annexe 3).

Ces résultats obtenus pour les principales essences exploitées au Cameroun suggèrent une faible variabilité régionale dans la forme des arbres comme montrés par Fayolle et al. (2013) pour trois de ces essences au Cameroun et par Maliro et al. (2010) pour trois essences en République Démocratique du Congo. Cette faible variabilité régionale et les différences négligeables entre sites suggèrent qu'une révision nationale des tarifs de cubage serait dans un premier temps tout à fait acceptable au Cameroun, et beaucoup plus facile à mettre en œuvre.

6. Conclusion et perspectives

L'objectif général de cette étude était d'apporter une réflexion sur l'élaboration de tarifs de cubage en vue d'une révision des tarifs de cubage nationaux de plusieurs essences exploitées ou potentiellement exploitables sur le long terme.

A partir de données destructives acquises localement à l'échelle de l'arbre, **nous avons pu ajuster une équation allométrique du volume (pour le volume exploitable) spécifique aux 12 essences étudiées**. Pour chaque essence, les tarifs de cubage élaborés sont d'une précision satisfaisante (valeurs du RMSE comprises entre 1,33 m³ et 4,10 m³).

Grâce aux données collectées sur plusieurs sites **nous avons démontré qu'il n'y avait pas ou peu de différence d'allométrie entre sites pour 4 essences** (Ayous, Tali, Sapelli, Okan) suggérant éventuellement la révision des tarifs de cubage à l'échelle nationale plutôt que par site et/ou par zone écologique.

Nous avons confirmé la faisabilité de développer des tarifs de cubage pour des groupes d'essences. Néanmoins **la question de la nécessité de regrouper les essences pour la gestion des forêts au Cameroun est posée**. A court terme il est plus intéressant de connaître l'allométrie spécifique à chaque essence bien que, à plus long terme, dans le cadre d'une évaluation du potentiel ligneux non exploité actuellement, il pourrait être intéressant d'élaborer des tarifs de cubage pour des groupes d'essences non encore exploitées.

En ce qui concerne les prédictions des tarifs de l'administration, **une sous-estimation significative et quasi systématique du volume a été mise en évidence**, qui varie selon les essences entre 18 et 38%. Dès lors, de par les études préliminaires et les résultats de la présente étude, il apparaît nécessaire de procéder à la révision des tarifs de cubage au Cameroun.

Enfin, **les données renseignées dans les documents sécurisés DF10 ne permettent pas l'établissement de tarifs de cubage** car les diamètres de référence ne sont pas mesurés ni renseignés et car le volume de la bille (assimilé à un cylindre de diamètre moyen) est surestimé pour un certain nombre d'essences.

Cette étude est une première étape pour la révision des tarifs de cubage au Cameroun. Un certain nombre de recommandations peuvent être émises à ce stade, notamment :

- Pour les 12 essences étudiées, il est préconisé que les tarifs de cubage proposés soient validés par l'administration. De cette manière, il sera permis aux entreprises forestières d'utiliser librement ces 12 tarifs de cubage dans le cadre de leur gestion (élaboration de Plan Annuel d'Opération, élaboration ou révision de Plan d'Aménagement), sans tenir compte des valeurs de possibilité obtenues au travers de TIAMA.
- Il est aussi conseillé de réviser les tarifs de cubage à l'échelle nationale tant pour les essences exploitées commercialement que pour les essences potentiellement exploitables. Cette révision pourrait être menée par une institution scientifique nationale coordonnant la collecte et l'analyse des données et aboutirait à des publications techniques et à la transmission à l'administration d'un document technique révisable, complétant ainsi la nouvelle réglementation camerounaise en matière de gestion forestière.
- A terme il serait donc souhaitable que le logiciel TIAMA soit également actualisé et complété avec les tarifs de cubage les plus récents, une fois qu'ils auront été validés par l'administration.

Les résultats de cette étude ont été présentés lors de la seconde session du Comité Scientifique Consultatif à Yaoundé le 26 avril 2017. Le rapport de l'étude pilote sur les tarifs de cubage sera remis aux membres du Comité Scientifique Consultatif pour analyse en interne avant d'être soumis au Ministre de tutelle pour appréciation.

7. Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au financement de la COMIFAC dans le cadre du Programme de Promotion de l'Exploitation Certifiée des Forêts au travers du Projet ACPAC “Amélioration Continue des Plans d'Aménagement au Cameroun”. Les auteurs remercient les sites et les sociétés forestières partenaires du projet ACPAC, les membres du Comité Scientifique Consultatif de suivi des activités de recherche dans les forêts du domaine forestier permanent, et les participants de la seconde session dudit Comité du 26 avril 2017 à Yaoundé au Cameroun pour leur retour constructif.

8. Liste des références

Akindede, S.O., LeMay, V.M., 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecol Manag* 226, 41–48.

De Wasseige, C., De Marcken, P., Bayol, N., Hiol Hiol, F., Mayaux, P., Desclée, B., Billand, A., Nasi, R., 2012. Les forêts du Bassin du Congo - Etat des forêts 2010, Office des publications de l'UE. ed. Luxembourg.

De Wasseige, C., Devers, D., De Marcken, P., Eba'a Atyi, R., Nasi, R., Mayaux, P., 2009. Les forêts du Bassin du Congo - Etat des Forêts 2008, Office des publications de l'UE. ed. Luxembourg.

Duminil, J., Heuertz, M., Doucet, J.L., Bourland, N., Cruaud, C., Gavory, F., Doumenge, C., Navascués, M., Hardy, O.J., 2010. CpDNA-based species identification and phylogeography: application to African tropical tree species. *Mol Ecol* 19, 5469–5483.

Fargeot, C., Forni, É., Nasi, R., 2004. Réflexions sur l'aménagement des forêts de production dans le bassin du Congo. *Bois et forêts des tropiques* 281, 19–34.

Fayolle, A., Doucet, J.-L., Gillet, J.-F., Bourland, N., Lejeune, P., 2013a. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management* 305, 29–37. doi:10.1016/j.foreco.2013.05.036

Fayolle, A., Handerek, D., Lejeune, P., 2014. Stratification des forêts du bassin du Congo pour l'établissement d'équations allométriques (No. 029/COMIFAC/S). *Nature +*.

Fayolle, A., Loubota Panzou, G.J., Drouet, T., Swaine, M.D., Bauwens, S., Vleminckx, J., Biwole, A., Lejeune, P., Doucet, J.-L., 2016. Taller trees, denser stands and greater biomass in semi-deciduous than in evergreen lowland central African forests. *Forest Ecology and Management* 374, 42–50. doi:10.1016/j.foreco.2016.04.033

Fayolle, A., Rondeux, J., Doucet, J.-L., Ernst, G., Bouissou, C., Quevauvillers, S., Bourland, N., Feteke, F., Lejeune, P., 2013b. Réviser les tarifs de cubage pour mieux gérer les forêts du Cameroun. *Bois et Forêts des Tropiques* 317, 35–48.

Henry, M., Bombelli, A., Trotta, C., Alessandrini, A., Birigazzi, L., Sola, G., Vieilledent, G., Santenoise, P., Longuetaud, F., Valentini, R., 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 6, 326.

Maliro, T.K., Dimandja, J.P.L., Picard, N., 2010. Volume equations and biomass estimates for three species in tropical moist forest in the Orientale province, Democratic Republic of Congo. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 72, 141–146.

Nasi, R., Billand, A., van Vliet, N., 2012. Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *Forest Ecology and Management* 268, 103–111.

Picard, N., Saint-André, L., 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. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier.

R Development Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. URL <http://www.R-project.org>

Rondeux, J., 1999. La mesure des arbres et des peuplements forestiers, 2nde ed. Les presses agronomiques de Gembloux.

Rondeux, J., Bourland, N., 2010. Appui technique aux études dendrométriques dans le cadre du Projet d'Appui à la Gestion Durable des Forêts du Congo -financement Agence Française au Développement. Nature+.

Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabiala, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above-and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *Forest Ecol Manag* 205, 199–214.

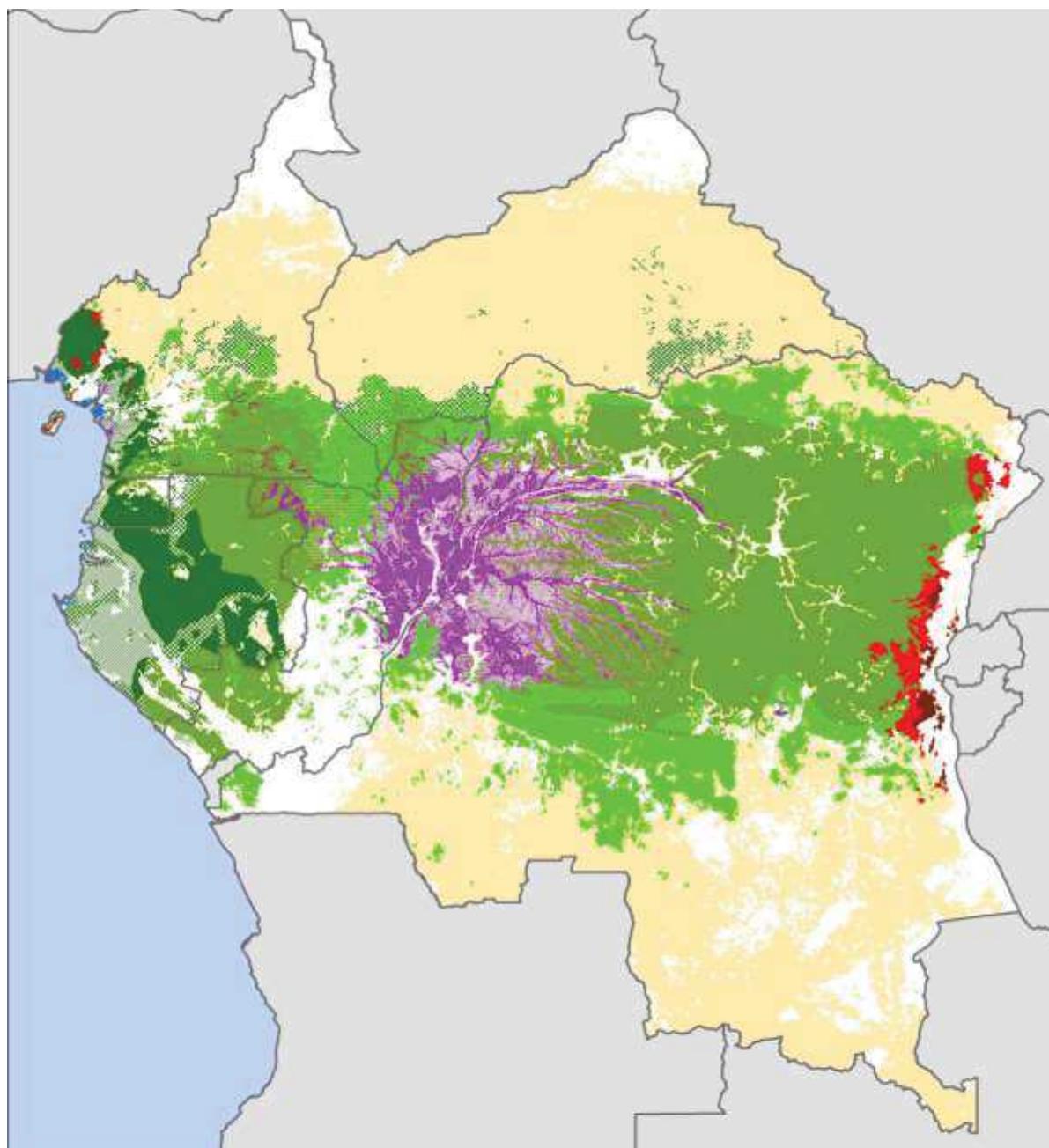
Tchatat, M., Ndoumbè Nkeng, M., Abena, J.C., Foahom, B., 2008. Volumes de bois autorisés à l'exploitation au Cameroun: détermination des valeurs maximales de dépassement tolérable. *BFT* 295, 35–46.

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

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., Mencuccini, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe, *Silva Fennica Monographs*.

9. Annexes

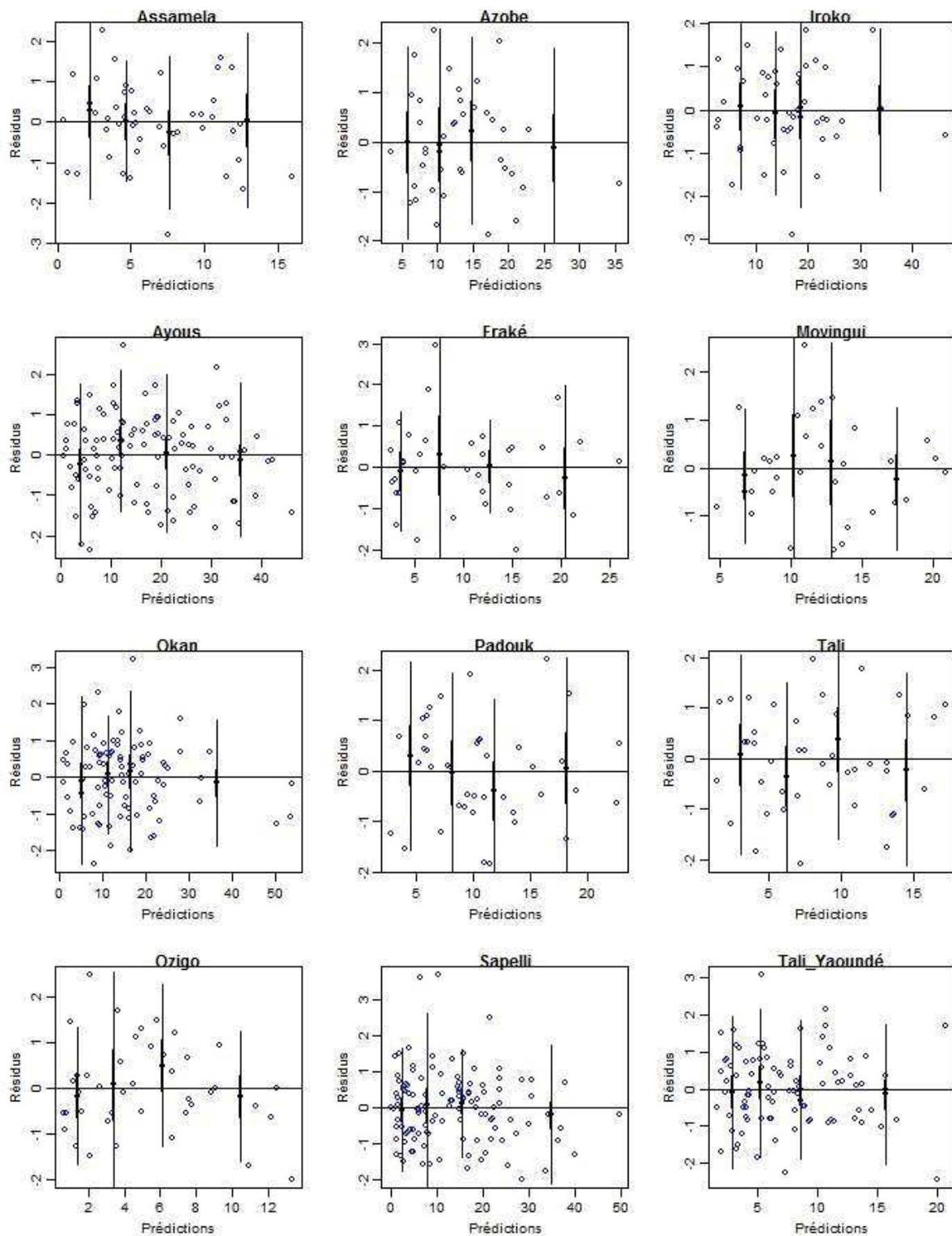
Annexe 1. Les types de forêts du bassin du Congo, d'après un travail de synthèse régional issu de la combinaison d'une pré-stratification régionale et de l'identification de particularités nationales pour chacun des pays (Fayolle et al. 2014).



Légende

- | | |
|---|---------------------------------------|
| Forêt de terre ferme de basse et moyenne altitudes indifférenciée | Forêt marécageuse |
| de type sempervirent | Forêt claire et forêt claire dégradée |
| de type sempervirent littoral | Forêt submontagnarde |
| de type semi-caducifolié | Forêt de montagne |
| de transition | Mangrove |
| Mosaïque de forêt marécageuse et de forêt de terre ferme | Hors-forêt |
| Forêt périodiquement inondée | |

Annexe 2. Résidus (écarts entre les prédictions et les observations) des meilleurs modèles (tarifs de cubage) ajustés pour chacune des essences étudiées (Tableau 2) dans le cadre du volet 1 du projet ACPAC.



Annexe 3. Test des prédictions des tarifs de cubage recensés dans la plateforme GlobAllomeTree (Henry et al. 2013, <http://www.globalometree.org/>) pour les principales essences exploitées au Cameroun. Pour chaque tarif, les prédictions ont été confrontées aux données observées (billons successifs) de volume exploitable. Le biais et sa significativité, et le RMSE (en m³) sont donnés pour chacune des essences. La significativité du biais est indiquée avec * pour P<0,05, ** pour P<0,01, *** pour P<0,00, et n.s. pour "non significatif".

Tarif	Essence	biais	RMSE (m ³)
38628 CMR Stem volume	Assamela	-1.014 ***	2.16
40229 GHA bole volume	Assamela	-1.248 ***	2.32
44446 CMR Stem volume	Assamela	0.129 n.s.	2.15
37172 CMR volume grume sous écorce	Ayous	-3.818 ***	5.39
39609 CIV tarif de cubage	Ayous	-2.11 ***	4.06
42474 GNB tarif de cubage	Ayous	-2.307 ***	4.23
43222 CIV tarif de cubage	Ayous	-3.045 ***	5.00
44735 CMR Stem volume	Ayous	-4.637 ***	6.49
46106 CAF volume de l ensemble des billes utilisées	Ayous	-3.112 ***	4.97
46711 CMR volume grume sous écorce	Ayous	-1.692 ***	3.90
46713 CMR Stem volume	Ayous	-1.68 ***	3.89
47091 GHA bole volume	Ayous	-1.316 ***	3.76
48646 CIV volume fut sur écorce	Ayous	-3.732 ***	5.62
37629 CIV volume grume commercial	Azobe	2.458 ***	4.20
38668 CMR volume grume commercial	Azobe	4.631 ***	5.49
40111 GAB Stem volume	Azobe	-3.622 ***	4.46
41432 CIV tarif de cubage	Azobe	1.406 **	3.12
43615 CMR Stem volume	Azobe	-2.493 ***	3.39
37160 GNB tarif de cubage	Fraké	-1.83 ***	2.64
37161 CIV tarif de cubage	Fraké	-3.828 ***	4.54
39411 CAF volume de l ensemble des billes utilisées	Fraké	-1.088 ***	1.81
41768 GHA over bark	Fraké	-7.002 ***	8.72
43726 CIV tarif bois fort	Fraké	-1.524 ***	2.27
44713 GHA over bark	Fraké	-4.235 ***	5.18
46677 CIV tarif de cubage	Fraké	-2.151 ***	3.16
47115 GAB tarif de cubage	Fraké	-3.059 ***	3.74
48670 CMR Stem volume	Fraké	-1.794 ***	2.58
49228 NGA Volume	Fraké	42.744 ***	58.46
49286 GHA bois fort	Fraké	-10.504 ***	12.34
40230 GHA bole volume	Iroko	-2.479 ***	4.03
41294 CMR Stem volume	Iroko	-3.86 ***	5.31
44261 GNB tarif de cubage	Iroko	-4.854 ***	6.24
44483 CIV tarif de cubage	Iroko	-4.64 ***	6.13

47031 CAF volume de l'ensemble des billes utilisées	Iroko	-0.33 n.s.	2.94
47449 CMR Stem volume	Iroko	-3.367 ***	4.71
48841 CIV tarif de cubage	Iroko	-4.436 ***	5.71
41233 CMR Stem volume	Movingui	-3.646 ***	4.93
41962 GAB Stem volume	Movingui	-2.207 ***	3.72
46265 GNB tarif de cubage	Movingui	-2.278 ***	3.76
37014 GAB Stem volume	Ozigo	-1.923 ***	2.28
42705 GAB tarif de cubage	Ozigo	0.347 n.s.	1.29
40232 GHA bole volume	Sapelli	-0.025 n.s.	3.31
37112 CIV commercial	Sapelli	0.017 n.s.	3.15
37423 CMR commercial	Sapelli	0.499 n.s.	3.30
37426 CMR Stem volume	Sapelli	0.499 n.s.	3.30
39344 CAF volume de l'ensemble des billes utilisées	Sapelli	-0.342 n.s.	3.36
40415 GAB tarif de cubage	Sapelli	-1.795 ***	4.00
42514 CAF commercial	Sapelli	-2.617 ***	4.56
43310 CAF Stem volume	Sapelli	-2.815 ***	4.60
45947 COG commercial	Sapelli	0.273 n.s.	3.22
46678 CIV tarif de cubage	Sapelli	0.439 n.s.	3.18
46948 CMR commercial	Sapelli	-3.158 ***	4.88
48247 CMR Stem volume	Sapelli	-2.663 ***	4.65
49609 CAF Stem volume	Tali	-0.307 n.s.	1.77

Annexe 4 : Illustration des variations d'allométrie ($v = b D + c D^2$) pour l'Okan et le Tali Yaoundé. Les différences bien que statistiquement significatives sont très faibles.

