

ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES ESTIMATIONS DE LA BIOMASSE FORESTIÈRE VIS-À-VIS DE LA HAUTEUR ET DES VALEURS DE MASSES VOLUMIQUES. CAS DE LA FORÊT COMMUNAUTAIRE DE BUSHEMA

Auteur : Neema Bikungu, Plamedie

Promoteur(s) : 2865

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/7451>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

UCLouvain - Faculté des bio ingénieurs

**ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES ESTIMATIONS DE LA
BIOMASSE FORESTIÈRE VIS-À-VIS DE LA HAUTEUR ET DES
VALEURS DE MASSES VOLUMIQUES. CAS DE LA FORÊT
COMMUNAUTAIRE DE BUSHEMA**



NEEMA BIKUNGU Plamedie

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER DE
SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES
PAYS EN DEVELOPPEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2018-2019

REDIGE SOUS LA DIRECTION DU

Professeur Quentin Ponette

COMITE DE LECTURE :

- Géraud DE STREEL
- Professeur Adeline FAYOLLE

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège et/ou de l'UCL ».*

« Le présent document n'engage que son auteur ».

Auteur du présent document : NEEMA BIKUNGU Plamedie

mymyneemam@gmail.com

TABLE DE MATIÈRES

TABLE DE MATIÈRES	iii
REMERCIEMENT	v
LISTE DE TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	viii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION	1
I. REVUE DE LA LITTERATURE.....	3
1. Forêts communautaires	3
1.1. La foresterie communautaire au regard de la loi congolaise	3
1.2. Défis de la foresterie communautaire	4
1.3. Le statut de la forêt selon les représentations sociales	5
1.4. Histoire des forêts communautaires dans le bassin du Congo.....	5
2. Les forêts et la problématique du changement climatique	5
2.1. Effet de serre.....	6
2.2. Les forêts comme puits et réservoir du Carbone	6
2.3. Les forêts comme source de carbone dans l’atmosphère	7
2.4. Importance des forêts dans l’atténuation du changement climatique	8
3. Estimation de la biomasse aérienne de la forêt.....	8
3.1. Equation allométrique	9
3.2. Erreur liée à l’équation allométrique.....	10
II. METHODOLOGIE.....	12
1. Zone d’étude	12
1.1 localisation de la forêt communautaire de Bushema	12
1.2 Climat	13
1.3 Sol	13
1.4 Végétation.....	13
1.5 Population	14
2. Stratégie d’échantillonnage et caractérisation dendrométrique des peuplements	14
2.1. Origine de données	14
2.2 Caractérisation des peuplements	14

2.3. Identification des espèces principales.....	15
3. Ajustement des modèles hauteur totale vs diamètre	16
4. Estimation de la biomasse	17
4.1 Estimation des biomasses individuelles et par parcelle	17
4.2 Impact du choix de l'équation allométrique et du choix de la masse volumique sur l'estimation de la biomasse par parcelle.....	18
III. RESULTATS.....	19
1. Modèles allométriques hauteur vs diamètre	19
1.1. Résultats globaux des différents modèles	19
1.2. Evaluation des meilleurs modèles.....	21
2. Estimation de la biomasse	32
2.1. Modèle de référence.....	32
2.2. Impact du choix de l'équation allométrique	33
2.3. Impact du choix de la masse volumique	34
IV. DISCUSSION.....	37
1. Modèles allométriques hauteur vs diamètre	37
2. Estimation de la biomasse	38
2.1. Impact du choix de l'équation allométrique	39
2.2. Impact du choix de la masse volumique	39
CONCLUSION	41
BIBLIOGRAPHIE.....	42
ANNEXES	I

REMERCIEMENT

Premièrement, nous remercions Dieu Tout Puissant, qui nous accorde le souffle de vie et qui ne cesse de répandre sa grâce sur nous, Lui qui est le maître des temps et des circonstances.

Ce travail est présenté à l'issue d'une année de formation de Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement. Cette formation a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) que nous tenons à remercier infiniment.

Nos sincères remerciements s'adressent à nos encadreurs scientifiques, plus particulièrement aux Professeurs Bernard Tychon, Charles Biolders et au Docteur Antoine Denis pour leur bonne coordination. A travers eux, nous remercions aussi tous les enseignants qui ont eu à nous procurer de leurs connaissances ainsi que tous les assistants.

Nos remerciements s'adressent ensuite à mon promoteur, Professeur Quentin Ponette qui, malgré ses multiples responsabilités, a assuré la direction et le bon déroulement de ce travail. Par sa disponibilité et sa rigueur scientifique, il reste un modèle gravé dans notre mémoire.

Nous exprimons notre reconnaissance au professeur Gérard Imani pour ses soutiens multiples ayant concouru significativement à la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier le comité de lecture de ce travail, le Professeur Adeline Fayolle et monsieur Géraud De Streel.

Nous remercions également tous les camarades de la promotion du Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays en Développement pour l'ambiance amicale qu'ils ont su entretenir tout au long de notre formation en Belgique. Nous citons respectivement selon les pays Rindra et Malala (Madagascar), Jean-Jules Nana Ndangang et Bella Atangana (Cameroun), Elove Herard et Amelissa Pierre (Haïti), Moubarak Mohamed et Fatimata Korgom (Niger), David Milogo (Burkina-Faso), Ernest Ndikubwayo (Burundi), Barry El Hadj (Sénégal), Amir (Algérie), Omram Datonji (Benin) ainsi que nos compatriotes congolais Olivier Bahati, Géant Chuma et Eric Lutete.

Nous ne pouvons pas terminer ce propos sans manifester un sentiment de gratitude envers nos très chers parents Pius BIKUNGU et Noëlla NAFRANGA qui se sont donnés corps et âme pour assurer notre éducation. A travers eux, nous remercions aussi tous nos frères, sœurs, amis et connaissances.

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1: caractérisation dendrométrique des peuplement échantillonnés	15
Tableau 2 : Espèces contribuant à 50% de la surface terrière	16
Tableau 3 : modèles allométriques hauteur vs diamètre ajustés	19
Tableau 4 : biomasses obtenues en considérant l'équation allométrique ajustée sur toutes les espèces confondues.....	33
Tableau 5 : biomasses obtenues par la méthode classique et la méthode spécifique à l'espèce ...	33
Tableau 6 : comparaison de moyenne des biomasses obtenues par la méthode spécifique à l'espèce et celle obtenue par la méthode classique	34
Tableau 7: masses volumiques des espèces principales	34
Tableau 8: impact de la masse volumique sur la valeur de biomasse pour chaque parcelle	35
Tableau 9 : comparaison de moyenne des biomasses obtenues par les différentes valeurs de masse volumique	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de l'effet de serre	6
Figure 2 : Stock de carbone vivant sur la terre.....	7
Figure 3 : Modélisation dynamique du cycle du carbone dans les forêts	7
Figure 4 : Bilan des émissions causées par les écosystèmes forestiers	8
Figure 5: Localisation de la forêt communautaire de Bushema.....	12
Figure 6 : Diagramme ombrothermique du territoire de Kalehe (Sud Kivu) dans lequel se trouve la plus grande partie de la forêt de Bushema.	13
Figure 7 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour toutes les espèces confondues ;.....	22
Figure 8 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour les autres espèces à l'exception des espèces principales	23
Figure 9: Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Carapa grandiflora</i> ».....	24
Figure 10 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Trilepisium madagascariense</i> ».....	25
Figure 11 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Cynometra alexandrii</i> »	25
Figure 12 : modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Grewia mildbraedii</i> »	26
Figure 13 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Lebrunia buchaie</i> »	27
Figure 14 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Parinari excelsa</i> »	27
Figure 15 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Leplaea mayumbensis</i> »	28
Figure 16 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Drypetes dinklagei</i> ».....	29
Figure 17 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Xymalos monospora</i> ».....	30
Figure 18 : Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Piptadeniastrum africanum</i> »	31
Figure 19: Modèle Hauteur vs Diamètre pour « <i>Sapium ellipticum</i> »	32

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- DBH : diamètre à hauteur de poitrine
- FAO : Food Agriculture Organization
- GES : Gaz à effet de serre
- GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- MECNDD : Ministère de l'Environnement, Conservation de la Nature et Développement Durable
- MENCT : Ministère de l'Environnement et Conservation de la Nature et Tourisme
- PNKB : Parc National de Kahuzi Biega
- REDD+ : Réduction des Émissions dues à la Déforestation et la Dégradation Des Forêts

RÉSUMÉ

La connaissance du stock de carbone terrestre est importante pour la mise en œuvre des stratégies d'atténuation du changement climatique. L'estimation de la quantité de carbone stockée dans les forêts tropicales reste néanmoins soumise à de larges incertitudes, particulièrement en Afrique centrale. Dans cette étude, nous avons analysé la sensibilité de l'estimation de la biomasse aérienne vis-à-vis de l'allométrie hauteur-diamètre (h-d) ainsi que de la masse volumique du bois (ρ), en nous appuyant sur l'équation de Chave et al. (2014) appliquée à des inventaires réalisés dans six parcelles d'1 ha de la forêt communautaire de Bushema à l'Est de la République Démocratique du Congo. Pour tester l'impact du choix de l'équation h-d, nous avons ajusté 5 modèles différents pour (i) l'ensemble des espèces simultanément, (ii) chacune des 11 espèces principales (contribution cumulée à la surface terrière de 50%), et (iii) l'ensemble des espèces à l'exception des espèces principales. Les stocks de carbone estimés selon la modalité (i) ont alors été comparés à ceux obtenus en combinant les options (ii) et (iii) ; dans ce cas les masses volumiques moyennes ont été utilisées. Pour tester l'impact de la masse volumique du bois, les stocks de carbone ont été estimés en utilisant l'équation h-d ajustée sur toutes espèces confondues, en considérant les valeurs de ρ minimum, moyenne et maximum issues de la littérature pour les essences principales.

La biomasse obtenue en utilisant la modalité (i) et la masse volumique moyenne des espèces varie de 213,9 à 400,6 Mg/ha en relation avec la surface terrière des parcelles correspondantes. L'utilisation d'équations h-d ajustées pour chacune des espèces principales a conduit à des estimations de biomasses systématiquement supérieures. La masse volumique a également eu une influence importante sur les estimations de biomasse aérienne. Les différences liées au choix de l'équation h-d et de la masse volumique sont du même ordre de grandeur, et varient de 10,4 à 33,4 % en fonction de parcelles. L'utilisation de modèles h-d calibrés pour les espèces principales devrait contribuer à améliorer la précision et l'exactitude dans l'évaluation de la biomasse aérienne des forêts tropicales, pour autant que l'échantillonnage couvre toute la gamme des classes de diamètre.

Mots clés : équation allométrique, masse volumique du bois, biomasse aérienne, forêt communautaire, forêts tropicales.

ABSTRACT

Knowledge of the terrestrial carbon stock is important for the implementation of climate change mitigation strategies. Estimates of the amount of carbon stored in tropical forests, however, remain subject to wide uncertainties, particularly in Central Africa. In this study, we analyzed the sensitivity of the aerial biomass estimate for height-diameter allometry (hd) and the density of wood (ρ), using the equation of Chave et al. (2014) applied to inventories carried out in six 1-hectare plots of the Bushema community forest in eastern Democratic Republic of Congo. To test the impact of the choice of the hd equation, we adjusted 5 different models for (i) all the species simultaneously, (ii) each of the 11 main species (cumulative contribution to the basal area of 50%), and (iii) all species except the main species. The carbon stocks estimated in (i) were then compared to those obtained by combining options (ii) and (iii); in this case the average densities were used. To test the impact of wood density, carbon stocks were estimated using the hd equation adjusted for all species combined, considering the minimum, average and maximum values for the main species from the literature.

The biomass obtained using the modality (i) and the average density of the species varies from 213.9 to 400.6 Mg / ha in relation to the basal area of the corresponding plots. The use of adjusted h-d equations for each of the main species led to consistently higher biomass estimates. Density also had a significant influence on estimates of aboveground biomass. The differences in the choice of the h-d equation and the density are of the same order of magnitude, and vary from 10.4 to 33.4% depending on the plot. The use of calibrated h-d models for the main species is expected to contribute to improved accuracy in the assessment of above-ground biomass of tropical forests, provided that sampling covers the full range of diameter classes.

Key words: allometric equation, wood density, aboveground biomass, community forest, tropical forests.

INTRODUCTION

La foresterie communautaire est un système de gestion durable des ressources naturelles, basé essentiellement sur l'implication des communautés villageoises qui en tirent des revenus susceptibles d'améliorer leurs conditions de vie (Charles, 2007). D'après la FAO, la foresterie participative fait référence aux processus et mécanismes qui permettent aux personnes qui sont directement concernées par l'utilisation des ressources forestières d'être impliquées dans les prises de décision concernant tous les aspects de la gestion des forêts (Schreckenberget Luttrell, 2006). La gestion communautaire des forêts tend à réduire la dégradation de celles-ci car elle est au moins efficace en ce qui concerne la diminution du déboisement. En effet, la grande partie de la dégradation forestière est due à l'utilisation locale des ressources ligneuses et non ligneuses à des fins de subsistance (Skutsch, 2012).

En R D Congo, la législation a introduit des éléments qui permettent aux communautés de gérer les ressources selon leurs propres coutumes, leurs modes de gouvernance et selon des usages multiples qu'elles peuvent définir elles-mêmes. L'arrêté Ministériel 025 portant les dispositions spécifiques relatives à la gestion et à l'exploitation de la Concession Forestière des Communautés Locales, en ses articles 65 et 67, fixe les procédures de gestion et d'exploitation des concessions forestières des communautés locales et ouvre la possibilité pour les concessions forestières des communautés locales d'être utilisées comme des espaces sous gestion autochtone et de conservation communautaire (MECNDD, 2016).

En effet, dans les régions tropicales, bien que les aires protégées soient établies et possèdent un statut légal d'aménagement, des nombreux problèmes subsistent notamment les conflits liés au statut foncier des terres avec les populations locales, les prélèvements illégaux de ressources animales et végétales, etc. Ceux-ci sont accentués par la faiblesse des services étatiques chargés de les protéger (Dupuy, Amsallem, & Maître, 1999). Les couvertures forestières sont converties en champs, pâtures et d'autres occupations du sol répondant à la demande humaine en aliments, énergie et autres intérêts économiques. (Achard et al., 2004).

Les mécanismes tels que REDD+ (Réduction de émissions dues à la Déforestation et la Dégradation des Forêts) ont pour but d'encourager les pays en développement à préserver leurs forêts moyennant les compensations financières. Ces encouragements dépendent des systèmes de mesures concernant l'estimation du stock de carbone de ces forêts (Gibbs et al., 2007).

Cependant, la connaissance sur la biomasse produite par les espèces des forêts communautaires tropicales est très limitée, voire indisponible (Manzo et al., 2015). Mais les problématiques liées au stockage de carbone dans les forêts tropicales requièrent l'estimation de ce stock, ce qui ne peut être faite de manière directe qu'en abattant les arbres et en mesurant leurs masses, ce qui est une méthode destructive. Afin d'éviter cet inconvénient, d'autres paramètres peuvent être récoltés pour estimer la biomasse forestière sans pour autant détruire les arbres (Molto, 2012). La connaissance de la biomasse permet aussi d'améliorer la gestion durable de la forêt car elle renseigne sur le stock de carbones dans les forêts.

En se basant sur l'hypothèse selon laquelle l'identification de la méthode de détermination de la biomasse la mieux adaptée au contexte de forêts communautaires permettrait de répondre aux besoins des intervenants du milieu forestier pour la gestion durable des ressources naturelles. Les équations allométriques développées par Chave et al. (2014) seront utilisées pour mener à bon point ce travail.

La biomasse vivante constituant plus de $\frac{3}{4}$ du stock de carbone forestier (Chave et al., 2005), l'analyse de la sensibilité des estimations de la biomasse vis-à-vis de l'estimation des hauteurs et des valeurs de masses volumique du bois constitue un enjeu important pour le futur durable des forêts, aux échelles globales et locales.

Dans ce contexte, les objectifs spécifiques de ce travail sont les suivants :

- Tester l'impact du choix de l'équation allométrique hauteur versus diamètre sur l'estimation de la biomasse aérienne;
- Tester l'impact de la masse volumique des espèces sur l'estimation de la biomasse aérienne.

Ces objectifs seront traités pour six parcelles d'une forêt communautaire de montagne, la forêt de Bushema.

Outre l'introduction et la conclusion, ce travail comprend trois parties. La première concerne les généralités sur les forêts communautaires, et leur gestion en République Démocratique du Congo, les forêts et la problématique du changement climatique puis la revue de littérature sur les méthodes de détermination de la biomasse. La deuxième partie présente la méthodologie, la troisième présente les résultats ainsi que leur interprétation et la quatrième partie présente les discussions.

I. REVUE DE LA LITTERATURE

Dans cette revue de littérature nous allons présenter une étude bibliographique d'abord sur les forêts communautaires, ensuite sur les forêts et la problématique du changement climatique et enfin sur l'estimation de la biomasse aérienne de la forêt.

1. Forêts communautaires

1.1. La foresterie communautaire au regard de la loi congolaise

Les articles 10 à 23 de la loi N° 11/2002 du 20 août 2002 portant code forestier (Code forestier /RDCcongo, 2002) établissent trois grandes catégories de forêts qui correspondent chacune à une vocation particulière :

- Les forêts classées : sont prioritairement vouées à la conservation de la nature et la flore. Elles comptent notamment les parcs nationaux, les réserves de faune, de flore ou autres aires protégées ;
- Les forêts de production permanente sont celles concédées aux exploitants industriels pour la coupe, la transformation et le commerce ;
- Les forêts protégées qui sont prioritairement vouées au développement local et à d'autres usages.

Le Code consacre les droits des communautés locales à gérer elles-mêmes les forêts qu'elles détiennent en vertu de la coutume, à travers le concept de « concession communautaire » ou forêt communautaire : « Une communauté locale peut, à sa demande, obtenir à titre de concession forestière une partie ou la totalité des forêts protégées parmi les forêts régulièrement possédées en vertu de la coutume » (article 22). Cette disposition permet une responsabilisation des communautés locales dans la gestion des forêts qu'elles possèdent par leurs ancêtres (Code forestier /RDCcongo, 2002). La loi congolaise accorde une flexibilité aussi bien concernant les modalités de gestion coutumière que les objectifs et usages spécifiques des forêts communautaires. Cette innovation en termes de législation sur la foresterie communautaire constitue une opportunité pour développer des modèles de gestion des forêts par les communautés étant inclusifs, participatifs et adaptés aux modes de gestion coutumiers (Anonyme, 2018).

En RDC, la réglementation sur les forêts communautaires autorise les communautés elles-mêmes d'établir et de faire respecter les règles relatives à l'accès et l'utilisation des zones forestières selon leurs propres coutumes (Code forestier /RDCcongo, 2002)

Alors que les forêts communautaires dans les pays voisins ont été envisagées comme une catégorie résiduelle de forêt, essentiellement limitée aux zones les plus dégradées jugées impropres à l'exploitation commerciale ou à la conservation de la biodiversité, il existe potentiellement 75 millions d'hectares de forêts en RDC disponibles pour les communautés et leur développement (en raison notamment du moratoire instauré sur l'attribution de nouvelles concessions forestières). Les forêts communautaires accordent aux communautés tributaires de la forêt des possibilités, même si elles sont limitées, d'acquérir des droits sur la terre et les ressources forestières (Rainforest Foundation, 2016).

1.2. Défis de la foresterie communautaire

Dans le Bassin du Congo et plus particulièrement en RDC, des travaux de cartographie participative ont montré l'existence de systèmes fonciers coutumiers qui sont clairement définis et reconnus par les communautés. Cependant, la gestion formelle des forêts par les communautés en est encore à ses débuts et fait face à plusieurs défis (Billy et al., 2016).

Parmi les grands problèmes auxquels fait face la foresterie communautaire il existe la difficulté de faire sortir les communautés locales de la pauvreté. En effet, selon Billy et al., (2016), l'efficacité de la foresterie communautaire serait conditionnée par les compétences techniques et managériales des communautés, l'accès au financement, aux ressources juridiques et aux informations sur le marché, ainsi que la capacité des communautés à s'intégrer verticalement dans la chaîne de production forestière. Aussi pour passer d'une gestion traditionnelle vers une gestion moderne qui confronte les communautés aux institutions publiques, aux marchés et divers autres acteurs, il leur faut des compétences dans la tenue de la comptabilité, la fiscalité, l'étude de marché, la concurrence et l'innovation-marketing pour résister dans la sphère économique. Cependant, ces genres de compétence sont rares, voire même inexistantes, dans les villages de la République démocratique du Congo (Billy et al., 2016).

Un autre problème auquel fait face la foresterie communautaire est qu'il existe toujours une « hiérarchie sociale » qu'on ne peut pas ignorer quel que soit le niveau de démocratie atteint par les sociétés. Cette réalité est telle que le chef bénéficie de plusieurs avantages liés à sa fonction et les limites de ses avantages ne sont pas clairement déterminées. Ainsi il peut être nécessaire de constituer des comités de gestion communautaire dans lesquels le chef coutumier peut également siéger. Le comité ne remplace pas les chefs dans la gestion quotidienne mais permet de limiter l'étendue de son pouvoir en vue d'assurer une gestion distributive des ressources à l'intérêt général (Billy et al., 2016).

1.3. Le statut de la forêt selon les représentations sociales

Selon les populations bénéficiaires des forêts communautaires, la forêt est un patrimoine qui leur a été transmis par les ancêtres ce qui signifie que tout ce qui est fait dans la forêt passe par la communauté locale, car c'est elle qui en attribue la portion aux demandeurs. Sur ce, la communauté locale doit être consultée, en avance, par toute entreprise dont les activités affectent la structure de la forêt. Les exigences de cahier des charges et de diverses redevances coutumières renforcent cette considération. En effet, les articles 85 et 89 du code forestier ainsi que les arrêtés d'application 023 et 028 prévoient que la Convention d'exploitation ne peut être signée que moyennant la signature d'un cahier des charges dont les dispositions particulières sont arrêtées de commun accord avec les communautés locales du lieu d'exploitation. C'est le cas de toute personne, physique ou morale, détentrice ou non d'un document officiel autorisant l'exploitation de la forêt dans un village (Billy et al., 2016)(Code forestier /RDCongo, 2002).

1.4. Histoire des forêts communautaires dans le bassin du Congo

Le concept de forêt communautaire a été introduit dans le bassin du Congo via le Code forestier de 1994 au Cameroun. Par la suite, ce texte a inspiré une série de lois forestières dans la région, votées dans le cadre des programmes de réforme soutenus par la Banque mondiale et dédiés au secteur forestier des différents pays, pour accroître la contribution des forêts aux économies nationales. Tous les États ont inclus une législation sur les forêts communautaires. A ce jour, on compte près de 300 forêts communautaires dans le bassin du Congo dont le but déclaré est d'élargir la participation des populations locales à la conservation et la gestion des forêts, et de garantir des avantages substantiels aux communautés villageoises (Eisen, Counsell, & Francesca, 2015).

2. Les forêts et la problématique du changement climatique

Le facteur principal du changement climatique est l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone ainsi que d'autre gaz à effet de serre dans l'atmosphère (plus particulièrement le méthane et oxydes nitreux) (Chave, 2019). Le cycle du carbone a été modifié significativement par les activités anthropiques. Depuis 1850, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère est passée de 270 à environ 400 parties par million (ppm) suite à l'usage des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, de la destruction et de la combustion des forêts, surtout dans les zones tropicales (Raven et al. 2007 cité par Espérance, 2016).

Le quatrième rapport du GIEC (GIEC, 2007) a montré, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. En effet, les années allant de 1995 à 2006 constituent les douze années les plus chaudes depuis 1850 avec une tendance linéaire de 0,74/an [0,56-0,92] °C tandis que dans le troisième rapport du GIEC, cette tendance a été estimée pour 1901 à 2000 à 0,6/an [0,4-0,8] °C (GIEC, 2001).

2.1. Effet de serre

Le soleil émet d'une manière permanente un rayonnement qui se propage dans l'espace et dont environ deux tiers traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre. A son tour, la surface terrestre réémet vers l'atmosphère des rayonnements de longueurs d'ondes différentes, correspondant à des infrarouges qui peuvent être piégés, c'est-à-dire absorbés, par certains constituants de l'atmosphère et être réémis vers la surface. L'énergie des rayons est alors conservée, ce qui accroît la température de la basse atmosphère. L'effet de serre est donc un phénomène naturel qui participe de façon prépondérante à l'équilibre thermique de la planète, dont la température moyenne, sans lui, serait environ -18 °C https://www.dictionnaire-environnement.com/effet_de_serre_ID282.html

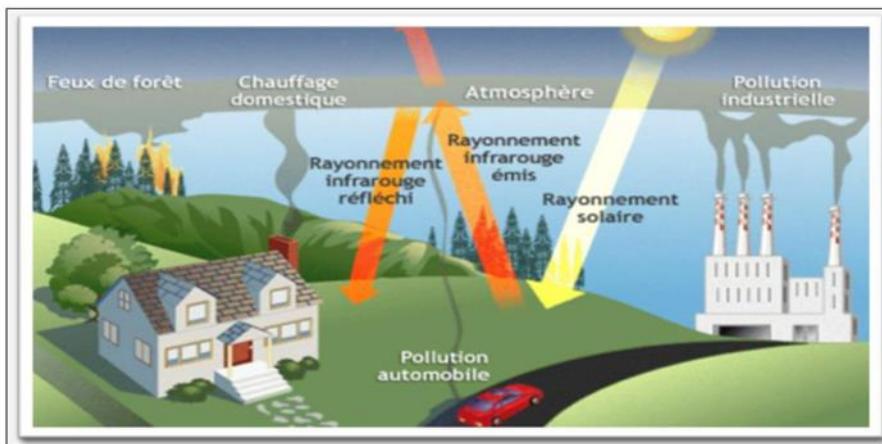


Figure 1 : Schéma de l'effet de serre (encarta version 2008)

2.2. Les forêts comme puits et réservoir du Carbone

On définit un « réservoir » de carbone comme étant un élément du système climatique où est stocké un précurseur des gaz à effet de Serre, principalement le carbone. Ainsi, les forêts, les sols, les constructions, sont des réservoirs du carbone car ils stockent du carbone qui est un précurseur du gaz carbonique ou du méthane. 80% du carbone vivant étant stocké dans les plantes. Une tonne de bois séchée à l'étuve contient en moyenne 0,5 tonne de carbone (Raven et al. 2007, cité par Espérence, 2016).

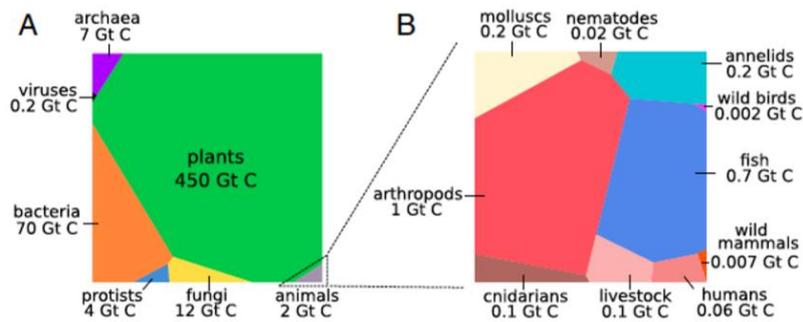


Figure 2 : Stock de carbone vivant sur la terre. 80% du carbone est stocké dans les plantes (Barnet al. 2018 cité par Chave, 2019).

Les « puits » de carbone sont des réservoirs naturels ou artificiels qui retirent le carbone de l’atmosphère. Grâce à la photosynthèse, les forêts constituent des puits de carbone car elles consomment le dioxyde de carbone de l’atmosphère. Ainsi le carbone du gaz carbonique est stocké dans le bois, les feuilles ou d’autres parties de la plante sous forme de lignine ou cellulose et constitue ainsi la biomasse forestière (figure 3) (Riedacker, 2004 cité par Espérance, 2016).

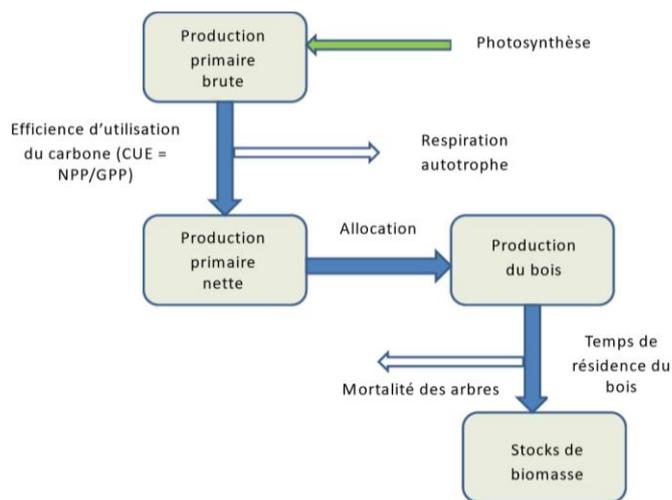


Figure 3 : Modélisation dynamique du cycle du carbone dans les forêts (Malhi, 2012 cité par Chave, 2019).

2.3. Les forêts comme source de carbone dans l’atmosphère

La déforestation et le reboisement sont respectivement une source et un puits de carbone (Bellassen & Luysaert, 2012). Les actions anthropiques comme l’agriculture sur-brulis, l’exploitation forestière, etc. ont une influence négative sur la biomasse forestière et favorisent ainsi l’augmentation des émissions des GES (Lindsell & Klop, 2013). Des études menées par Houghton et Nassikas (2017) cité par (Chave, 2019) ont montré que les forêts tropicales ont plus contribué à l’augmentation des émissions causées par les écosystèmes forestiers jusqu’ à environ 0,6 PgC/an depuis 1950. C’est seulement en Amérique du Nord, en Europe, un peu en Chine et en ex-Union

soviétique qu'on remarque que les forêts ont séquestré le Carbone de l'atmosphère depuis 1950 (fig 4). (Chave, 2019)

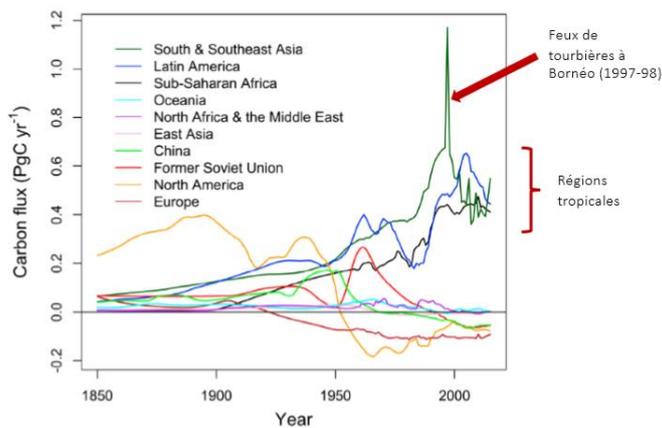


Figure 4 : Bilan des émissions causées par les écosystèmes forestiers : lorsque la courbe se situe dans la zone inférieure à zéro, les forêts de la région constituent un puits de carbone tandis que lorsqu'elle est située dans la zone supérieure à zéro, elles constituent une source de carbone car elles augmentent le flux du carbone dans l'atmosphère (Houghton et Nassikas ,2017, cité par Chave, 2019).

2.4. Importance des forêts dans l'atténuation du changement climatique

Les forêts occupent 31% de la surface de la terre et constituent, après les océans, le 2ème plus grand puit de carbone de la planète. Le carbone, dans les forêts, est stocké dans la biomasse aérienne (3/4 de la biomasse forestière), souterraine, dans le bois mort, dans la litière et dans la matière organique du sol (Chave et al., 2005). Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) a estimé que la contribution des forêts à tous les Gaz à effet de serre issus de l'activité humaine est évaluée à 17,4%. Le reboisement ainsi que la lutte contre la dégradation et la déforestation des forêts constitue l'une des méthodes efficaces de la réduction des émissions et concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

3. Estimation de la biomasse aérienne de la forêt

Le terme biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant devenir des sources d'énergie. Ces matières organiques qui proviennent des plantes sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à la chlorophylle.

https://www.avec-nouvelleaquitaine.com/c_7_46_Qu_est_ce_que_la_biomasse_.html

Le carbone (C) est stocké dans la matière organique vivante ou morte. Elle peut se retrouver au-dessus ou en dessous du sol. La biomasse d'une forêt provient des organismes vivants ou récemment vivants de cette forêt. Le CO₂ est séquestré par les plantes, décomposé au cours de la photosynthèse et utilisé en tant qu'élément constitutif de base des organes des plantes. Lors de la combustion des bois, le carbone est combiné à l'oxygène pour produit le CO₂ qui est reconnu comme l'unité de mesure de réduction des émissions et utilisé lors des achats et ventes des crédits carbonés. Pour quantifier le carbone d'une forêt, on mesure sa biomasse et grâce au lien entre la biomasse et le carbone, on parvient à estimer la quantité de carbone (Mcghee, Saigle, Padonou, & Lykke, 2016).

3.1. Equation allométrique

D'une manière générale, l'allométrie se définit comme étant une étude des échelles de relations entre une partie du corps et le corps dans son ensemble. Elle décrit la manière dont les caractéristiques d'un individu évoluent avec sa taille. Les relations allométriques peuvent être utilisées pour presque toutes les mesures biologiques qui évoluent ensemble. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Relations_allom%C3%A9triques_en_%C3%A9cologie). En matière forestière, l'allométrie concerne les relations entre plusieurs caractéristiques d'un arbre.

En s'appuyant sur ces relations, différentes méthodes sont utilisées pour estimer la biomasse des arbres en Afrique tropicale. Certaines méthodes permettent d'estimer directement la biomasse en fonction du diamètre du tronc, de la densité du bois, et de hauteur totale de l'arbre. D'autres approches sont des méthodes indirectes qui convertissent le volume du tronc, estimé à l'aide d'un tarif de cubage, en biomasse ; la biomasse du tronc est ensuite étendue en biomasse aérienne totale par un facteur d'expansion de la biomasse (Jopaul et al., 2016).

Les équations allométriques pantropicales ont permis d'estimer la biomasse aérienne de la forêt en utilisant les diamètres et la densité des bois (Chave et al., 2005). Les forêts tropicales sont très complexes en ce qui concerne la diversité spécifique. Ce qui rend difficile le développement des équations allométriques propres pour chaque espèce. Ainsi, il paraît nécessaire de recourir à des équations plurispécifiques qui font intervenir la densité du bois dans le jeu de prédicteurs (Chave et al., 2005). Des études antérieures ont permis d'introduire la hauteur dans le jeu de variables pour améliorer la performance des équations. La hauteur peut être mesurées ou estimée à partir d'une équation allométrique (Fayolle et al., 2016)

Plusieurs auteurs ont montré que les biomasses sont significativement variables entre différents types de forêts denses humides en Afrique centrale. Ces variations s'expliquent par des différences

structurales liées aux perturbations anthropiques et/ou aux gradients édaphiques et altitudinaux. Aussi la composition floristique et les variabilités structurales telles que la surface terrière, expliquent en grande partie la variation spatiale de la biomasse des forêts tropicales africaines (Djomo et al., 2011).

3.2. Erreur liée à l'équation allométrique

L'estimation de la biomasse d'un arbre par des modèles allométriques est toujours accompagnée d'une erreur correspondant à l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées. En Afrique tropicale, 76% des erreurs sont dues au choix du modèle allométrique. En effet, toutes les équations pantropicales ne font pas intervenir les mêmes variables explicatives telles que le diamètre, la densité du bois ou la hauteur des arbres. Dans certaines équations, la hauteur des arbres a souvent été ignorée car sa mesure précise est difficile dans les forêts à couvert fermé (Hunter et al., 2013). La manière dont ces variables sont obtenues peut aussi influencer l'erreur étant donné que toutes ces variables ne sont pas mesurées. Certaines sont estimées par des modèles d'autres, sont retrouvées dans la littérature comme par exemple la densité des espèces (Jopaul et al., 2016).

Les études de Chave et al., (2004) ont montré qu'il existe trois lacunes considérables dans l'utilisation des modèles allométriques des forêts tropicales. D'abord les modèles sont construits à partir d'échantillons limités, ensuite leurs applications se font au-delà de la validité de leurs plages de diamètres et enfin, ils considèrent rarement les informations disponibles sur la densité du bois. En incluant la densité spécifique du bois dans les équations, les études de Chave et al., (2004) ont permis de réduire l'erreur de 22 à 13% de la moyenne.

L'introduction de la hauteur de l'arbre dans le modèle allométrique d'estimation de la biomasse comme une variable prédictive permet d'améliorer la qualité du modèle. Chave et al., (2005) ont comparé les modèles allométriques d'estimation de la biomasse incluant les valeurs de hauteurs avec des modèles n'incluant pas les hauteurs des arbres et ont trouvé que les modèles sans hauteur présentaient un mauvais ajustement des données et estimaient mal la biomasse des populations. La validité des équations pantropicales de Chave et al., (2005) a été discutée par Jopaul et al., (2016) et la contrainte a été liée à l'absence de données provenant d'Afrique tropicale pour la calibration des modèles. Ces équations ont aussi été validées à Yangambi, en RD Congo, dans les forêts denses humides (Ebuy et al., 2011).

Étant donné que les mesures des hauteurs sont parfois difficiles à obtenir, Chave et al., (2014) ont proposé des modèles allométriques hauteur vs diamètres qui permettent d'estimer les hauteurs des arbres par leurs diamètres respectifs. Ces équations allométriques ont atteint une précision de 90 %

dans l'estimation de la biomasse dans une forêt tropicale humide. Cependant, elles peuvent significativement varier à l'échelle du paysage. Ainsi Chave et al., (2014) ont proposé que des études soient faites à l'échelle locale et que les hauteurs soient mesurées sur un sous échantillon des arbres stratifiés par le diamètre du tronc et par type de forêt.

II. METHODOLOGIE

1. Zone d'étude

1.1 localisation de la forêt communautaire de Bushema

Le travail a été réalisé dans la forêt communautaire de Bushema située en République Démocratique du Congo à cheval sur la province du Sud Kivu et du Nord Kivu (figure 5). La forêt communautaire de Bushema, avec une superficie de 95937 ha est une forêt de montagne située entre 1250 et 1800 m d'altitude dans les environs du Parc National de Kahuzi Biega (Boyemba et al., 2017). La forêt communautaire de Bushema est partagée entre 5 groupement dans la province du Sud Kivu (Buloho, Mubuku, Mbinga sud et Ziralo) et 1 dans la province du Nord Kivu (groupement de Waloa Lwanda).

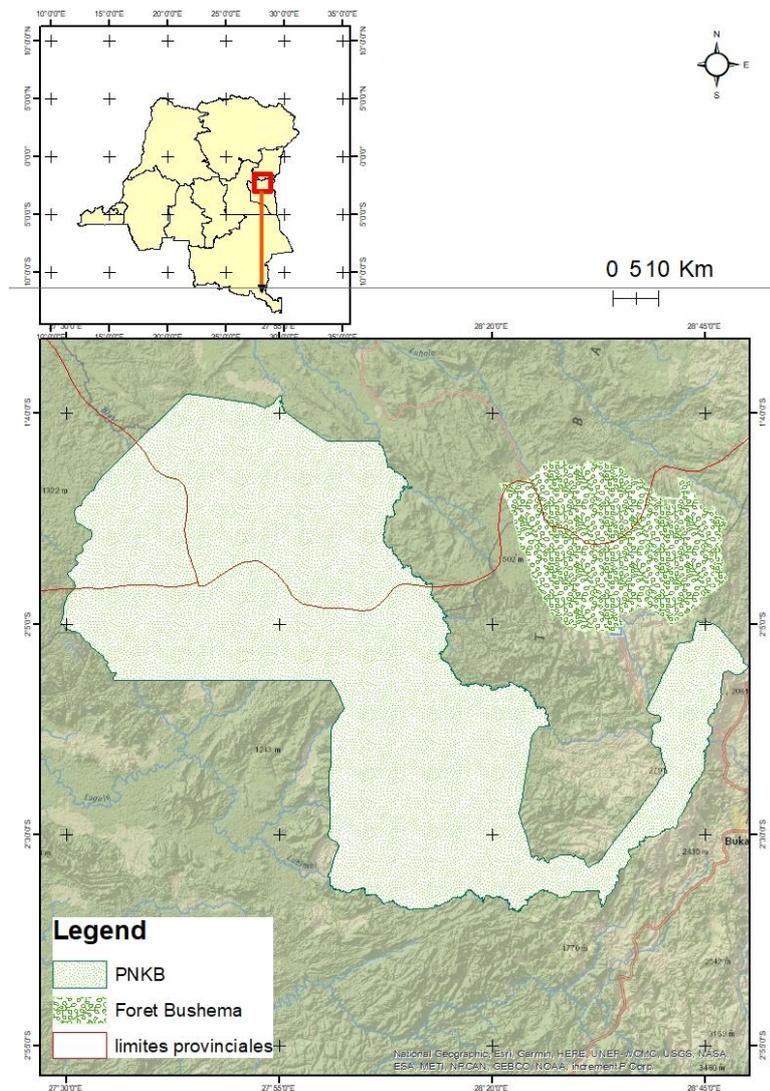


Figure 5: Localisation de la forêt communautaire de Bushema.

1.2 Climat

La forêt de Bushema fait partie des forêts tropicales de montagne qui connaissent deux types de saisons : une saison des pluies et une saison sèche avec des précipitations même pendant le mois le plus sec. Les précipitations annuelles varient avec l'altitude entre 1500 et 2000 mm, la température moyenne annuelle étant de 17°C et l'humidité atmosphérique de 76% (Boyemba et al., 2017).

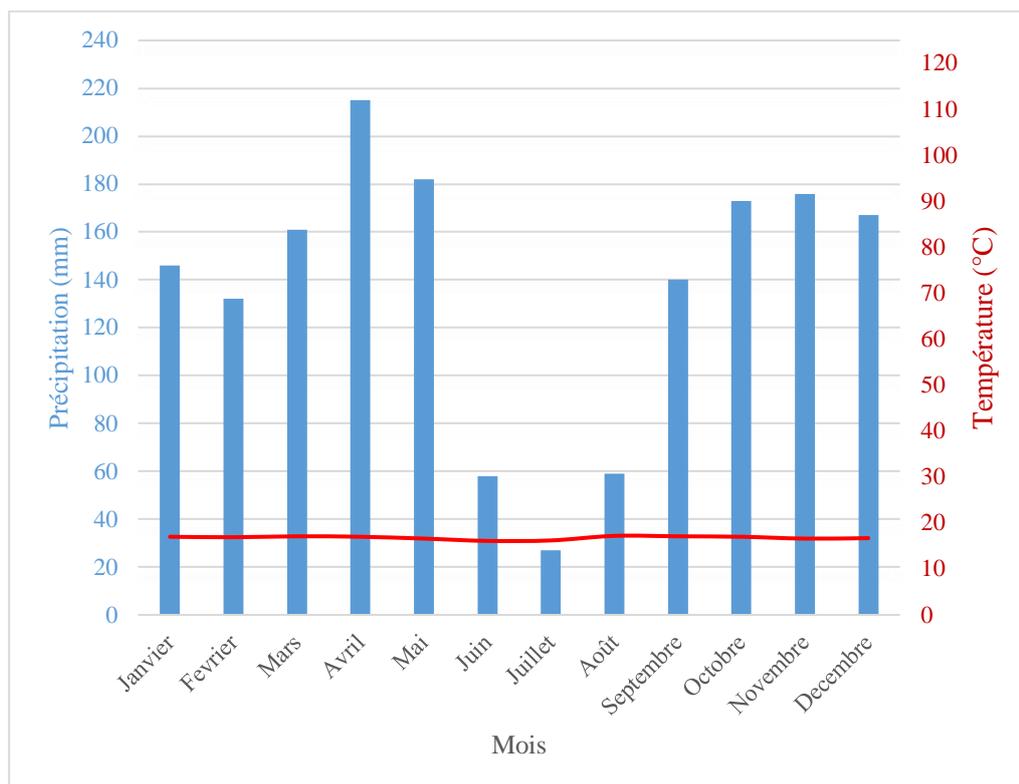


Figure 6 : Diagramme ombrothermique du territoire de Kalehe (Sud Kivu) dans lequel se trouve la plus grande partie de la forêt de Bushema. Les histogrammes indiquent les précipitations et la courbe rouge représente les températures. (<https://fr.climate-data.org/afrique/congo-kinshasa/sud-kivu/kalehe-54564/>)

1.3 Sol

Les sols de la forêt de Bushema sont dominés par des Acrisols et des Ferralsols selon la classification de la FAO. Le substrat géologique est volcanique, riche en basalte (Boyemba et al., 2017).

1.4 Végétation

Les forêts de montagne sont dominées par 9 espèces différentes: *Anonidium mannii*, *Strombosia scheffleri*, *Trichilia welwichii*, *Trilepisium madagascariensis*, *Carapa grandiflora*, *Drypetes*

dinklagei, *Macaranga neomilbraediana*, *Hagenia abyssinica* et *Rapaneamelanophloeos* (Boyemba et al., 2017).

1.5 Population

La forêt de Bushema est occupée par 174398 habitants de communautés différentes : la communauté locale ainsi que le peuple autochtone (les pygmées)(Itongwa & Chatelain, 2016). La majorité des membres de la communauté locale a une connaissance superficielle sur la gestion durable des ressources naturelles, ce qui explique son manque d'implication dans la conservation des ressources. Il convient de noter ici que les limites géographiques de la forêt de Bushema ne sont pas encore matérialisées de commun accord avec les populations locales (Isumbisho, 2013).

2. Stratégie d'échantillonnage et caractérisation dendrométrique des peuplements

2.1. Origine de données

Les données de cette étude portent sur un sous-ensemble de parcelles établies dans le cadre d'une étude plus vaste destinée à étudier la relation allométrique hauteur – diamètre pour l'estimation de la biomasse dans les forêts tropicales (Boyemba et al., 2017). De cette base de données, les données de six parcelles de 1 ha ont été choisies sur base de leur appartenance à la forêt de Bushema qui constitue notre zone d'étude.

2.2 Caractérisation des peuplements

Les mesures ont été effectuées sur tous les arbres vivant ayant un diamètre supérieur ou égal à 10 cm. Le diamètre a été mesuré à 1,3m le long de la tige à partir du sol en utilisant un DBH mètre et la hauteur des arbres a été mesurée sur un nombre d'arbre par espèce et classe de diamètre dans chaque parcelle selon Arcangeli *et al*, (2014) cité par (Boyemba et al., 2017). Ainsi, 1007, mesures de hauteurs ont été effectuées dans les six parcelles constituant notre échantillon dont : 125 mesures de hauteur dans la première, 133 dans la deuxième, 165 dans la troisième, 240 dans la quatrième, 157 dans la cinquième et 187 dans la sixième parcelle.

Tableau 1: caractérisation dendrométrique des peuplement échantillonnés

placette	surface terrière (m ² /ha)	nombre de mesures de hauteur	liste de 5 espèces contribuant le plus à la surface terrière des parcelles #	indice de Shannon
P1	30,9	125	<i>Leplaea mayumbensis</i> (11,4), <i>Parinari excelsa</i> (11,0), <i>Grewia mildbraedii</i> (11,0), <i>Carapa grandiflora</i> (8,2), <i>Drypetes dinklagei</i> (5,9)	3,1
P2	31,5	133	<i>Piptadeniastrum africanum</i> (16,4), <i>Carapa grandiflora</i> (13,9), <i>Ocotea usambarensis</i> (8,3), <i>Drypetes dinklagei</i> (6,2), <i>Cleistanthus polystachyus</i> (4,0)	3,2
P3	30,7	165	<i>Lebrunia buchaie</i> (16,6), <i>Parinari excelsa</i> (9,8), <i>Garcinia punctata</i> (9,3), <i>Musanga cecropioides</i> (9,0), <i>ynometra alexandrii</i> (8,1).	3,4
P4	28,2	240	<i>Grewia mildbraedii</i> (8,7), <i>Lebrunia buchaie</i> (8,3), <i>Syzygium guineense</i> (7,0), <i>Carapa grandiflora</i> (5,6), <i>Polyscias kivuensis</i> (5,5)	3,5
P5	32,9	158	<i>Trilepisium madagascariense</i> (21,8), <i>Sapium ellipticum</i> (10,4), <i>Xymalos monospora</i> (9,5), <i>Grewia mildbraedii</i> (6,1), <i>Myrianthus holstii</i> (5,5)	3,0
P6	42,4	186	<i>Cynometra alexandrii</i> (19,3), <i>Entandrophragma excelsa</i> (6,9), <i>Strombosia scheffleri</i> (6,1), <i>Leplaea mayumbensis</i> (6,1), <i>Leptonychia bampsii</i> (5,8),	3,4

les espèces sont listées par ordre décroissant de contribution à la surface terrière de parcelles; les valeurs entre parenthèses représentent les contributions des espèces à la surface terrière des parcelles en %

2.3. Identification des espèces principssales

Les espèces principales ont été choisies sur base de leur contribution à la surface terrière, en considérant les six parcelles simultanément. Un tableau croisé dynamique nous a permis de calculer la contribution de chaque espèce à la surface terrière de la forêt. Les données ont ensuite été triées par ordre décroissant de contribution de chaque espèce à la surface terrière et les espèces contribuant cumulativement à 50% de la surface terrière ont été sélectionnées.

Tableau 2 : Espèces contribuant à 50% de la surface terrière

Espèces	Contribution à la surface terrière (%)	Gamme de Hauteur (m)	Gamme de diamètre (cm)	Nombre de couples H/D
<i>Carapa grandiflora</i>	6,44	8-38	10-90	35
<i>Trilepisium madagascariense</i>	6,10	8-26	10-53	28
<i>Cynometra alexandrii</i>	5,80	8-33	11-120	28
<i>Grewia mildbraedii</i>	5,49	6-25	10-80	24
<i>Lebrunia buchaie</i>	4,78	5-26	10-150	18
<i>Parinari excelsa</i>	4,66	6-31	10-96	16
<i>Leplaea mayumbensis</i>	4,45	7-31	10-100	27
<i>Drypetes dinklagei</i>	3,35	7-30	10-49	32
<i>Xymalos monospora</i>	3,26	6-20	10-48	27
<i>Piptadeniastrum africanum</i>	3,21	6-33	10-126	23
<i>Sapium ellipticum</i>	3,16	7-32	10-75	20
total	50,71			278
autres espèces	49,29	5-30	10-126	729
toutes espèces confondues	100,00	3-48	10-150	1007

H/D : hauteur /diamètre

3. Ajustement des modèles hauteur totale vs diamètre

Cinq modèles allométriques (Mugasha et al., 2013) ont été considérés dans cette étude.

- Modèle 1 : $H = a \times \exp(-b \times \exp(-c \times D))$
- Modèle 2 : $H = a / (1 + \exp((b - D) / c))$
- Modèle 3 : $H = a \times D / (b + D)$
- Modèle 4 : $H = a \times D^b$
- Modèle 5 : $H = a + b \times \log(D) + c \times (\log(D))^2$

Avec H : hauteur totale (m)

D : diamètre à 1,3 m (cm)

a, b et c les coefficients du modèle estimés à l'aide de la fonction nls dans le logiciel R.

De manière à tester l'impact du choix du modèle allométrique hauteur vs diamètre sur l'estimation de la biomasse, ces modèles ont été ajustés selon les options suivantes (tableau 2) :

- Indépendamment pour chacune des espèces principales ;
- Pour l'ensemble des espèces simultanément ;
- Pour l'ensemble des espèces à l'exclusion des espèces principales.

Pour chacune des trois options ci-dessus, la sélection des modèles s'est faite sur base de critères suivants : le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information Bayésien (BIC) ainsi que le coefficient de détermination R^2 . Globalement le meilleur modèle a été celui de AIC et BIC les plus faibles et de R^2 le plus élevée après avoir vérifié l'absence de l'hétéroscédasticité des résidus.

4. Estimation de la biomasse

4.1 Estimation des biomasses individuelles et par parcelle

Les biomasses de chaque arbre inventorié ont été estimées en utilisant le modèle de Chave et al., (2014). Du fait qu'il n'existe pas encore d'équations locales spécifiques aux régions de montagne du Rift Albertin, les équations allométriques développées par Chave et al., (2014) ont été utilisées. Celles-ci mettent en relation les paramètres dendrométriques dits variables explicatives et les variables expliquées afin que la biomasse soit directement calculée. Ces équations sont les plus adaptées à la réalité de la région de montagne (Imani et al., 2016). Ainsi la biomasse aérienne a été calculée en utilisant le diamètre, la densité de bois ainsi que la hauteur totale comme variables explicatives selon l'équation ci-dessous

$$AGB_{est} = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976}$$

Avec AGB_{est} : la biomasse aérienne estimée en kg/ha

ρ : masse volumique en g/cm^3

D : diamètre à 1,3 m de hauteur en cm

H : hauteur totale en m

Les biomasses ont ensuite été estimées pour chacune des six placettes, en appliquant ce modèle à chaque arbre. La base de donnée mondiale de densités des bois (Zanne et al., 2009) a permis d'obtenir la densité des bois pour chaque espèce. En cas de données manquantes, la masse

volumique considérée correspondait à celle du genre. Les hauteurs ont été estimées à partir du diamètre par les modèles allométriques hauteur vs diamètre.

4.2 Impact du choix de l'équation allométrique et du choix de la masse volumique sur l'estimation de la biomasse par parcelle

Pour tester l'impact du choix de l'équation allométrique h vs d , les stocks de carbone estimés en utilisant l'équation allométrique ajustée sur l'ensemble des espèces ont été comparés à ceux obtenus en considérant les équations allométriques optimisées pour les espèces principales d'une part, et pour toutes les autres essences d'autre part. Dans ce cas, les masses volumiques moyennes des espèces ont été utilisées.

Pour tester l'impact de la masse volumique, les stocks de carbone ont été estimés en utilisant l'équation allométrique toutes espèces confondues, mais en considérant trois valeurs de masses volumiques pour les essences principales, correspondant aux valeurs minimum, moyennes et maximales renseignées dans la littérature (tableau 7).

Un test de moyennes appariées (test de Student) a été appliqué à l'aide du logiciel R pour comparer les moyennes de différentes valeurs de biomasse. La méthode de Shapiro a été utilisée pour vérifier la normalité des échantillons et le test de Fisher a été effectué pour tester l'égalité de variance.

III. RESULTATS

Cette section présente les résultats des modèles allométriques hauteur vs diamètre ainsi que ceux des estimations de la biomasse aérienne.

1. Modèles allométriques hauteur vs diamètre

1.1. Résultats globaux des différents modèles

Le tableau ci-dessous présente les différents modèles ajustés pour estimer les hauteurs en fonction des diamètres des arbres selon les trois scénarios : indépendamment de l'espèce, pour les 11 espèces principales et pour les autres espèces à l'exception des 11 principales.

Tableau 3 : modèles allométriques hauteur vs diamètre ajustés, les meilleurs modèles sont en gras.

Espèce ou groupe d'espèces	#modèle	paramètres des modèles			critères de choix du modèle ^s		
		a	b	c	AIC	BIC	R ²
Toutes espèces confondues	m1	30,05	3,047	0,058	5273,68	5293,33	0,967
	m2	28,56	24,76	10,977	5281,63	5301,29	0,815
	m3	68,17	94,08		5420,08	5434,83	0,788
	m4	1,284	0,738	5557,89	5557,89	5572,63	0,757
	m5	-14,39	6,139	0,938	5355,72	5375,38	0,801
Toutes les espèces hors espèces principales	m1	30,05	3,047	0,058	3871,84	3890,33	0,818
	m2	28,11	24,71	10,66	3876,04	3894,53	0,817
	m3	84,87	126,6		3968,89	8982,76	0,793
	m4	0,999	0,811		4036,27	4050,13	0,773
	m5	-5,764	0,118	1,934	3923,76	3942,25	0,805
<i>Carapa grandiflora</i>	m1	43,11	2,648	0,039	155,94	162,16	0,925
	m2	36,66	29,28	14,14	158,15	164,37	0,92
	m3	75,73	90		152,89	156,86	0,929
	m4	0,908	0,885		152,32	156,98	0,928
	m5	22,43	-18,94	5,27	154,73	160,95	0,928
<i>Trilepisium madagascariense</i>	m1	28,26	2,808	0,08	170,48	175,81	0,604
	m2	26,85	18,19	8,841	169,56	174,89	0,617
	m3	60,55	60		170,16	174,15	0,58
	m4	1,832	0,701		171,14	175,13	0,565
	m5	-8,182	3,59	1,41	172,22	177,55	0,579

Tableau 3 : modèles allométriques hauteur vs diamètre ajustés, les meilleurs modèles sont en gras (suite).

Espèce ou groupe d'espèces	#modèle	paramètres des modèles			critères de choix du modèle [§]		
		a	b	c	AIC	BIC	R ²
<i>Cynometra alexandrii</i>	m1	33,46	2,368	0,05	87,17	89,73	0,877
	m2	33,18	29,77	17,21	86,88	89,43	0,88
	m3	51,02	55,99		87,09	89,01	0,859
	m4	2,37	0,571		89,48	91,4	0,833
	m5	-41,88	24,11	-1,73	89,06	91,61	0,859
<i>Grewia mildbraedii</i>	m1	25,3	3,4	0,08	139,49	144,03	0,74
	m2	25,13	21,97	9,67	138,4	142,94	0,75
	m3	43,93	51,52		142,52	145,93	0,67
	m4	1,961	0,6		145,47	148,87	0,63
	m5	-47,87	28,37	-2,67	142,76	147,31	0,7
<i>Lebrunia buchaie</i>	m1	26,43	4,052	0,09	95,23	98,79	0,9
	m2	25,94	21,07	8,18	96,22	99,78	0,87
	m3	39,6	38,36		103,74	106,41	0,82
	m4	3,154	0,484		111,02	113,7	0,74
	m5	-57,74	34,62	-3,52	96,9	100,46	0,89
<i>Parinari excelsa</i>	m1	29,43	2,315	0,053	75,41	78,5	0,9
	m2	28,59	22,61	13,33	77,58	80,67	0,93
	m3	47,11	47,76		72,88	75,2	0,94
	m4	2,477	0,572		79,86	82,17	0,91
	m5	-27,09	16,38	-0,82	70,83	73,92	0,95
<i>Lepalea mayumbensis</i>	m1	28,65	2,396	0,05	108,69	113,87	0,94
	m2	26,25	24,32	13,3	110,14	115,32	0,92
	m3	52,87	70		105,43	109,32	0,93
	m4	1,112	0,77		107,14	111,03	0,92
	m5	1,438	-3,07	2,16	106,93	112,11	0,93
<i>Drypetes dinklagei</i>	m1	40,96	2,486	0,04	173,75	179,62	0,62
	m2	31,9	24,31	12,93	173,94	179,81	0,66
	m3	62,83	70		171,68	176,08	0,66
	m4	0,981	0,88		171,6	176	0,66
	m5	24,32	-19,47	5,3	173,66	179,53	0,66
<i>Xymalos monospora</i>	m1	60	2,95	0,02	128,01	133,2	0,62
	m2	25,09	30,94	16,15	127,83	133,02	0,62
	m3	42,41	75	127,48	127,48	131,36	0,6
	m4	0,764	0,82		127,07	130,96	0,6
	m5	45,15	-32,18	6,62	126,82	132	0,637

Tableau 3 : modèles allométriques hauteur vs diamètre ajustés, les meilleurs modèles sont en gras (suite et fin).

Espèce ou groupe d'espèces	#modèle	paramètres des modèles			critères de choix du modèle [§]		
		a	b	c	AIC	BIC	R ²
<i>Piptadeniastrum africanum</i>	m1	33,47	3,4	0,064	71,72	74,55	0,86
	m2	32,83	25,4	9,821	70,22	73,05	0,97
	m3	60	67,49		81,89	84,06	0,93
	m4	1,704	0,68		88,36	90,48	0,87
	m5	-38,38	22,11	-1,37	75,58	78,42	0,96
<i>Sapium ellipticum</i>	m1	37,26	3,02	0,05	110,13	114,1	0,85
	m2	31,02	26,8	11,56	109,86	113,8	0,84
	m3	63,24	75		108,7	111,7	0,84
	m4	0,56	1,01		108,7	111,7	0,84
	m5	32,54	-26,65	6,54	110,38	114,4	0,84

[§]AIC: Critère d'Information d'Akaike, BIC: Critère d'Information Bayésien, R²: Coefficient de détermination

[#] m : Modèle; la numérotation des modèles se réfère à la section 3 de la méthodologie

En tenant compte des critères de comparaison dont le AIC, BIC et le R², le modèle 3 a été choisi pour l'estimation de la hauteur en fonction du diamètre pour les espèces suivantes : *Carapa grandiflora*, *Leplaea mayumbensis* et *Sapium ellipticum*. Le modèle 2 a été sélectionné pour ces 3 espèces : *Trilepisium madagascariense*, *Cynometra alexandrii* et *Grewia mildbraedii*. Le modèle 1 a été sélectionné pour toutes les espèces confondues, pour les autres espèces à l'exception de 11 espèces principales mais aussi pour l'espèce *Lebrunia buchaie*. Le modèle 5 a été choisi pour *Parinari excelsa* et *Xymalos monospora*. Pour *Drypetes dinklagei*, c'est le modèle 4 qui a été choisi comme meilleur modèle.

1.2. Evaluation des meilleurs modèles

Les résultats des meilleurs modèles hauteur vs diamètre ayant été sélectionnés sont illustrés par les graphes ci-dessous :

1.2.1. Toutes les espèces confondues

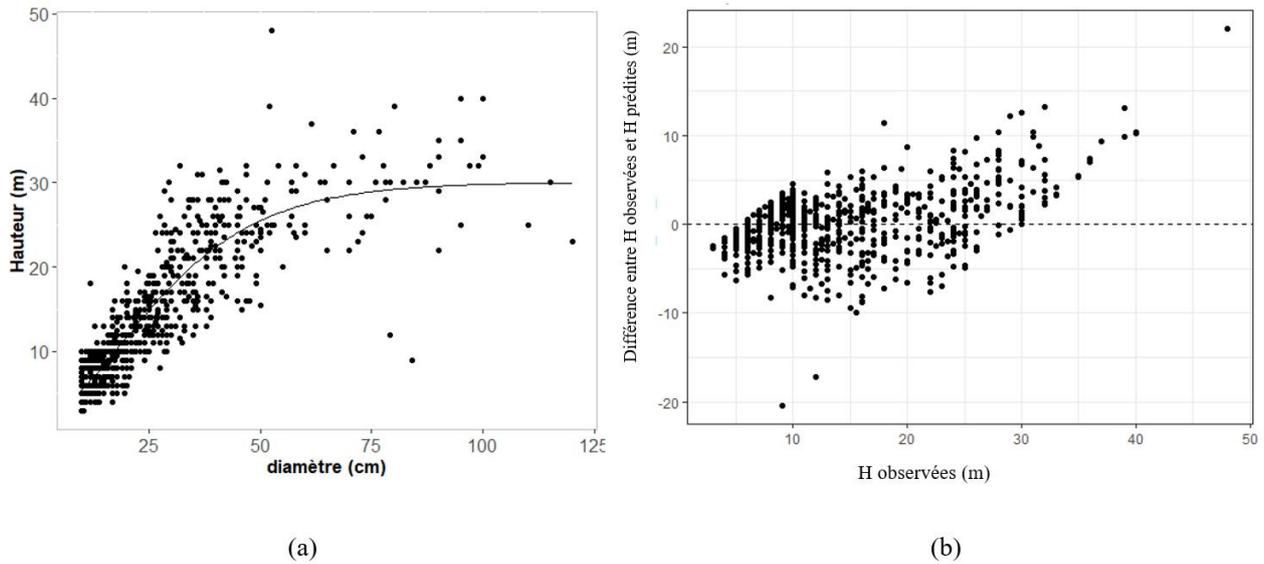


Figure 7 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour toutes les espèces confondues ; les pastilles noirs représentent les points expérimentaux et la ligne continue, le meilleur modèle (modèle 1). (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites), pour le modèle optimal pour toutes les espèces confondues.

Le modèle 1 a été sélectionné comme meilleur modèle pour estimer les hauteurs des arbres en fonction de leurs diamètres respectifs. L'analyse de la performance du modèle a donné les plus faibles indices d'information et le coefficient de détermination le plus élevé (tableau 3). Le coefficient de détermination du modèle 1 indique que le modèle explique 97% de la variabilité totale.

1.2.2. Les autres espèces à l'exception des espèces principales

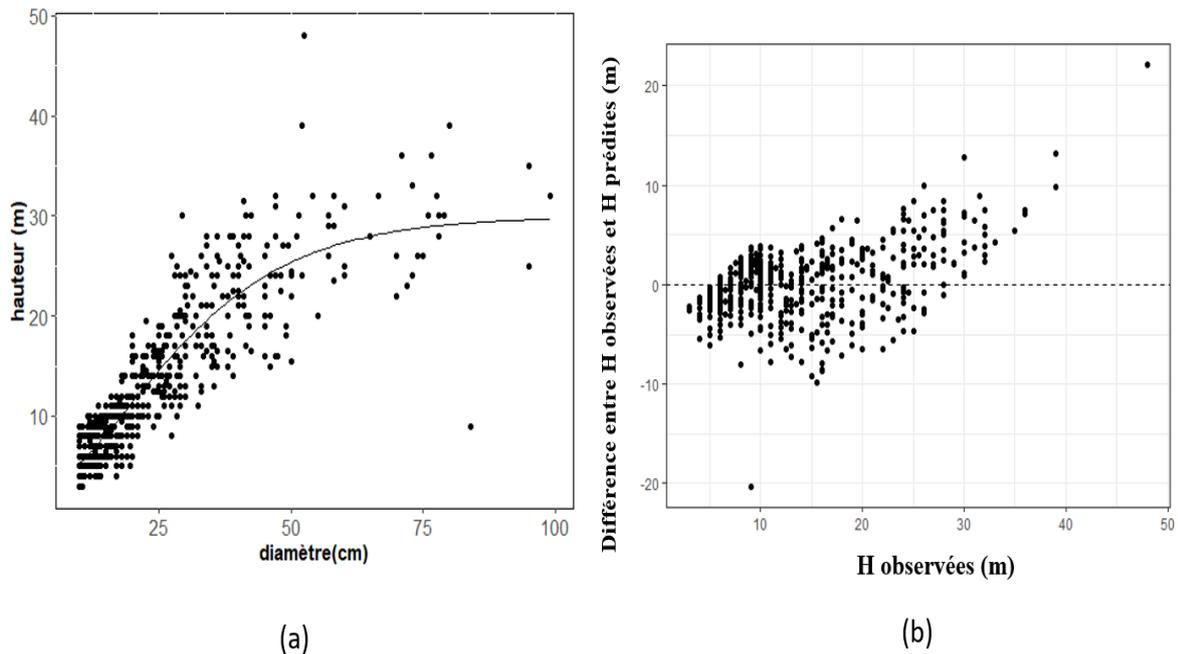


Figure 8 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour les autres espèces à l'exception des espèces principales ; les pastilles noires représentent les points expérimentaux et la ligne continue le meilleur modèle (modèle 1). (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteur observée, pour le modèle optimal pour les autres espèces à l'exception des espèces principales.

Le modèle 1 explique à 81,8% (tableau 3) la variabilité totale liée à l'utilisation des hauteurs de toutes les espèces à l'exception de 11 principales. L'analyse de la figure 8(b) montre que les résidus présentent une bonne homoscedasticité mais pour des grandes hauteurs, il se présente une déviation.

1.2.3. *Carapa grandiflora*

La figure ci-dessous présente le biais entre l'estimation de la hauteur en fonction du diamètre pour (i) le modèle ajusté sur toutes les espèces et appliqué aux données correspondant à l'espèce et « *Carapa grandiflora* » (ii) le meilleur modèle ajusté uniquement sur les données correspondant à l'espèce « *Carapa grandiflora* ».

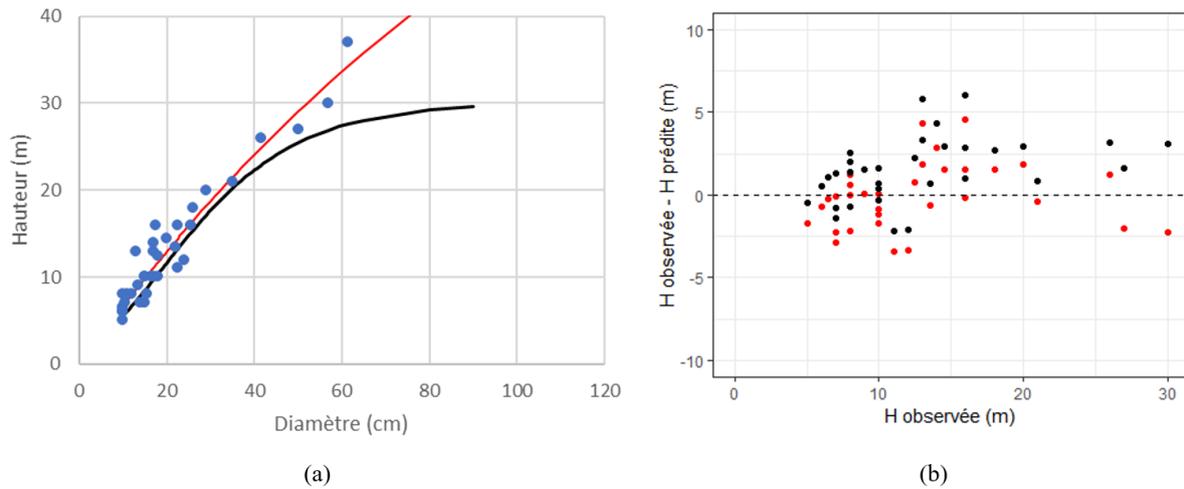


Figure 9: a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Carapa grandiflora* »; les pastilles bleues indiquent les points expérimentaux, la ligne continue rouge, le meilleur modèle spécifique et la ligne continue noire, le meilleur modèle pour toutes les espèces confondues (modèle 1). (b) Résidus en mètre (hauteurs observées - hauteurs prédites) vs hauteur observée. Les pastilles rouges représentent les résidus du meilleur modèle spécifique et les pastilles noires représentent les résidus du modèle optimal pour toutes les espèces confondues.

Le modèle ajusté sur l'ensemble des essences et le modèle spécifique sont proches pour la gamme de diamètre inférieur à 40 cm. Cependant, à partir de 40 cm de diamètre à peu près, les deux modèles commencent à s'éloigner. Le modèle spécifique à l'espèce *Carapa grandiflora* (modèle 3) estime la hauteur de manière non biaisée et le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues tend à sous-estimer les valeurs des hauteurs.

1.2.4. *Trilepisium madagascariense*

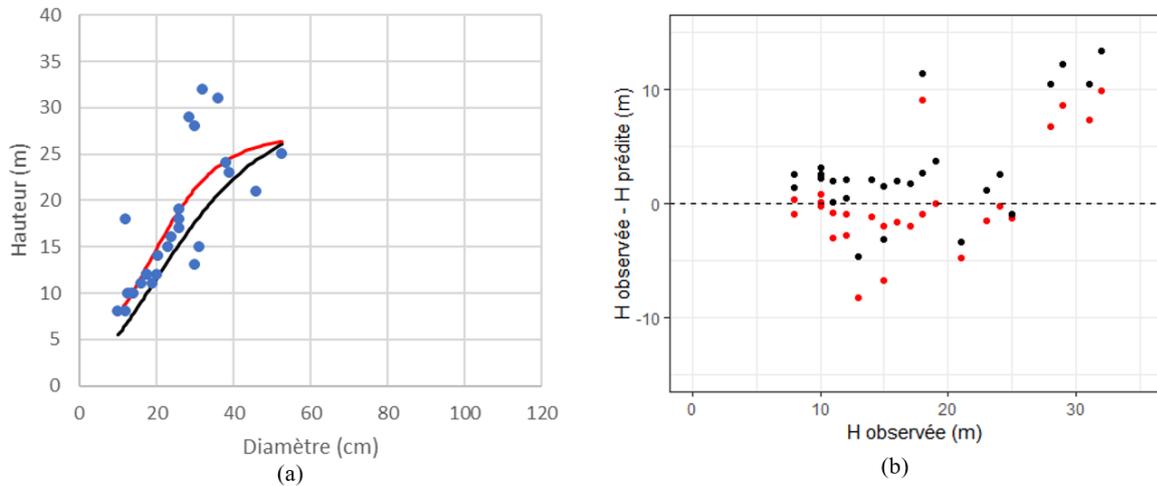


Figure 10 : a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Trilepisium madagascariense* »; les couleurs des pastilles et des lignes sont identiques à celles de la figure 9. (b) Résidus en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

La figure 10 (a) montre que le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues et le modèle spécifique sont différents. En utilisant le modèle ajusté sur toutes les espèces, on tend plus à sous-estimer la hauteur des arbres qu'en utilisant le modèle spécifique.

1.2.5. *Cynometra alexandrii*

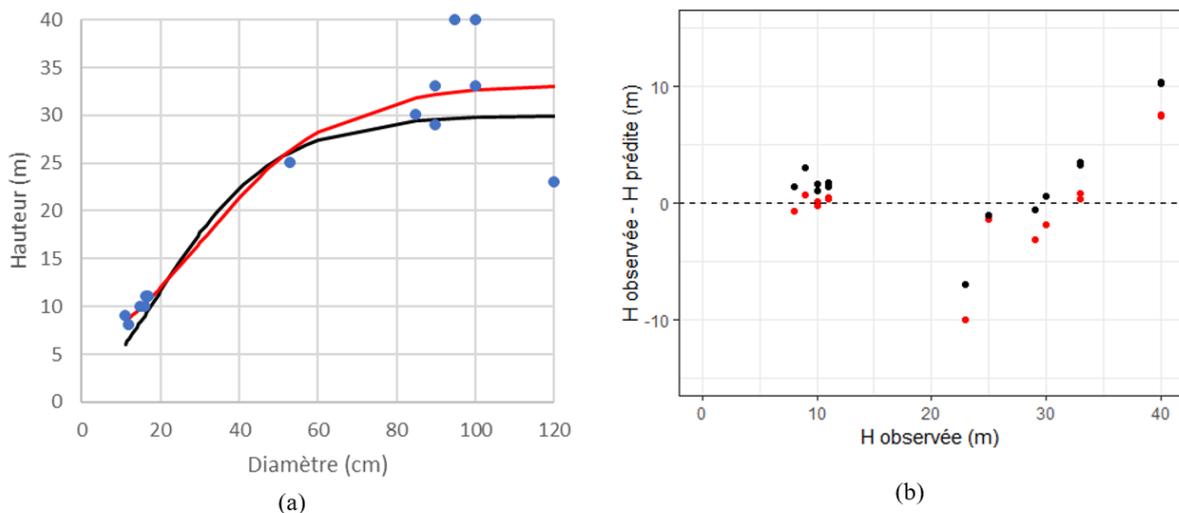


Figure 11 : a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Cynometra alexandrii* »; les couleurs des pastilles et des lignes sont pareilles que celles de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

Les deux modèles, le modèle spécifique à l'espèce et le modèle ajusté sur toutes les espèces présentent un ajustement comparable dans la gamme de diamètre inférieur à 50 cm de diamètre et s'éloignent pour les arbres de diamètres supérieurs à 50 cm. Le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues tend à sous-estimer les valeurs de hauteurs par rapport à celles obtenues par le modèle optimal pour l'espèce.

1.2.6. *Grewia mildbraedii*

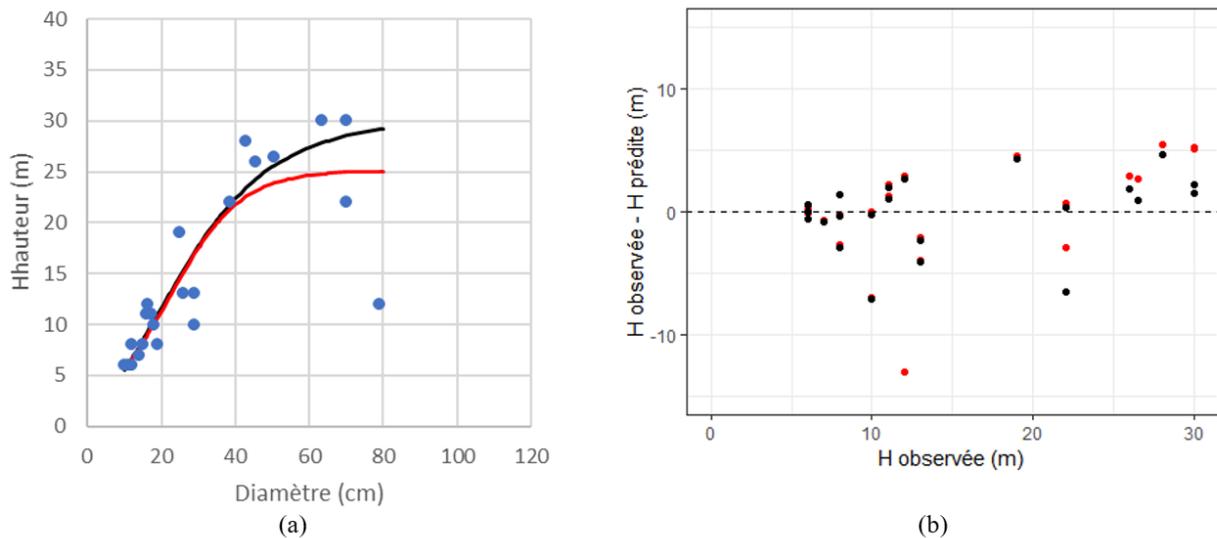


Figure 12 : a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Grewia mildbraedii* »; les couleurs des pastilles et des lignes sont pareilles que celles de la figure 9. (b) Résidus en mètre (hauteurs observées – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

On remarque, par l'analyse de la figure 12 (a), que le modèle spécifique à l'espèce et le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues expriment de manière comparable les hauteurs jusqu'à des valeurs de diamètre de 40 cm. Pour les valeurs de diamètre comprises entre 40 et 80cm, le modèle ajusté sur toutes espèces tend à surestimer les hauteurs des arbres.

1.2.7. *Lebrunia buchaie*

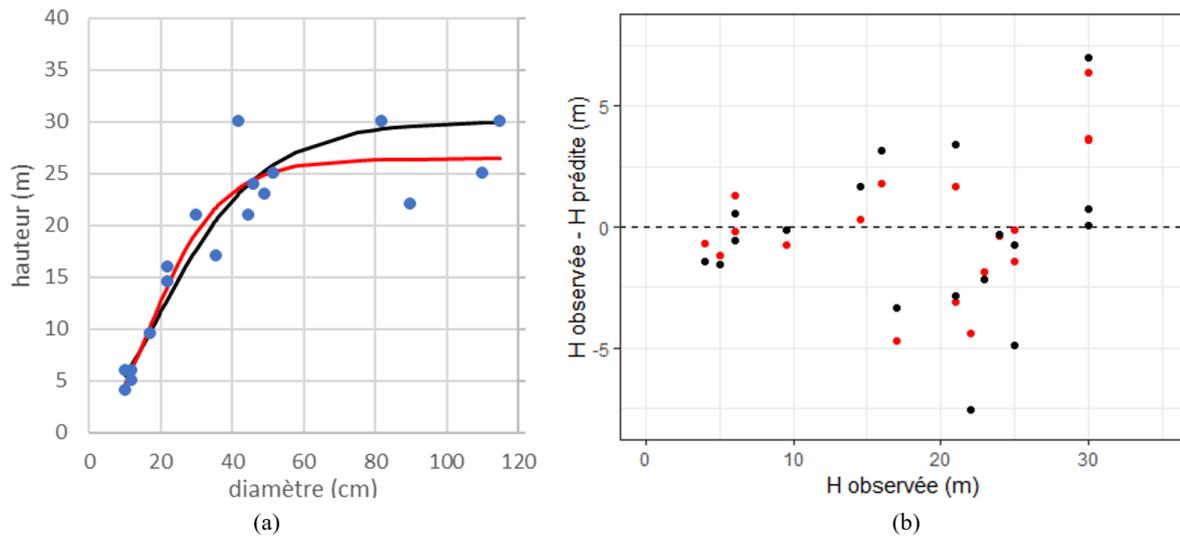


Figure 13: (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Lebrunia buchaie*»; la signification des couleurs des pastilles et des lignes est la même que celle de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

Le même modèle (modèle 1) qui a été sélectionné pour toutes les espèces et pour l'espèce *Lebrunia buchaie*, seules les paramétrisations sont différentes. L'analyse de la figure 1 montre que le modèle spécifique à l'espèce et le modèle ajusté sur toutes les espèces sont aussi performants pour les individus dont le diamètre est inférieur à 40 cm. Au-delà de 40 cm, les deux modèles s'éloignent.

1.2.8 *Parinari excelsa*

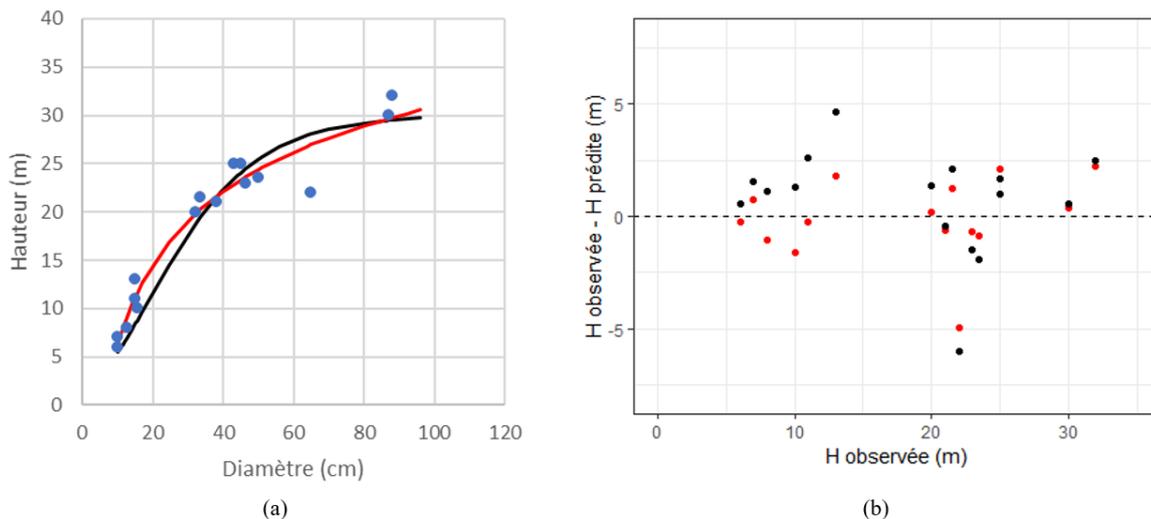


Figure 14 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Parinari excelsa*»; la signification des couleurs des pastilles et des lignes est la même que celle de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

Le modèle toutes espèces confondues tend à sous-estimer les hauteurs des arbres par rapport au modèle spécifique à l'essence pour les diamètres inférieurs à 40 cm et de 40 jusqu'à à peu près 85cm de diamètre, c'est le modèle spécifique qui tend à sous-estimer les hauteurs des arbres par rapport au modèle optimal pour toutes les espèces confondues. Le graphe de résidu présente une bonne distribution des différences entre les hauteurs observées et les hauteurs prédites.

1.2.9. *Leplaea mayumbensis*

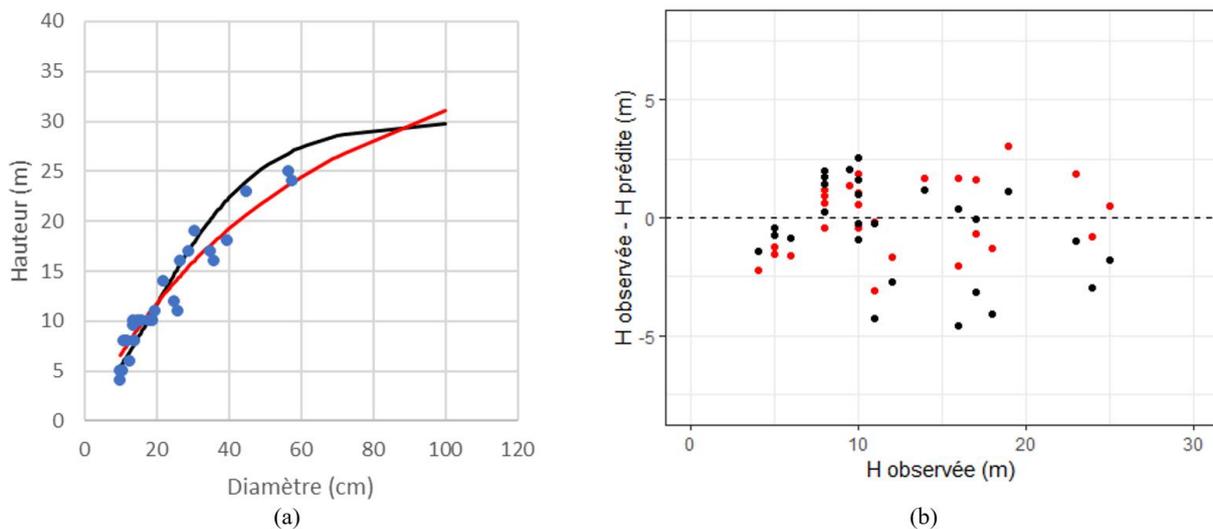


Figure 15 : a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour « *Leplaea mayumbensis*»; la signification des couleurs des pastilles et des lignes continues est identique à celle de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

En utilisant le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues sur les données qui correspondent à l'espèce *Leplaea mayumbensis*, on tend davantage à sur estimer la biomasse qu'en utilisant le modèle spécifique. Néanmoins, les deux modèles sont performants pour les diamètres inférieurs à 20 cm. La figure 15 (b) présente une bonne homoscedasticité des résidus étant donné que les différences entre les valeurs observées sont bien distribuées autour de la valeur nulle. Le coefficient de détermination du modèle spécifique (modèle 3) indique que le modèle explique 93% de la variabilité totale.

1.2.10. *Drypetes dinklagei*

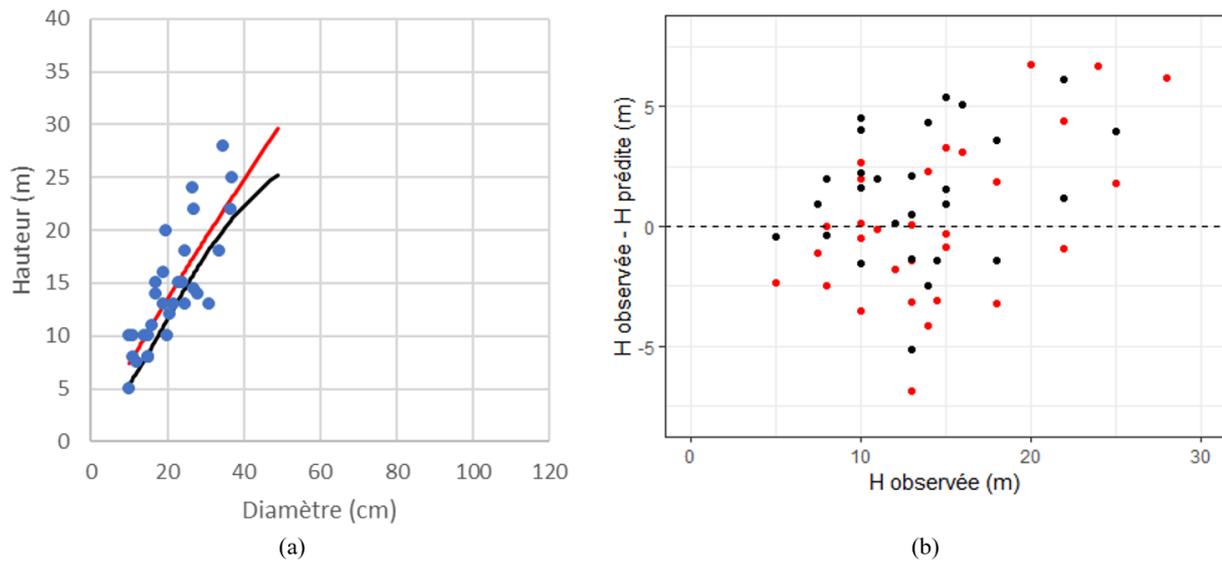


Figure 16 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour «*Drypetes dinklagei*»; la signification des couleurs des pastilles et des lignes continue est identique à celle de la figure 9. (b) Résidu en mètre (différences entre hauteurs observés et hauteurs prédites) vs hauteurs observées. Les couleurs des boules sont identiques à celles de la figure 9.

Les deux modèles sont proches l'un de l'autre mais on remarque qu'ils tendent à s'éloigner à partir de 40 cm de diamètre à peu près où le modèle ajusté sur toutes les espèces tend à sous-estimer la hauteur. Le coefficient de détermination du modèle spécifique à l'espèce *Drypetes dinklagei* (modèle 4) indique que le modèle explique 66% de la variabilité totale.

1.2.11. *Xymalos monospora*

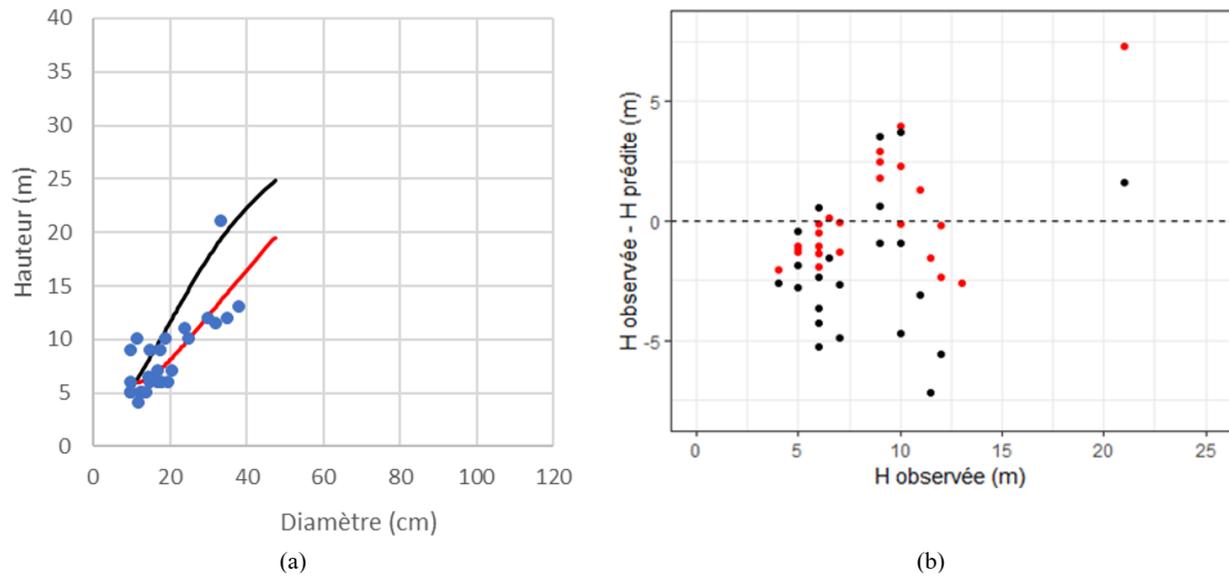


Figure 17 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour «*Xymalos monospora*»; la signification des couleurs des pastilles et des courbes est identique à celle de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteur observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

Pour l'espèce *Xymalos monospora* Les coefficients de détermination sont faibles pour tous les modèles (tableau 1) elles indiquent que les modèle n'expliquent que de 62 à 66% de la variabilité total. Le modèle ajusté sur l'ensemble des essences et le modèle spécifique à l'essence sont quasiment différents. Cette différence se remarque pour tous les individus de cette espèce tel que représenté par la figure 17 (a). Les résidus des modèles montrent que les écarts entre les hauteurs observées et les hauteurs prédites présentent une bonne distribution autour de zéro pour le modèle spécifique que pour le modèle ajusté sur toutes les espèces confondues

1.2.12. Piptadeniastrum africanum

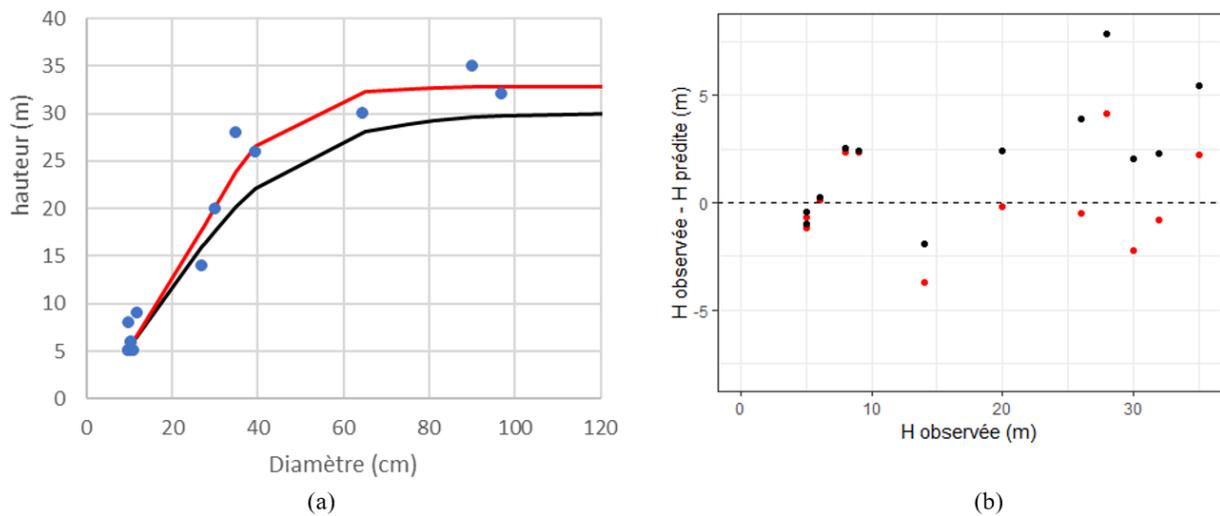


Figure 18 : (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour «*Piptadeniastrum africanum*»; les couleurs des pastilles et des lignes sont identiques à celles de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observés – hauteurs prédites) vs hauteur observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

L'analyse de la figure 18 (a) montre que le modèle ajusté sur toutes les espèces tend à minimiser les hauteurs des arbres par rapport au modèle spécifique, dont la courbe présente une bonne performance. Les résidus de ces deux modèles présentent une bonne homoscedasticité étant donné que les différences entre les hauteurs observées et les hauteurs prédites sont distribuées autour de zéro (figure 18 (b)). Le modèle spécifique à l'espèce *Piptadeniastrum africanum* (modèle 2) explique 97% de la variabilité totale tel qu'indiqué dans le tableau 3.

1.2.13. *Sapium ellipticum*

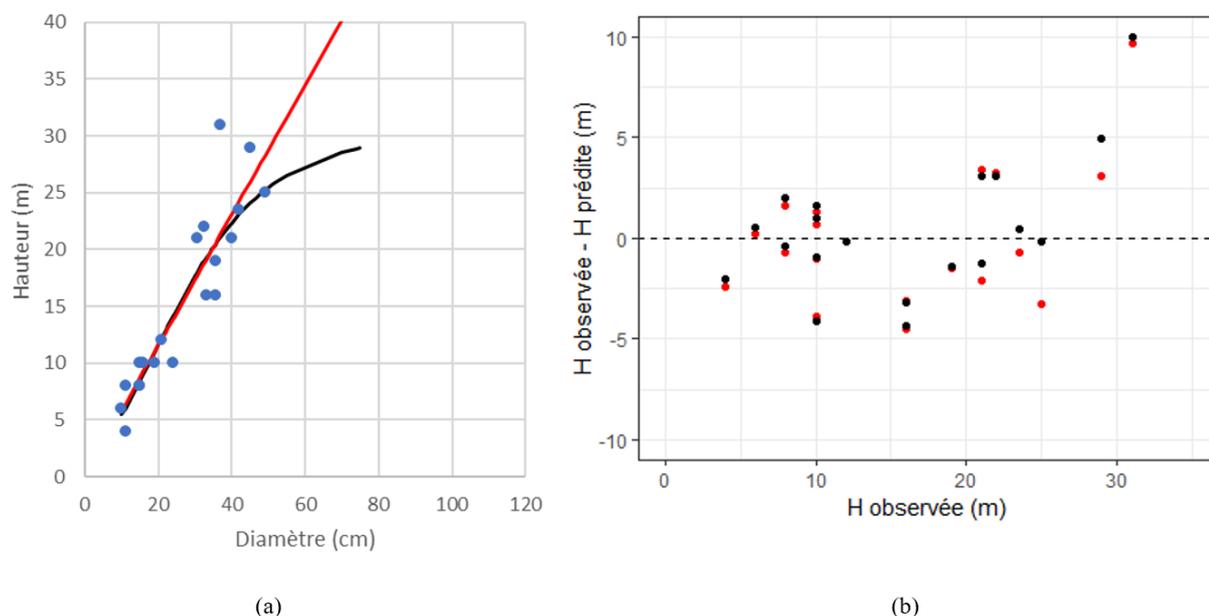


Figure 19: (a) Modèle Hauteur vs Diamètre pour «*Sapium ellipticum*»; les couleurs des pastilles et des lignes sont identiques à celles de la figure 9. (b) Résidu en mètre (hauteurs observées - hauteurs prédites) vs hauteur observées. Les couleurs des pastilles sont identiques à celles de la figure 9.

La figure 19 montre un ajustement comparable pour les deux modèles dans la gamme de diamètre inférieure à 40 cm. Pour les individus ayant des diamètres supérieurs à 40 cm, les deux modèles sont tout à fait différents. Le coefficient de détermination du modèle spécifique à l'espèce *Sapium ellipticum* indique que le modèle explique 84% de la variabilité totale (tableau 1). Cependant au-delà de 70 cm, il ne faudra peut-être pas tenir compte de la différence entre les modèles car il n'y a plus de point expérimentaux et donc on ne sait pas quel est le meilleur modèle.

2. Estimation de la biomasse

2.1. Modèle de référence

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs de biomasses en Mg/ha obtenues pour chaque parcelle en considérant la hauteur obtenue par l'équation allométrique ajustée sur toutes les espèces confondues et la masse volumique moyenne des espèces.

Tableau 4 : biomasses obtenues en considérant l'équation allométrique ajustée sur toutes les espèces confondues

Parcelles	Biomasse (Mg/ha)
P1	253,3
P2	253,2
P3	284,6
P4	213,9
P5	243,6
P6	400,6

En considérant l'équation allométrique hauteur vs diamètre ajustée sur toutes les espèces confondues et la masse volumique moyenne, la biomasse obtenue varie de 213,0 Mg/ha (P3) à 400,6 (P6) Mg/ha. L'analyse du tableau 3 montre que la sixième parcelle stocke plus de biomasse que les autres parcelles. Par contre la quatrième parcelle stocke la plus faible quantité de biomasse de toutes les parcelles.

2.2. Impact du choix de l'équation allométrique

Le tableau ci-dessous présente les différentes biomasses en Mg/ha obtenues pour chaque parcelle en utilisant la hauteur obtenue par l'équation allométrique ajustée sur toutes les espèces confondues (méthode classique) ou le modèle optimal spécifique. Dans les deux cas, les masses volumiques sont les valeurs moyennes des espèces.

Tableau 5 : biomasses obtenues par la méthode classique et la méthode spécifique à l'espèce

Parcelles	Méthode classique (a)	Méthode spécifique l'espèce (a)	Différence [#] en à %
P1	253,3	300,6	18,7
P2	253,2	319,5	26,1
P3	284,6	314,2	10,4
P4	213,9	243,6	13,9
P5	243,6	290,2	19,1
P6	400,6	534,2	33,4

$$\text{\# différence} = \left(\frac{(b)-(a)}{(a)} \right) \times 100$$

Tableau 6 : comparaison de moyenne des biomasses obtenues par la méthode spécifique à l'espèce et celle obtenue par la méthode classique

résultats du test	Méthode spécifique et méthode classique
Statistique de test	3,6875
degré de liberté	5
p-valeur	0,01418
intervalle de confiance	17,83213 - 99,91314
moyenne de différence	58,87263

Le résultat du test de Student de comparaison de moyenne montre qu'il existe des différences significatives entre la biomasse obtenue par la méthode classique et celle obtenue par la méthode spécifique à l'espèce étant donné que la P-valeur est inférieure à 0,05. La méthode classique tend à sous-estimer la biomasse par rapport à la méthode spécifique à l'espèce. La méthode classique sous-estime de 10,4 à 33,4 % la biomasse obtenue par la méthode spécifique à l'espèce ; la plus grande différence étant obtenue pour la sixième parcelle et la plus petite différence pour la troisième parcelle.

2.3. Impact du choix de la masse volumique

Les différentes valeurs des masses volumiques (g/cm³) retrouvées dans la littérature sont reprises dans le tableau ci-dessous (Zanne et al., 2009)

Tableau 7: masses volumiques des espèces principales

espèces	densités	densités	densités
	moyennes	minimales	maximales
<i>Carapa grandiflora</i>	0,550	0,550	0,550
<i>Trilepisium madagascariense</i>	0,499	0,499	0,499
<i>Cynometra alexandrii</i>	0,744	0,723	0,786
<i>Grewia mildbraedii</i>	0,566	0,415	0,758
<i>Lebrunia buchaie</i>	0,610	0,410	0,818
<i>Parinari excelsa</i>	0,702	0,640	0,768
<i>Leplaea mayumbensis</i>	0,635	0,456	0,800
<i>Drypetes dinklagei</i>	0,728	0,550	0,826
<i>Xymalos monospora</i>	0,589	0,375	0,730
<i>Piptadeniastrum africanum</i>	0,602	0,511	0,698
<i>Sapium ellipticum</i>	0,551	0,551	0,551

L'analyse du tableau 7 montre qu'il y a des différences entre les différentes masses volumiques des espèces. Pour l'espèce *Carapa grandiflora*, *Trilepisium madagascariense* et *Sapium ellipticum* il n'y a pas de différence entre les masses volumiques. Ainsi le choix de la masse volumique de ces trois espèces ne pourra pas influencer les valeurs de biomasse.

Les différentes valeurs de biomasse pour chaque parcelle en utilisant l'équation allométrique ajustée sur l'ensemble des essences et en considérant les masses volumiques moyennes, maximales et minimales pour les espèces principales sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8: impact de la masse volumique sur la valeur de biomasse pour chaque parcelle

Parcelles	moyenne (a)	maximum (b)	minimum (c)	différence entre maximum et moyenne# (%)	différence entre moyenne et minimum (%)§
P1	253,3	323,6	194,4	27,7	23,2
P2	253,2	326,5	193,6	28,9	23,6
P3	284,6	352,9	223,6	24,0	21,5
P4	213,9	266,1	169,2	24,4	20,9
P5	243,6	302,3	197,0	24,1	19,1
P6	400,6	522,4	303,3	30,4	24,3

$$\# \text{différence entre maximum et moyenne} = \left(\frac{(b)-(a)}{(a)} \right) \times 100$$

$$\S \text{différence entre moyenne et minimum} = \left(\frac{(a)-(c)}{(a)} \right) \times 100$$

Tableau 9 : comparaison de moyenne des biomasses obtenues par les différentes valeurs de masse volumique

Résultats du test	moyenne et min	max et moyenne
Statistique de test	7,9414	7,3528
degré de liberté	5	5
p-valeur	0,0005102	0,0007305
Intervalle de confiance	41,51 - 81,2	48, 2 - 100,0
moyenne de différence	61,4	74,1

Le tableau 9 montre que les différences de valeurs de biomasses obtenues en considérant la masse volumique moyenne et minimales des espèces sont significatives étant donné que le degré de significativité du test (la P-valeur) est inférieur à 0,05. En comparant les biomasses obtenues par

les masses volumiques maximales à celles obtenues par les masses volumiques moyennes, les différences restent toujours significatives car la P-valeur est inférieure à 0,05.

Les différences entre la biomasse en considérant la densité maximale ou la densité moyenne varient entre 24,0 et 30,4 %. En considérant la masse volumique moyenne et minimale, ces différences varient entre 19,1 et 24,3 %.

IV. DISCUSSION

1. Modèles allométriques hauteur vs diamètre

La comparaison entre les résultats des modèles spécifiques et ceux du modèle ajusté sur toutes les espèces a été faite pour tester l'incertitude liée au choix de l'équation allométrique hauteur vs diamètre pour l'estimation de la biomasse. Ainsi, les résultats de ce travail ont montré que l'allométrie hauteur vs diamètre varie d'une espèce à une autre au sein d'un même type de forêt. Pour certaines espèces telles que *Carapa grandiflora*, *Cynometra alexandrii*, *Grewia mildbraedii*, *Lebrunia buchaie*, *Drypetes dinklagei* et *Sapium ellipticum*, les résultats du modèle spécifique sont comparables de ceux du modèle ajusté sur toutes les espèces confondues pour les diamètres inférieurs à 40 cm. Pour des arbres dont les diamètres sont supérieurs à 40 cm, les deux modèles deviennent de plus en plus différentes. Pour d'autres espèces telles que *Trilepisium madagascariense*, *Parinari excelsa*, *Leplaea mayumbensis*, *Drypetes dinklagei*, *Xymalos monospora* et *Piptadeniastrum africanum*, les courbes de ces deux modèles présentent des formes tout à fait différentes.

Ces différences entre les valeurs des hauteurs estimées par les modèles ont un impact sur l'estimation de la biomasse aérienne étant donné que la hauteur fait partie de variables explicatives dans l'équation d'estimation de la biomasse. Ainsi l'utilisation du modèle allométrique hauteur vs diamètre qui fournit des estimations de hauteurs plus élevées impliquera une surestimation de la biomasse et l'utilisation de l'équation qui sous-estime la hauteur impliquera une sous-estimation de la biomasse. C'est ainsi que l'estimation de la biomasse peut générer des erreurs liées au choix de l'équation allométrique.

Cependant, au-delà de 75 cm de diamètre pour l'espèce *Carapa grandiflora*, il ne faudra pas tenir compte de la différence entre les modèles car dans la gamme de classe de diamètre supérieur à 75 cm, il n'y a plus de points expérimentaux pour savoir lequel des modèles est meilleur. Pour l'espèce *Cynometra alexandrii* il n'y a pas de points expérimentaux dans la gamme de diamètre se trouvant entre 20 et 50 cm afin de valider les courbes pour les diamètres inférieurs à 50 cm. Ainsi, la gamme dans laquelle le modèle a été calibré ne correspond pas du tout, à la gamme de diamètre dans la base de donnée (annexe). Pour *Grewia mildbraedii*, le modèle 2 a été sélectionné comme meilleur modèle spécifique mais il serait aussi influencé par un point qui s'éloigne des autres points et qui semble un peu anormal car à 80 cm de diamètre, cet individu n'a que 12 m de hauteur (figure 12 (a)).

Pour *Xymalos monospora*, il se présente une incertitude sur le meilleur modèle car il y a une forte variabilité de donnée, le coefficient de détermination n'est pas assez satisfaisant le modèle ne prédit que 63,7 % de la variabilité totale.

Les équations allométriques de Chave et al., (2014) permettent d'estimer la biomasse aérienne de la forêt par l'utilisation de données de diamètres mesurés sur terrain, des densités issues de la base de données mondiale et des hauteurs des arbres. Ces hauteurs peuvent être mesurées (Djomo et al., 2011) ou estimées par une équation allométrique hauteur vs diamètre régionale ou locale (Fayolle et al., 2016). Les études antérieures ci-dessous ont tenté de produire des modèles allométriques mettant en relation la hauteur et le diamètre des arbres.

Les études de Feldpausch et al., (2011) ont montré que les forêts tropicales de différentes régions présentent une allométrie différente au sein d'un même continent. Fayolle et al., (2016) ont étudié deux types de forêts tropicales de l'Afrique Centrale et ont trouvé que l'allométrie était différente au sein d'une même région. Boyemba et al., (2017) ont étudié les effets de l'altitude sur l'allométrie hauteur-diamètre en utilisant 30 parcelles d'échantillonnage de 1 ha situées entre 1250 et 2600 m d'altitude à l'est de la R.D.Congo. Ils ont identifié quatre types de forêt et leurs résultats ont montré que les forêts tropicales ont des allométries hauteur vs diamètre différentes en fonction du type de forêt dans la région montagneuse. Les résultats de Boyemba et al., (2017) ont indiqué aussi que des variations significatives existaient au niveau de types de forêt, entre différentes parcelles et que les modèles spécifiques pour les essences respectives pourraient fournir des meilleurs résultats. En étudiant différentes espèces au sein d'un même type de forêt, nos résultats signalent qu'il existe des différences considérables entre l'allométrie spécifique et celle réalisée sur toutes les espèces confondues. En effet, certaines espèces sont naturellement plus grosses en terme de diamètre que d'autres espèces (annexe). Cette différence de grosseur pourrait influencer l'estimation de la hauteur et induire des erreurs pendant l'estimation de la biomasse.

2. Estimation de la biomasse

En considérant l'équation allométrique hauteur vs diamètre ajustée sur toutes les espèces confondues et la masse volumique moyenne, la biomasse de la forêt de Bushema varie de 213,9 à 400,6 Mg/ha. La différence de biomasse entre les différentes parcelles s'explique principalement par la variabilité des surfaces terrières des différentes parcelles. En effet, la biomasse la plus élevée correspond à la parcelle qui montre la plus grande valeur de surface terrière (42,4 m²/ha) et la valeur de biomasse la plus faible, à la parcelle dont la surface terrière est la plus petite (28,2m²/ha).

2.1. Impact du choix de l'équation allométrique

L'hypothèse de ce travail était que le choix de l'équation allométrique hauteur vs diamètre aurait un impact sur l'estimation de la biomasse aérienne des forêts et les résultats ont montré qu'il existe des différences significatives entre la biomasse obtenue en utilisant l'équation allométrique indépendante de l'espèce pour estimer la hauteur et celle obtenue par l'utilisation des équations spécifiques aux espèces principales.

Des études antérieures ont indiqué des erreurs considérables liées à l'utilisation des équations allométriques régionales h vs diamètres et ces erreurs ont montré l'importance de s'appuyer sur des équations spécifiques aux types de forêts (Fayolle et al., 2016). Les études de Boyemba et al., (2017) ont montré que l'utilisation des équations allométriques hauteur vs diamètre permet de réduire l'erreur par rapport à l'utilisation des équations régionales. Les résultats de notre travail indiquent aussi que ces erreurs sont réduites par l'utilisation des équations spécifiques aux essences. Ainsi les deux méthodes d'estimation de la hauteur présentent des différences dans l'estimation de la biomasse aérienne de l'ordre de 10,4 à 33,9%. Tout comme la quantité de biomasse, ces différences varient aussi en fonction des parcelles.

2.2. Impact du choix de la masse volumique

Notre hypothèse était que le choix de la masse volumique à utiliser dans l'équation de Chave et al., (2014) aurait un impact sur l'estimation de la biomasse. Les résultats de nos études ont montré que les différences entre la biomasse estimées en considérant la masse volumique moyenne, minimale ou maximale sont significatives. La masse volumique minimale induit, en fonction des parcelles, une sous-estimation allant de 19,1 à 24,3% et la masse volumique maximale conduit à une surestimation allant de 24,1 et 30,4 % par rapport à la masse volumique moyenne. Ces différences seraient dues au fait que les densités des bois présentent une grande variabilité au sein d'une même espèce. Pour *Carapa grandiflora*, *Trilepisium madagascariense* et *Sapium ellipticum* les valeurs de masses volumiques sont les mêmes, et ne peuvent donc influencer l'estimation de la biomasse. Pour huit espèces sur les 11 principales, les différences entre les différentes valeurs de masses volumiques sont considérables. Dans leur étude, Timotry et al., (2004) ont montré que la densité des bois est une variable explicative cruciale pour l'estimation de la biomasse et le fait d'ignorer sa variation conduirait à une mauvaise estimation de la biomasse globale des espèces.

Les erreurs liées au choix de l'équation allométrique et celles liées au choix de la masse volumique sont dans le même ordre de grandeur. Des différences significatives ont été trouvées entre

l'utilisation de différentes valeurs de masses volumiques lors de l'estimation de la biomasse aérienne mais la difficulté réside au niveau du choix de la bonne valeur.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'analyser la sensibilité des estimations de la biomasse vis-à-vis de l'estimation des hauteurs et des valeurs de masses volumique des espèces en forêt tropicale, en s'appuyant sur le cas de la forêt communautaire de Bushema. Pour y parvenir, cinq modèles allométriques hauteur vs diamètre ont été ajustés indépendamment sur les 11 espèces principales de la forêt de Bushema, sur toutes les espèces de la forêt et en fin sur toutes les autres espèces à l'exception des espèces principales. Pour chaque option, le meilleur modèle a été choisi sur base des critères d'information ainsi que des coefficients de détermination, et la hauteur obtenue a été utilisée dans l'équation d'estimation de la biomasse. Ainsi la biomasse a été estimée indépendamment sur six parcelles de 1 ha chacune suivant trois options : d'abord en considérant la hauteur obtenue par l'équation allométrique ajusté sur l'ensemble des espèces, en suite en utilisant les hauteurs obtenues par des équations ajustées sur chaque espèce et enfin en considérant la masse volumique moyenne, maximale et minimale des espèces principales. Le test apparié de Student a été fait pour comparer les moyennes des différentes valeurs de biomasses obtenues.

L'analyse de la sensibilité du choix de l'équation allométrique hauteur vs diamètre vis-à-vis de l'estimation de la biomasse nous a permis de conclure qu'il existe des différences significatives entre l'utilisation du modèle hauteur vs diamètre spécifique à l'espèce et l'utilisation du modèle ajusté sur toutes les espèces confondues. Ces différences sont de l'ordre de 10,4 à 33,4 % en fonction de différentes parcelles. De même, nous avons trouvé des différences significatives entre la biomasse obtenue en considérant la masse volumique moyenne, maximale et minimale pour les espèces principales. Ce qui nous a permis de conclure que le choix de la valeur de la masse volumique peut avoir un impact sur l'estimation de la biomasse aérienne de la forêt. La question qui reste est de savoir comment choisir la bonne valeur de la masse volumique.

A l'issue de cette étude, nous recommandons que le modèle spécifique à l'espèce soit appliqué pour l'estimation de la biomasse forestière de la forêt de Bushema car il permet de réduire les sous-estimations liées à l'utilisation des modèles locaux. Il est important d'établir des courbes hauteurs vs diamètre spécifiques à l'espèce mais il faudra s'assurer de bien couvrir toutes les gammes de distribution de diamètre de ces espèces pour être sûr d'avoir des modèles qui soient les meilleurs possibles. Ainsi, il serait mieux d'élargir les mesures pour les espèces principales lors des études futures.

BIBLIOGRAPHIE

- Achard, F., Eva, H. D., Mayaux, P., Stibig, H. J., & Belward, A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2003GB002142>
- Anonyme. (2018). *Projet forêt communautaire en République Démocratique du Congo : Garantir les droits des communautés et protéger leurs moyens d'existence. Rapport de rain forest foundation UK.*
- Bellassen, V., & Luysaert, S. (2012). Le cycle du carbone dans les forêts et le changement climatique : comprendre le passé pour s'adapter au futur. *Revue Forestière Française*, (3). <https://doi.org/10.4267/2042/48435>
- Billy, K., Charlotte, B., Patrick, M., & Muganguzi, I. (2016). *La foresterie communautaire face aux dynamiques locales de la gestion des forêts à l'Est de la RD Congo.*
- Boyemba, F., Lewis, S., Le, N., Calders, K., Zapfack, L., Riera, B., ... Cuni-sanchez, A. (2017). Height-diameter allometry and above ground biomass in tropical montane forests : Insights from the Albertine Rift in Africa. *PLoS ONE*, 12(6), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179653>
- Charles, N.-O. (2007). *Module de foresterie communautaire dispensé à l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts (ENEF) du Gabon. Ministère de La Forêt, de L'Environnement et De de la Protection Des Ressources Naturelles (Gabon).*
- Chave. (2019). les forêts et le changement climatique. In *Leçon inaugurale Chaire Francqui* (p. 18).
- Chave, Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *The Royal Society*, (February), 409–420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>

- Chave, J., Maxime, R.-M., Alberto, B., & Chindumayo, E. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, (October 2017). <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Code forestier /RDCcongo. (2002). *Loi n°011/2002 du 29 Août 2002 portant code forestier*.
- Djomo, A. N., Knohl, A., & Gravenhorst, G. (2011). Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of a moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1448–1459. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.031>
- Dupuy, B., Amsallem, I., & Maître, H. (1999). *techniques de gestion des écosystèmes forestiers tropicaux : état de l'art*. FAO/ CIRAD.
- Eisen, J., Counsell, S., & Francesca, T. (2015). *Repenser la gestion communautaire des foêts dubassin du Congo*. RainForest Fondation. London.
- Espérance, D. M. (2016). *quantification de la biomasse aérienne de la forêt à palétuvier dans la parc marin de Mangrove*.
- Fayolle, A., Loubota Panzou, G. J., Drouet, T., Swaine, M. D., Bauwens, S., Vleminckx, J., ... 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.033>
- Feldpausch, T. R., Banin, L., Phillips, O. L., Baker, T. R., Lewis, S. L., Quesada, C. A., ... Lloyd, J. (2011). Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences*, 8(5), 1081–1106. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 508–522. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
- GIEC. (2001). Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse Résumés des Groupes de travail. Genève, Suisse, 97.
- GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>

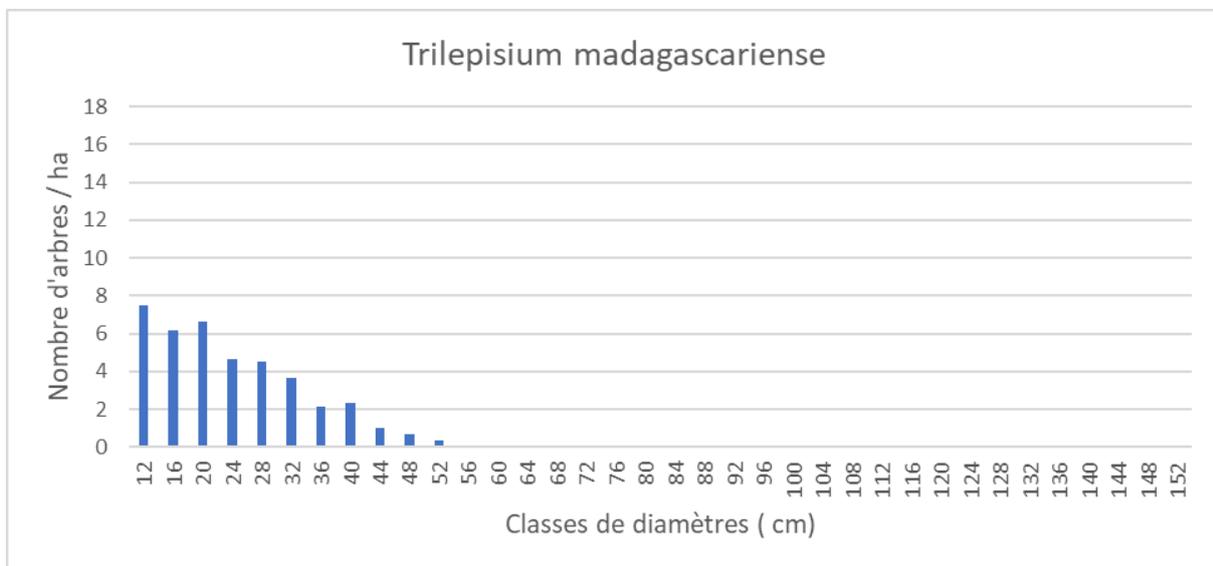
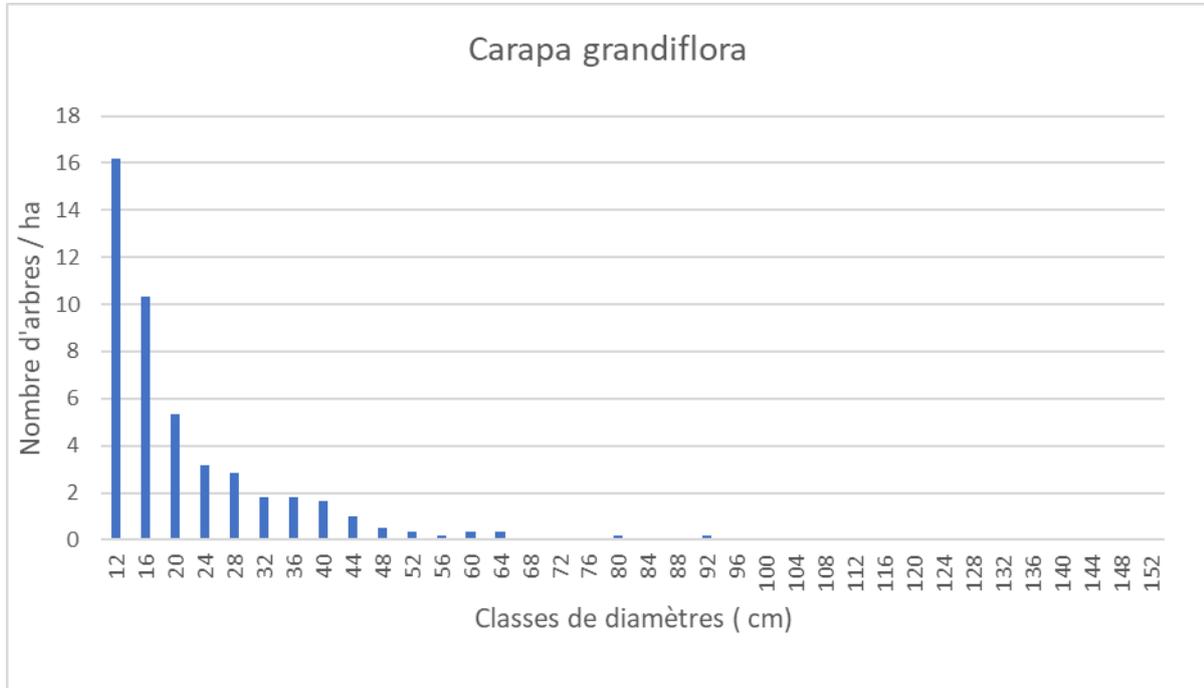
- Hunter, M. O., Keller, M., Victoria, D., & Morton, D. C. (2013). Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*, *10*(12), 8385–8399. <https://doi.org/10.5194/bg-10-8385-2013>
- Imani, G., Zapfack, L., Baraka, P., & Mungu, I. A. (2016). Étude préliminaire de la flore et de la biomasse ligneuse des clairières en haute altitude du Parc National de Kahuzi-Biega, République démocratique du Congo. *VertigO*, (September). <https://doi.org/10.4000/vertigo.17564>
- Itongwa, J., & Chatelain, C. (2016). *Mission de terrain sur les initiatives de Conservation communautaire et Conservation par les Aires du Patrimoine Autochtone et Communautaire (APAC) à l'Est de la République Démocratique du Congo*. Bukavu.
- Jopaul, G., Panzou, L., Doucet, J.-L., Loumeto, J.-J., Biwole, A., Bauwens, S., & Fayolle, A. (2016). Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, *20*(4), 508–522. Retrieved from <http://www.pressesagro.be/ojs/index.php/base/article/viewFile/1964/841>
- Lewis, S. L., Lopez-Gonzalez, G., Sonké, B., Affum-Baffoe, K., Baker, T. R., Ojo, L. O., ... Wöll, H. (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, *457*(7232), 1003–1006. <https://doi.org/10.1038/nature07771>
- Lindsell, J. A., & Klop, E. (2013). Spatial and temporal variation of carbon stocks in a lowland tropical forest in West Africa. *Forest Ecology and Management*, *289*, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.045>
- Manzo, O. L., Moussa, M., Issoufou, H. B., Abdoulaye, D., Morou, B., Youssifi, S., & Mahamane, A. (2015). Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne de *Faidherbia albida* (Del.) Achev dans les agrosystèmes d'Aguié, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *9*(4)(August 2015), 1863–1874. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.12>
- Mcghee, W., Saigle, W., Padonou, E. A., & Lykke, A. M. (2016). Méthodes de calcul de la biomasse et du carbone des arbres en Afrique de l'Ouest. *Annales Des Sciences Agronomiques*, *20*, 79–98.
- MECNDD. (2016). *arrêté ministériel n°025/CAB/MIN/ECN-DD/CJ/00/RBM/2016 du 09 fev 2016 portant disposition spécifiques relatives à la gestion et à l'exploitation de la concession*

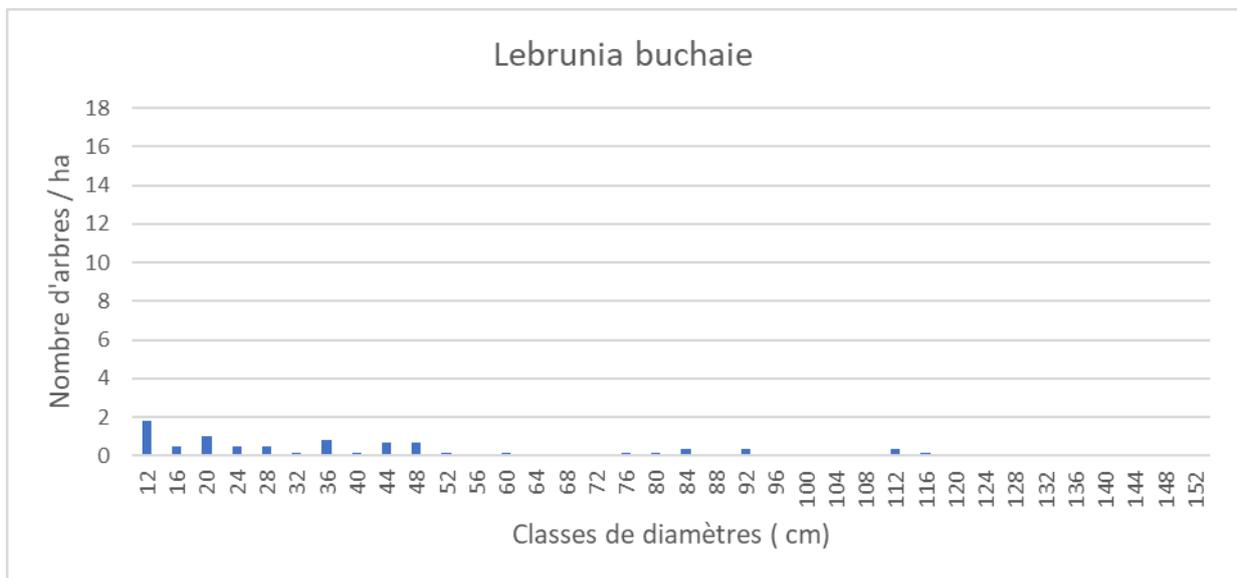
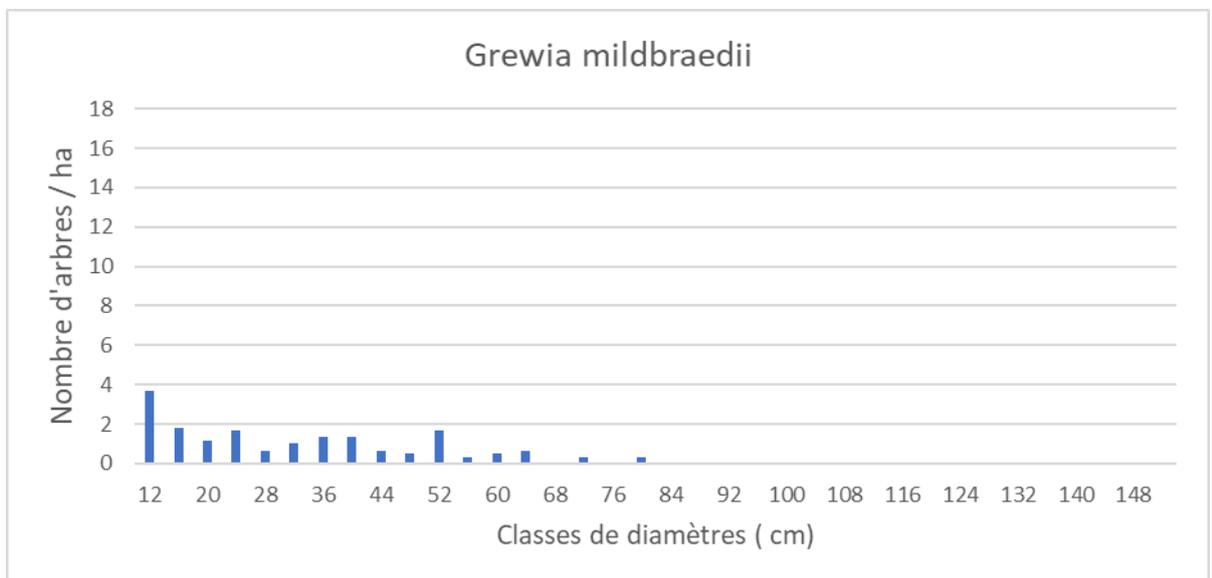
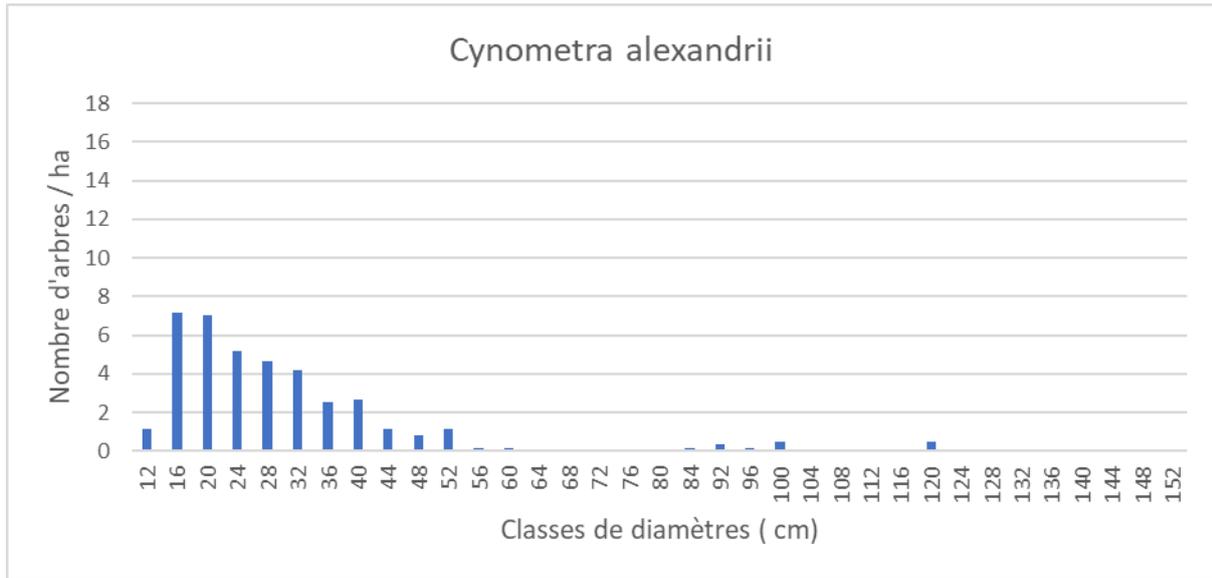
forestière des communautés locales.

- Molto, Q. (2012). *estimation de biomasse en forêt tropicale humide, propagation des incertitudes dans la modélisation de la distribution spatiale de la biomasse en Guyane française.* Université des Antilles et de la Guyane.
- Mugasha, W. A., Bollandås, O. M., & Eid, T. (2013). Relationships between diameter and height of trees in natural tropical forest in Tanzania. *Forest Science*, 75(4), 221–237.
<https://doi.org/10.2989/20702620.2013.824672>
- Rainforest Foundation. (2016). *note sur les forêt communautaires en RDC/ vers une gestion équitable et durable des forêts.*
- Schreckenber, K., & Luttrell, C. (2006). Programme Environnement et politique forestière : Littérature grise, 7.
- Skutsch, M. et M. (2012). *Le rôle de la gestion forestière communautaire dans la REDD+* (Vol. 63), 6.
- Timothy, B., Olivier, P., Yadvinder, M., Samuel, A., Luzmila, A., Anthony, F., Terry, E., Timothy, K., Susan, L., William, L., Simon, L., Jon, L., Abel, M., David, N., Sandra, P., Nigel, P., Natalino, S., Rodolfo, V. (2004). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, 10, 545–562.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00751.x>
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C., Chave, J. (2009). Global wood density database.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>

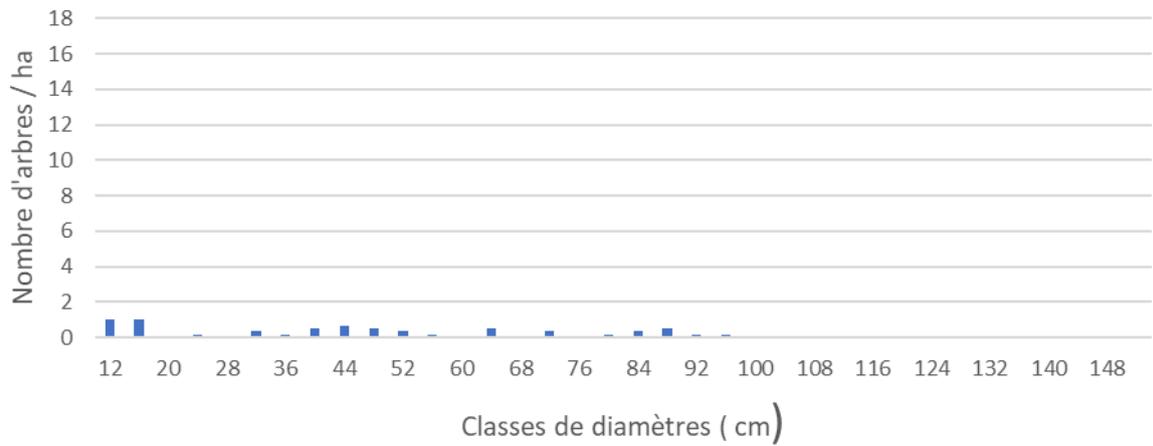
ANNEXES

Annexe : distribution des arbres mesurés (nombre d'arbres/ha) en classes de diamètres sur l'ensemble de parcelles.

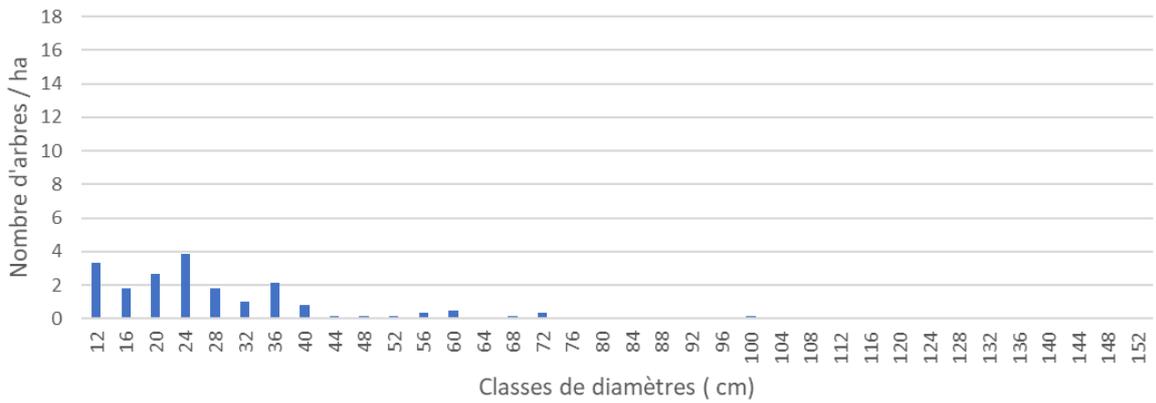




Parinari excelsa



Leplaea mayumbensis



Drypetes dinklagei

