

# Production d'*Acacia auriculiformis* dans le système agroforestier de Mampu, plateau Batéké, République démocratique du Congo

Pierre PROCES<sup>1</sup>  
Émilien DUBIEZ<sup>2</sup>  
Franck BISIAUX<sup>3</sup>  
Adrien PÉROCHES<sup>4</sup>  
Adeline FAYOLLE<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Nature+ asbl  
Winstar Park  
62 rue Provinciale  
1301 Wavre  
Belgique

<sup>2</sup> CIRAD  
UPR Forêts et sociétés  
Campus international de Baillarguet  
34398 Montpellier Cedex 5  
France

<sup>3</sup> Fondation Hanns Seidel  
57 avenue des Sénégalais  
BP 10.185, Kinshasa, Gombe  
République démocratique du Congo

<sup>4</sup> ONFi  
45 bis avenue de la Belle Gabrielle  
94736 Nogent sur Marne Cedex  
France

<sup>5</sup> Gembloux Agro-Bio Tech  
Université de Liège  
Unité de Gestion des ressources  
forestières et TERRA  
Teaching and Research Center  
« Forêt d'Afrique centrale »  
Passage des Déportés, 2  
5030 Gembloux  
Belgique



**Photo 1.**  
Panorama de la savane du plateau Batéké.  
Photo P. Proces.

## RÉSUMÉ

### PRODUCTION D'*ACACIA AURICULIFORMIS* DANS LE SYSTÈME AGROFORESTIER DE MAMPU, PLATEAU BATÉKÉ, RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

Géré par des communautés locales depuis plus de vingt ans, le massif agroforestier à *Acacia auriculiformis* de Mampu, sur le plateau Batéké en République démocratique du Congo (RDC), contribue à l'approvisionnement de Kinshasa en produits vivriers et en bois énergie. Grâce aux subventions internationales, ce système agroforestier, qui intègre la pratique de l'abattis-brûlis, est reproduit un peu partout en RDC, bien que sa performance n'ait jamais été évaluée. L'objectif de cette étude était d'estimer la production d'*Acacia auriculiformis* en biomasse totale et exploitable pour le charbon de bois (tige et branches de plus de 4 cm de diamètre) dans le système agroforestier. À cet effet, deux équations allométriques locales, portant sur la biomasse totale et exploitable, ont été ajustées à partir de données destructives. Des données d'inventaire existantes (n = 112 parcelles) ont permis d'identifier une grande hétérogénéité structurale sur l'ensemble de la rotation (8-10 ans) mais également entre parcelles du même âge. Malgré cette hétérogénéité qui peut s'expliquer par la diversité des conditions environnementales sur le site et/ou les disparités dans l'appropriation de l'itinéraire technique, la production reste néanmoins comparable à celle observée sur d'autres sites avec, en moyenne, 145 tonnes par hectare en 10 ans. Le système agroforestier de Mampu présente de nombreux avantages, des services directs avec la création d'emplois ruraux, et la production combinée de produits vivriers et de charbon de bois, mais aussi des services indirects, comme la déforestation évitée, et le stockage du carbone. La durabilité et la diffusion de ce système agroforestier peuvent néanmoins être discutées.

**Mots-clés :** *Acacia auriculiformis*, allocation de la biomasse, équation allométrique, facteur d'expansion de la biomasse, inventaire forestier, tarif de cubage, rotation courte, République démocratique du Congo.

## ABSTRACT

### *ACACIA AURICULIFORMIS* PRODUCTION IN THE MAMPU AGROFORESTRY ZONE ON THE BATÉKÉ PLATEAU, DEMOCRATIC REPUBLIC OF CONGO

The Mampu agroforestry zone on the Batéké plateau in the Democratic Republic of Congo, which has been managed with *Acacia auriculiformis* shade trees for over twenty years by local communities, supplies subsistence products and fuel wood to Kinshasa. Thanks to international grant funding, this agroforestry system, which integrates traditional slash-and-burn cultivation, has been replicated in many places across the RDC, but its performance has never been assessed. The aim of this study was to estimate *Acacia auriculiformis* production in terms of total biomass and usable biomass for charcoal (stems and branches more than 4 cm in diameter) as part of the agroforestry system. To do so, two local allometric equations for total and usable biomass were adjusted from destructive testing data. Using existing inventory data (n = 112 plots), we identified significant structural heterogeneity throughout the rotation period (8-10 years) but also among plots of the same age. Despite this heterogeneity, which may be accounted for by environmental conditions on site and/or by differences in the handling of plot management techniques, production is comparable to that observed at other sites, averaging 145 tonnes per hectare over 10 years. The Mampu agroforestry system has many advantages, including direct services creating rural employment and combined production of subsistence goods and charcoal, but also indirect services such as avoided deforestation and carbon sequestration. The system's sustainability and dissemination should nevertheless be discussed.

**Keywords:** *Acacia auriculiformis*, biomass allocation, allometric equation, biomass expansion factor, forest inventory, volume table, short rotation, Democratic Republic of Congo.

## RESUMEN

### PRODUCCIÓN DE *ACACIA AURICULIFORMIS* EN EL SISTEMA AGROFORESTAL DE MAMPU EN LA MESETA BATEKÉ, REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DEL CONGO

La formación agroforestal de *Acacia auriculiformis* de Mampu, ubicada en la meseta Bateké de la República Democrática del Congo (RDC) y gestionada por las comunidades locales desde hace más de veinte años, contribuye al suministro de productos alimenticios y leña de Kinshasa. Gracias a las subvenciones internacionales, este sistema agroforestal, que integra la práctica de la tala y quema, se utiliza por todo el país aunque nunca se haya evaluado su desempeño. El objetivo de este estudio consistía en estimar la producción de *Acacia auriculiformis* en biomasa total y explotable para carbón vegetal (tallos y ramas de más de 4 cm de diámetro) en el sistema agroforestal. Para ello, se ajustaron dos ecuaciones alométricas locales, a partir de datos obtenidos por métodos destructivos, para averiguar la biomasa total y explotable. Mediante los datos de inventario existentes (n = 112 parcelas) se pudo identificar una gran heterogeneidad estructural tanto en el conjunto de la rotación (8-10 años) como entre las parcelas de idéntica edad. A pesar de esta heterogeneidad, que puede deberse a la diversidad de condiciones ambientales del sitio y/o a disparidades en la asimilación del itinerario técnico, la producción es comparable a la observada en otros sitios, con un promedio de 145 toneladas por hectárea en 10 años. El sistema agroforestal de Mampu tiene muchas ventajas en forma de beneficios directos, como la creación de empleos rurales y la producción combinada de productos alimenticios y carbón vegetal; pero cuenta asimismo con beneficios indirectos como la deforestación evitada y el almacenamiento de carbono. No obstante, la sostenibilidad y difusión de este sistema agroforestal pueden discutirse.

**Palabras clave:** *Acacia auriculiformis*, asignación de la biomasa, ecuación alométrica, factor de expansión de la biomasa, inventario forestal, tabla de cubicación, rotación corta, República Democrática del Congo.

## Introduction

En Afrique centrale, la déforestation est essentiellement localisée autour des grandes agglomérations et le long des axes de transports, qui sont des zones de concentration de la population (Marien *et al.*, 2013 ; Mayaux *et al.*, 2013). Cette déforestation est due principalement à l'augmentation de la population, à l'expansion de l'agriculture itinérante sur brûlis et à l'utilisation du bois-énergie comme principale source énergétique pour la cuisson des aliments, en l'absence d'accès à des énergies alternatives (Rudel *et al.*, 2011 ; Gillet *et al.*, 2015). Cette importante demande en bois énergie et les conséquences sur les surfaces forestières et les stocks de carbone forestier ont été largement étudiées dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa en République démocratique du Congo (RDC), couvrant une partie de la province du Kongo central et du plateau Batéké. Le plateau Batéké, vaste plateau sableux s'étendant sur une zone partagée entre le sud-est du Gabon, la République du Congo et la RDC, et couvert d'une végétation savanicole, est à l'origine d'environ 40 % des approvisionnements de la ville de Kinshasa en bois-énergie (Schure *et al.*, 2010). Une réduction drastique du couvert forestier a été observée au cours des dernières décennies dans ce bassin d'approvisionnement (Gond *et al.*, 2016), dont les galeries forestières entrecoupant ce plateau sont plus boisées et plus productives que les savanes. Les stocks de carbone forestier y ont diminué de 75 % en 28 ans, entre 1984 et 2012 (Gond *et al.*, 2016).

Les difficultés d'approvisionnement en bois-énergie et produits vivriers de Kinshasa ont été identifiées depuis les années 1980. Des plantations agroforestières ont progressivement été installées sur les savanes du plateau Batéké, grâce notamment à plusieurs subventions de l'Union européenne. L'itinéraire technique retenu repose sur un assolement composé de deux phases successives, l'une agricole (association du manioc à des cultures à cycle court comme le maïs) et l'autre forestière par la plantation d'*Acacia auriculiformis* (Fabaceae). Cette essence originaire d'Australie, d'Indonésie et de Papouasie-Nouvelle-Guinée et parfois multicaule a été sélectionnée dans le cadre d'essais menés au Centre forestier de Kinshasa (CFK). Ces essais ont démontré une bonne performance sur les sols chimiquement très pauvres et très acides du plateau Batéké, avec une productivité annuelle moyenne de 12 m<sup>3</sup>/ha/an (Gerken et Kasali, 1988). Sur le périmètre agroforestier de Mampu, l'exploitation des arbres, théoriquement, a lieu huit à dix ans après la plantation. Issu d'une première génération d'arbres plantés, le système agroforestier est depuis la deuxième rotation basé sur la régénération naturelle assistée. Après l'abattage et la récolte des arbres pour la carbonisation, le brûlis est utilisé pour lever la dormance des graines stockées dans le sol et la litière. Ces plantations d'abord industrielles, avec 8 000 ha plantés entre 1987 et 1993, ont ensuite été cédées à 306 familles d'agriculteurs entre 1995 et 2001 (Bisiaux *et al.*, 2009). Ce système agroforestier intégrant la pratique traditionnelle d'abattis-brûlis contribue à une meilleure appropriation de l'itinéraire technique par les agriculteurs et assure ainsi à peu de frais une régénération naturelle assistée (Bisiaux *et*

*al.*, 2009). Une mise à densité progressive est ensuite effectuée par sarclage et éclaircies successives. La densité visée est comprise entre 800 et 1 200 arbres à l'hectare (Marien *et al.*, 2013). Elle a été définie empiriquement afin de produire des arbres dont les dimensions des branches et du tronc sont adaptées à la fabrication artisanale de charbon de bois.

Ce type d'agroforesterie, alternant production agricole et de bois-énergie sur un même espace mais séquentiellement dans le temps, fait référence aux *tree improved fallows* (Nair, 1985) ou plus spécifiquement aux *rotational woodlots* (Ramadhani *et al.*, 2002 ; Akinnifesi *et al.*, 2008). L'association des cultures vivrières avec l'arbre, appelée *taungya*, contribue à entretenir les arbres en même temps que les cultures et protège également la plantation des feux (Menzies, 1988 ; Imo, 2009 ; Kalame *et al.*, 2011), très fréquents sur le plateau Batéké. Ce type de système agroforestier, basé sur des rotations courtes (8-10 ans), est possible en raison de l'objectif de production (charbon de bois) et de la vitesse de croissance de l'essence sélectionnée *Acacia auriculiformis* (voir, par exemple, Kumar et Nair, 1998 en Inde), même dans les conditions difficiles du plateau Batéké (Gerken et Kasali, 1988). Ce système agroforestier connaît aujourd'hui un certain succès en RDC avec la multiplication des projets et programmes de reboisement utilisant *Acacia auriculiformis* (tableau I). Si l'itinéraire technique de Mampu est globalement reproduit, il existe cependant quelques différences, notamment dans le nombre, la taille, et l'organisation spatiale des lots, mais aussi dans l'origine des semences (locales ou importées). Les plantations effectuées à Mampu comme celles faites au CFK auparavant l'ont été avec des graines tout-venant récoltées sur les arbres déjà présents à Kinshasa et aux alentours (M. Gerken, com. pers.).

Le système agroforestier de type Mampu est aujourd'hui largement diffusé en RDC, mais la performance de ce dernier n'a pas encore été rigoureusement évaluée. Le passage d'une plantation industrielle à des plantations agroforestières issues de la régénération naturelle assistée après le brûlis, et gérées par les villageois, pose des questions en termes de production de bois, et notamment de biomasse exploitable pour la production de charbon de bois. L'objectif de cette étude était d'estimer la biomasse dans le système agroforestier à *Acacia auriculiformis* en RDC en se basant sur le boisement historique de Mampu. Spécifiquement, nous avons cherché à :

- ajuster une équation allométrique de biomasse (pour la biomasse aérienne totale et pour la biomasse exploitable) pour *Acacia auriculiformis*, et spécifique au site, à partir de données destructives acquises localement à l'échelle de l'arbre ;
- étudier les variations de l'allocation de la biomasse avec le diamètre des arbres, et développer un facteur d'expansion de la biomasse qui pourrait permettre d'utiliser des tarifs de cubage existants (voir, par exemple, Lejeune et Rondeux, 1994 ; Péroches, 2012) ;
- estimer la biomasse produite et stockée par les arbres dans le système agroforestier, en termes de biomasse aérienne totale et exploitable pour la production de charbon de bois, à partir de données d'inventaire à l'échelle de la placette couvrant l'ensemble d'une rotation théorique (8-10 ans) et converties en biomasse grâce aux équations allométriques établies localement.

## Méthodes

### Site d'étude

Le site de Mampu est localisé sur le plateau Batéké, à environ 170 km à l'est de la ville de Kinshasa. Les données destructives de biomasse à l'échelle de l'arbre, et les données non destructives d'inventaire à l'échelle de la placette, ont été récoltées au sein du massif agroforestier de Mampu (8 000 ha) qui se situe entre 4°15' et 4°20' de latitude Sud et 16°14' et 16°20' de longitude Est. Le climat est tropical humide de type soudanien (type AW<sub>4</sub> selon la classification de Köppen) et comprend une grande saison sèche (de mi-mai à mi-septembre) et une grande saison des pluies (de mi-septembre à mi-mai). La pluviométrie annuelle est de 1 498 mm (± 253 mm) et l'humidité relative journalière est de 80 % en moyenne (Péroches, 2012). La température annuelle relevée sur le site est de 26 °C en moyenne avec une amplitude thermique annuelle de 14,5 °C (Bolaluembe Boliale, 2009). Le plateau Batéké, dont l'altitude est comprise entre 600 et 700 m, présente un relief globalement plat entaillé par le réseau hydrographique dont les versants sont occupés par des galeries forestières. Les sols sont principalement des sols sableux (Ferralic Arenosols ; Jones *et al.*, 2013) où dominent les savanes herbeuses et arbustives (photo 1).

### Données destructives de biomasse

L'échantillonnage des arbres pour la collecte des données destructives de biomasse a été réalisé en mars 2016 sur dix parcelles de la première régénération du peuplement mère (soit la deuxième rotation sur le site), âgées de 2 à 8 ans. Les arbres sélectionnés étaient représentatifs de la population d'*Acacia auriculiformis* rencontrée sur le site en termes de conformation générale des arbres, pour la plupart fourchus mais généralement au-dessus de 1,30 m, et ne présentaient pas de problème sanitaire. Afin d'éviter un effet de lisière, seuls les arbres distants du bord de la plantation d'au moins trois rangées d'arbres (environ 10 m) ont été échantillonnés. Au total, 24 arbres répartis régulièrement sur la gamme de diamètre (de 4 cm à 30 cm ; tableau II) ont été abattus dans des parcelles âgées de 2 (n = 2 arbres), 3 (n = 4 arbres), 4 (n = 4 arbres), 6 (n = 9 arbres) et 8 ans (n = 5 arbres), puis compartimentés et pesés.

Avant l'abattage, le diamètre à 1,30 m (D, en cm) a été mesuré au ruban diamétrique et la hauteur totale (H, en m) a été mesurée au VERTEX IV à partir de trois positions situées à une distance d'au moins une fois la hauteur de l'arbre. Durant l'abattage, chaque arbre a fait l'objet d'une séparation en cinq compartiments : la souche (du sol à la section d'abattage), la tige (de la section d'abattage jusqu'à la première fourche), les grosses branches (branches dont le diamètre fin bout est supérieur à 4 cm), les petites branches (branches dont le diamètre gros bout est inférieur ou égal à 4 cm), et les phylloides (pétioles transformés photosynthétiques, présentant chacun

**Tableau I.**

Caractéristiques des projets et des sites en République démocratique du Congo (RDC) utilisant le système agroforestier à *Acacia auriculiformis* qui combine cultures vivrières et production de bois-énergie.

Intitulé du projet (bailleur)	Précipitations (mm)	Province	Type de sol	Type de végétation	Durée rotation (ans)	Superficie plantée (ha)	Type de plantation	Taille des lots (ha)	Groupe cible (agriculteurs)	Origine des semences
Projet Ntsio (UE)	1 400	Kinshasa	Sablonneux, acide, chimiquement pauvre	Savane arbustive dégradée	10	4 200	Périmètre agroforestier	16	260	Gungu (RDC)
Projet Makala (UE)	1 400	Kinshasa	Sablonneux, acide, chimiquement pauvre	Savane arbustive dégradée	8-10	650	Plantations villageoises	0,5 - 5	> 200	Mampu (RDC)
	1 674	Tshopo	Ferralitique	Forêt secondaire	8-10	15	Plantations villageoises	0,5 - 5	> 100	Mampu (RDC)
	1 371	Kongo central	Argilo-sablonneux	Savane arbustive dégradée	8-10	550	Plantations villageoises	0,5 - 5	> 350	Mampu (RDC)
	1 520	Kasaï-oriental	Sableux	Savane herbeuse	8-10	150	Plantations villageoises	0,5 - 5	> 300	Mampu (RDC)
Projet Gungu (UE)	1 700	Kwilu	Sableux	Savane herbeuse à arbustive	7-10	1 800	Plantations villageoises	1 - 1,5	> 500	Gungu (RDC)
Projet AFODEK (UE)	1 049	Haut-Katanga	Ferralitique	Miombo dégradé	10	1 500	Périmètre agroforestier	10	150	CSIRO*
Projet DEFIV-DAFOMA (UE)	1 242	Kongo central	Sablonneux de type ferrasols	Savane arbustive dégradée	8	14,5	Plantations villageoises	0,2 - 1	48	Mampu

\* 15 provenances d'Océanie et d'Asie.

l'apparence d'une feuille ; photo 2). Cette séparation en cinq compartiments permet de distinguer, pour la production de charbon de bois, la part exploitable (tiges et grosses branches) de la part non exploitable (souche, petites branches et phylloides). Après l'abattage, la biomasse fraîche de tous les compartiments, à l'exception de la souche, a été mesurée directement à l'aide d'un peson mécanique d'une précision de 500 g. Ne pouvant être pesée directement, la souche a été cubée à partir de trois mesures du diamètre prises au mètre ruban : le diamètre au collet, le diamètre à 10 cm, ainsi que le diamètre à 30 cm de hauteur (hauteur d'abattage, constante). Puis les mesures ont été converties en volume à partir de la formule du tronc de cône (Rondeux, 1999). Pour la tige, les grosses branches et les petites branches, deux échantillons en forme de section ou de quartier (afin de respecter les variations radiales) ont été systématiquement prélevés. Pour les phylloides, un échantillon composite (~ 100 g) a été prélevé.

Au laboratoire, le jour du prélèvement des échantillons, la masse fraîche de chaque échantillon, préalablement conservé dans un sachet hermétique, a été mesurée à l'aide d'une balance de précision (0,01 g). Le volume frais/vert de chaque échantillon a été mesuré par pesée hydrostatique (Rondeux, 1999). Cette méthode consiste à suspendre l'échantillon dans un récipient d'eau, et à mesurer la masse d'eau déplacée (en g), qui correspond au volume de l'échantillon (en cm<sup>3</sup>). Après un passage à l'étuve à 105 °C pendant au moins 48 h afin d'atteindre l'état anhydre, la masse anhydre de chaque échantillon a ensuite été mesurée à l'aide d'une balance de précision (0,01 g). La teneur en matière sèche/anhydre (rapport entre la masse anhydre et la masse fraîche) des échantillons des compartiments pesés sur le terrain (tige, grosses branches, petites branches et phylloides) a permis de convertir les biomasses fraîches en biomasses anhydres. L'infra-densité (rapport entre le volume vert et la

**Tableau II.**

Caractéristiques dendrométriques des 24 arbres collectés et pesés dans les plantations agroforestières à *Acacia auriculiformis*. Mesures avant l'abattage appliquées à chaque arbre : diamètre (D, en cm) mesuré à hauteur de poitrine ; hauteur totale (H, en m) ; valeurs de biomasse sèche (B, en kg) pour chacun des compartiments : souche (s), tige (t), grosses branches (gb, ≥ 4 cm de diamètre), petites branches (pb) et feuilles/phylloides (f) ; infra-densité (ID, en g/cm<sup>3</sup>) pour les compartiments ligneux. L'identifiant (id) de l'arbre et l'âge (en années) de la parcelle d'exploitation sont également indiqués pour chaque arbre. La biomasse aérienne totale (B<sub>tot</sub>), (en kg) correspond à la somme des biomasses de chacun des compartiments.

id	Âge	D	H	B <sub>s</sub>	ID <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>	ID <sub>t</sub>	B <sub>gb</sub>	ID <sub>gb</sub>	B <sub>pb</sub>	ID <sub>pb</sub>	B <sub>f</sub>	B <sub>tot</sub>
31	2	4,8	5,9	1,5	0,508	2,5	0,524	0,0	-	3,3	0,497	1,7	9,0
30	2	5,3	7,1	2,1	0,485	4,2	0,464	0,0	-	2,7	0,456	1,5	10,5
27	3	6,1	8,5	2,5	0,503	4,6	0,473	1,3	0,435	2,9	0,408	1,5	12,8
26	3	7,6	10,2	4,5	0,576	10,2	0,550	2,9	0,534	7,6	0,522	3,1	28,3
28	3	8,7	8,1	6,2	0,544	8,5	0,523	3,0	0,498	11,6	0,519	4,9	34,2
29	3	9,5	10,4	7,4	0,513	8,2	0,480	8,3	0,436	7,2	0,481	4,3	35,4
25	4	10,6	10,5	9,6	0,567	17,6	0,553	7,6	0,498	12,3	0,387	6,5	53,6
24	4	11,6	10,4	9,8	0,558	16,2	0,555	16,3	0,496	19,2	0,561	7,1	68,6
13	6	12,7	18,45	7,2	0,571	22,2	0,571	43,6	0,535	8,1	0,565	4,7	85,8
17	6	13,4	12	17,0	0,655	54,9	0,625	4,3	0,656	11,2	0,573	6,1	93,5
23	6	14,2	15,4	12,4	0,601	51,8	0,568	8,2	0,548	21,7	0,544	5,2	99,3
22	6	15,5	13,4	14,9	0,677	43,7	0,638	45,5	0,582	16,7	0,488	7,6	128,4
14	4	16,5	15,35	34,9	0,696	64,3	0,612	1,7	-	14,1	0,552	7,1	122,1
16	4	17,8	15,3	28,8	0,589	89,7	0,564	11,0	0,526	14,1	0,552	7,3	150,9
21	8	18,7	23,5	18,3	0,634	132,0	0,613	10,5	0,565	28,4	0,511	7,4	196,6
18	6	19,9	14,35	41,3	0,634	99,2	0,597	12,4	0,493	17,4	0,448	9,6	179,9
19	6	20,4	16	33,6	0,617	36,4	0,593	78,2	0,548	34,3	0,548	12,6	195,1
15	6	21,4	17,6	44,3	0,643	76,4	0,587	87,9	0,490	20,5	0,505	10,3	239,4
12	8	21,5	21,1	12,9	0,625	118,8	0,608	95,5	0,581	36,7	0,596	16,9	280,8
20	8	23,2	14,1	32,2	0,664	89,1	0,632	146,7	0,576	82,6	0,605	15,4	366,0
33	8	24,2	18,1	60,2	0,546	50,4	0,546	172,2	0,531	29,7	0,527	14,2	326,7
32	8	25,9	20,8	76,7	0,748	119,3	0,724	152,5	0,654	60,8	0,568	24,7	434,0
38	6	26,7	24,7	59,6	0,678	63,7	0,695	271,2	0,619	66,0	0,546	35,6	496,1
42	6	27,8	25,6	60,1	0,619	203,8	0,642	201,2	0,576	72,8	0,533	12,6	550,5



**Photo 2.**  
Phyllode d'*Acacia auriculiformis*.  
Photo D. Louppe.

masse anhydre) de l'échantillon du compartiment souche (échantillon gros bout de la tige) a permis de convertir en biomasse anhydre le volume estimé sur le terrain.

### Données d'inventaire

Les données de 112 placettes d'inventaire temporairement installées sur le site de Mampu, couvrant de façon représentative le peuplement agroforestier d'*Acacia auriculiformis*, ont été rassemblées pour cette étude. Il s'agit de 77 placettes rectangulaires de 108 m<sup>2</sup> (9 x 12 m) inventoriées en 2010 par V. Lalande et de 35 placettes rectangulaires de 300 m<sup>2</sup> (10 x 30 m) inventoriées en 2012 par E. Dubiez (E. Dubiez, com. pers.). Un total de 13 fermes chacune gérée par une famille d'agriculteurs ont été sélectionnées, avec pour objectif, dans les deux inventaires, de couvrir l'ensemble d'une rotation sur chaque ferme. Les placettes de 1 à 9 ans sont bien représentées dans le jeu de données (au total 78 placettes, entre 7 et 15 placettes par âge), quelques placettes plus âgées de 10 à 14 ans (au total 24 placettes, entre 5 et 7 placettes par âge), et même jusqu'à 22 ans (au total 8 placettes) ont également pu être inventoriées. La grande majorité des placettes sont issues de la deuxième rotation, à l'exception des placettes de 22 ans et de certaines placettes de 1 an, appartenant respectivement à la première et à la troisième rotation.

Pour chaque placette ont été mesurés le diamètre à 1,30 m (au mètre ruban) des arbres et, dans la mesure du possible, la hauteur totale (au mètre ruban pour les petits arbres, et au relascope de Bitterlich pour les plus grands arbres). Les seuils d'inventaire étaient légèrement différents pour les deux inventaires : 3 cm de diamètre pour V. Lalande, et 1 cm de diamètre et 1 m de hauteur pour E. Dubiez. Pour des contraintes logistiques, l'ensemble de la surface n'ayant pu être inventoriée sur certaines placettes, la surface réellement inventoriée a donc été relevée à partir de mesures au décimètre. En tout, 2 830 arbres ont été inventoriés dans les 112 placettes d'inventaire, avec 1 315 arbres inventoriés

par V. Lalande en 2010 et 1 515 par E. Dubiez en 2012. Afin d'homogénéiser les deux inventaires, un total de 1 780 arbres de diamètre  $\geq 3$  cm et de hauteur  $\geq 1$  m dans 102 placettes de surface supérieure ou égale à 100 m<sup>2</sup> ont été considérés pour les analyses à l'échelle de la placette (structure des peuplements et accumulation de la biomasse).

### Analyse des données

Afin d'ajuster une équation allométrique de biomasse aérienne totale et de biomasse aérienne exploitable (tige et branches de diamètre  $> 4$  cm) spécifique au site d'étude, différents modèles allométriques dérivés du modèle puissance ont été testés sur les données destructives de biomasse, acquises localement à l'échelle de l'arbre. Les modèles testés intègrent le diamètre et/ou la hauteur dans les prédicteurs de la biomasse, et une transformation logarithmique des données a été réalisée pour linéariser les modèles et stabiliser la structure des résidus (Picard *et al.*, 2012). Le meilleur modèle allométrique a été sélectionné sur la base du critère d'information d'Akaike (AIC) et du critère d'information bayésien (BIC). Dans la formulation des équations de biomasse retenues, le facteur de correction  $CF = \exp(RSE^2/2)$  a été intégré pour corriger le biais systématique induit par la transformation logarithmique (Sprugel, 1983). Afin d'étudier les variations de l'allocation de la biomasse aérienne, la répartition de la biomasse entre les compartiments (souche, tige, branches et phyllodes) a tout d'abord été examinée graphiquement en fonction du diamètre des arbres. Les variations du facteur d'expansion de la biomasse (rapport entre la biomasse aérienne totale et la biomasse aérienne exploitable) en fonction du diamètre des arbres ont également été examinées, et un modèle puissance a été ajusté aux données à titre descriptif.

Pour chaque placette d'inventaire, en plus de la biomasse aérienne totale et de la biomasse exploitable à l'hectare, trois descripteurs de la structure des peuplements ont été calculés, la densité d'arbres à l'hectare, le diamètre quadratique moyen des arbres, et la hauteur dominante. Le diamètre quadratique correspond au diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne (Brown *et al.*, 1989). La hauteur dominante correspond à la hauteur moyenne d'un nombre déterminé d'arbres parmi les plus gros ou les plus hauts (Rondeux, 1999). Un modèle allométrique hauteur-diamètre a tout d'abord été ajusté localement pour estimer les hauteurs non mesurées (354 arbres sur 2 830 arbres inventoriés, soit 12,5 % des données). Il s'agit d'un modèle non linéaire de type puissance ( $H = 2,3083 \times D^{0,5774}$ ) ajusté sur les données log-transformées et intégrant le facteur de correction. La hauteur dominante a ensuite été calculée en considérant les deux plus grands arbres pour les petites placettes et les six plus grands arbres pour les plus grandes placettes. La biomasse totale et exploitable de chaque arbre a finalement été calculée à partir des deux équations allométriques spécifiques au site établies dans cette étude. La somme de la biomasse de tous les arbres a été calculée, puis ramenée à l'hectare. Les trois paramètres structuraux (densité de tige,

diamètre quadratique, hauteur dominante) et la biomasse ont été calculés pour les arbres d'au moins 3 cm de diamètre. Les variations de la structure et de la biomasse à l'hectare en fonction de l'âge des placettes ont également été examinées, et différents modèles (linéaire et puissance) ont été ajustés aux données selon la forme de la relation.

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées dans R (R Core Team, 2015). Les modèles linéaires ont été ajustés à l'aide de la fonction *lm*. Les modèles non linéaires de type puissance ont été linéarisés par transformation logarithmique, et le facteur de correction a été intégré pour corriger le biais systématique induit par la transformation. Les résidus des modèles ont été analysés graphiquement.

## Résultats

### Ajustement des modèles allométriques

Trois modèles allométriques dérivés du modèle puissance ont été testés sur les données destructives de biomasse collectées sur 24 arbres échantillonnés et pesés dans le peuplement agroforestier à *Acacia auriculiformis* (diamètre entre 8 et 27,8 cm, hauteur entre 5,9 à 25,6 m, et biomasse aérienne totale entre 9 et 550 kg ; tableau II). Les trois modèles s'ajustent bien aux données, mais le meilleur modèle pour la biomasse totale, sur la base de l'AIC et du BIC, est mod3 intégrant seulement le diamètre (D) comme prédicteur (tableau III). Pour la biomasse exploitable pour la production de charbon de bois (tige et branches > 4 cm), le meilleur modèle est mod1 intégrant le diamètre et la hauteur (H) dans les prédicteurs (tableau III). Pour des raisons de praticité, les données de hauteur étant rarement disponibles dans les données d'inventaire, nous retiendrons mod3 pour la biomasse exploitable. La relation entre

la biomasse et le diamètre des arbres présente bien une forme curvilinéaire (figure 1A), et l'ajustement du modèle puissance indique une valeur de coefficient de 2,302 avec un intervalle de confiance à 95 % de [2,208 ; 2,396] pour la biomasse aérienne totale, et de 2,728 [2,571 ; 2,885]. L'analyse graphique des résidus ne met pas en évidence de structure particulière (figures 1B et 1C).

### Allocation de la biomasse

Malgré les dimensions relativement faibles des arbres, entre 4,8 et 27,8 cm de diamètre pour les 24 arbres échantillonnés et pesés, l'allocation de la biomasse entre les différents compartiments (souche, tige, grosses et petites branches, phylloides) présente une certaine variation (tableau I, figure 2A). La part de la biomasse exploitable (tige et branches > 4 cm) augmente avec le diamètre des arbres, et en conséquence le facteur d'expansion de la biomasse (rapport entre la biomasse totale et la biomasse de la tige) diminue, et ce de façon non linéaire (figure 2B). La diminution est d'abord importante pour les arbres de petite taille (< 12 cm de diamètre), puis cette diminution ralentit et semble se stabiliser.

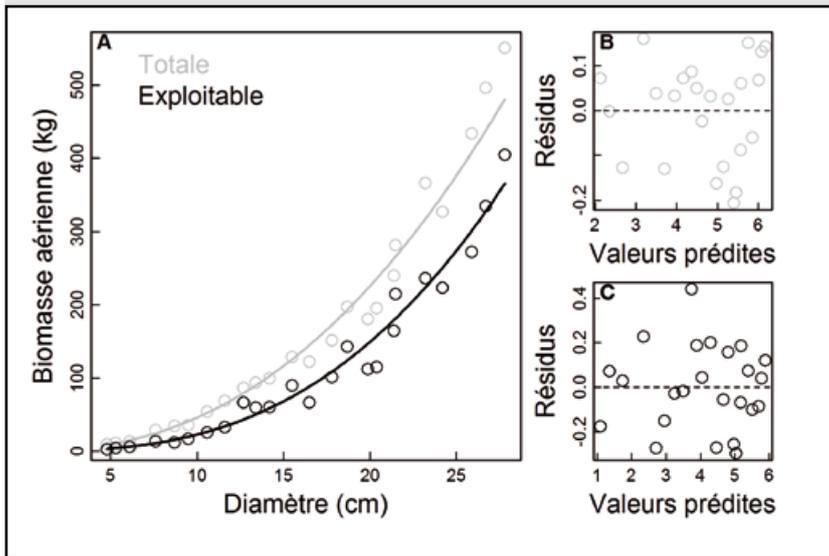
### Structure des peuplements

Le diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur totale des arbres inventoriés varient entre 1 et 57,3 cm et entre 1 et 31,1 m, respectivement. Si l'on considère l'ensemble des placettes (1-22 ans), la densité (nombre d'arbres de diamètre  $\geq$  3 cm et de hauteur  $\geq$  1 m à l'hectare) présente une évolution apparemment unimodale avec l'âge des placettes (figure 3A), avec un pic, une densité maximale, aux alentours de 6 ans. L'augmentation de la densité dans les

**Tableau III.**

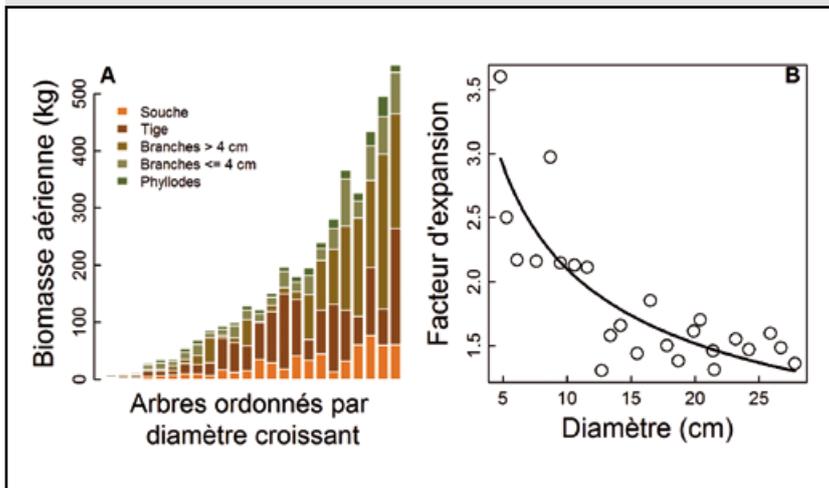
Ajustement des modèles allométriques reliant la biomasse aérienne totale et la biomasse aérienne exploitable (en kg) au diamètre (D, en cm) mesuré à hauteur de poitrine et à la hauteur totale (H, en m) des arbres. Le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information bayésien (BIC), l'écart-type résiduel (RSE, en kg) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ), ainsi que les valeurs ajustées des paramètres (a, b, et c) et leur intervalle de confiance sont donnés pour chaque modèle.

Modèle	Forme	AIC	BIC	RSE	$R^2$	a	b	c
<b>Biomasse totale</b>								
mod1	$\log(B) = a + b \cdot \log(D) + c \cdot \log(H)$	- 31,66	- 26,95	0,1132	0,992	- 1,5964 [- 1,94 ; - 1,25]	2,2020 [1,97 ; 2,43]	0,1435 [- 0,16 ; 0,45]
mod2	$\log(B) = a + b \cdot \log(D^2H)$	- 15,56	- 12,02	0,1613	0,983	- 2,0727 [- 2,47 ; - 1,68]	0,8442 [0,80 ; 0,89]	
mod3	$\log(B) = a + b \cdot \log(D)$	- 32,57	- 29,03	0,1132	0,992	- 1,4852 [- 1,74 ; - 1,23]	2,3020 [2,21 ; 2,40]	
<b>Biomasse exploitable (tige et branches &gt; 4 cm)</b>								
mod1	$\log(B) = a + b \cdot \log(D) + c \cdot \log(H)$	- 16,40	- 11,68	0,1556	0,989	- 3,7141 [- 4,19 ; - 3,24]	2,2529 [1,94 ; 2,57]	0,6811 [0,27 ; 1,10]
mod2	$\log(B) = a + b \cdot \log(D^2H)$	- 15,48	- 11,95	0,1615	0,988	- 3,9357 [- 4,33 ; - 3,54]	1,0070 [0,96 ; 1,06]	
mod3	$\log(B) = a + b \cdot \log(D)$	- 7,79	- 4,25	0,1896	0,983	- 3,1860 [- 3,61 ; - 2,76]	2,7276 [2,57 ; 2,89]	



**Figure 1.**

Modélisation de la biomasse aérienne (en kg) totale (points gris) et exploitable (points noirs) en fonction du diamètre (en cm) des arbres à hauteur de poitrine (A) et variation des résidus (écart entre les prédictions et les observations) en fonction des prédictions pour la biomasse aérienne totale (B) et exploitable (C). Les courbes correspondent à l'ajustement du modèle allométrique mod3 (tableau III) ajusté sur les données après transformation logarithmique (tableau II).



**Figure 2.**

Répartition de la biomasse aérienne (A) entre la souche, la tige et les branches de plus de 4 cm de diamètre, les petites branches et les phyllodes, et variation du facteur d'expansion de la biomasse (rapport entre la biomasse totale et la biomasse exploitable) en fonction du diamètre (B) pour les 24 arbres collectés et pesés dans les plantations agroforestières à *Acacia auriculiformis*. La biomasse exploitable (tige et branches de plus de 4 cm de diamètre) est représentée en foncé sur le diagramme A. La courbe en noir sur le diagramme B correspond à l'ajustement d'un modèle puissance.

premières années de la plantation est un artefact lié au passage des arbres au seuil d'inventaire (fixé ici à 3 cm pour homogénéiser les deux inventaires). La diminution de la densité dans les vieilles parcelles de 22 ans s'explique par la mortalité et/ou les prélèvements, mais aussi et surtout par le fait que celles-ci ont été implantées lors de la phase industrielle de la plantation, dans des conditions contrôlées, où les densités recommandées (comprises entre 800 et 1 200 tiges à l'hectare) ont été respectées. Si l'on restreint l'analyse aux placettes entre 4 et 14 ans ( $n = 76$  placettes, toutes de deuxième rotation), il n'y a pas de relation significative entre la densité et l'âge des placettes ( $P = 0,949$ ). Sur cette même période, la densité moyenne est de 1 500 arbres à l'hectare, soit un peu au-dessus de l'itinéraire technique conseillé (entre 800 et 1 200 arbres à l'hectare), et globalement très variable, avec 800 et 1 900 arbres à l'hectare pour les quartiles inférieur et supérieur. Il y a même trois placettes, de 6, 8 et 10 ans, pour lesquelles la densité est supérieure à 3 000. Si les tendances observées sont similaires pour les deux inventaires, à savoir une grande variabilité de la densité pour un même âge et pas de diminution significative de la densité avec l'âge, les estimations de densité issues de l'inventaire de V. Lalande (1 692 arbres à l'hectare dans les placettes de 108 m<sup>2</sup>, petits symboles et trait tireté sur la figure 3A) sont largement supérieures aux estimations de densité issues de l'inventaire de E. Dubiez (1 012 arbres à l'hectare dans les placettes de 300 m<sup>2</sup>, grands symboles et trait pointillé). La taille des placettes apparaît donc importante pour l'estimation de la densité dans ce type de peuplement.

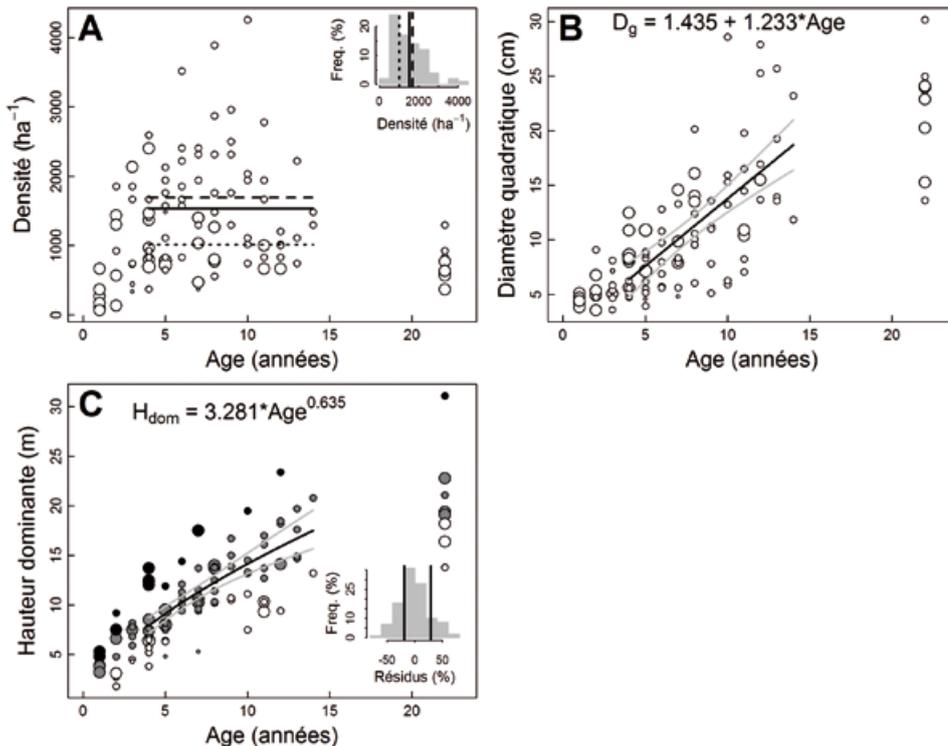
Sur ce même jeu de placettes ( $n = 76$  placettes, entre 4 et 14 ans, toutes de deuxième rotation), le diamètre quadratique moyen augmente linéairement avec l'âge (figure 3B), et ce de façon relativement similaire pour les deux inventaires. De cette relation, on peut déduire que la croissance en diamètre des *Acacia auriculiformis* sur les sols chimiquement très pauvres et filtrants du site de Mampu est d'environ 1,23 cm par an en moyenne. Il existe cependant une grande hétérogénéité autour de cette relation entre le diamètre quadratique moyen et l'âge des placettes.

Sur ce même jeu de placettes, la hauteur dominante augmente avec l'âge des placettes (figure 3C), et ce de façon relativement similaire pour les deux inventaires. Étant donné la forme de la relation, le modèle puissance a été ajusté aux données. Il permet en outre de faire des prédictions raisonnables en dehors de l'intervalle de calibration (Picard *et al.*, 2012). Comme pour le diamètre quadratique, il existe une grande hétérogénéité autour de la relation entre la hauteur dominante et l'âge des placettes. La hauteur dominante est généralement un bon indice de

**Tableau IV.**

Évolution de la structure des peuplements (densité de tiges à l'hectare, diamètre quadratique correspondant au diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne, et hauteur dominante correspondant à la hauteur moyenne d'un nombre déterminé d'arbres parmi les plus gros ou les plus hauts) et du stock de biomasse (aérienne totale et exploitable) à l'hectare avec l'âge dans les plantations agroforestières à *Acacia auriculiformis*. Pour chaque classe d'âge, le nombre (n) de placettes, et pour chaque descripteur de la structure des peuplements ou du stock de biomasse, la moyenne et l'erreur standard de la moyenne sont indiqués. Seules les placettes pour lesquelles l'ensemble de la surface a pu être inventoriée sont reprises ici (n = 127 placettes), et seuls les arbres de plus de 3 cm de diamètre et de 1 m de hauteur ont été considérés pour les calculs.

Âge (ans)	n placettes	Structure des peuplements			Stock de biomasse aérienne	
		Densité (/ha)	Diamètre quadratique (cm)	Hauteur dominante (m)	Totale (1 000 kg/ha)	Exploitable (1 000 kg/ha)
1	6	272 ± 90,9	4,5 ± 0,19	4 ± 0,3	2,1 ± 0,84	0,8 ± 0,400
2	7	1 072 ± 218,2	5,6 ± 0,68	6 ± 1,0	16,4 ± 6,08	7,5 ± 3,34
3	5	1 427 ± 289,6	5,8 ± 0,61	7 ± 0,4	21,8 ± 7,70	9,9 ± 4,02
4	14	1 260 ± 171,7	7,1 ± 0,64	8 ± 0,8	32,1 ± 7,69	17 ± 4,70
5	9	1 278 ± 192,6	7,2 ± 0,73	8 ± 0,6	31,3 ± 7,93	15,9 ± 4,49
6	7	2 011 ± 316,1	8,5 ± 1,03	11 ± 0,7	62 ± 9,83	33,4 ± 6,36
7	8	1 520 ± 233,7	9,4 ± 1,07	12 ± 1,0	72,1 ± 20,84	46,5 ± 15,48
8	10	1 802 ± 334,0	12,2 ± 1,26	13 ± 0,5	114,6 ± 12,55	72,6 ± 9,03
9	5	2 167 ± 290,8	9,7 ± 1,48	13 ± 1,2	107,8 ± 30,52	63,7 ± 19,68
10	6	1 852 ± 526,4	14,2 ± 3,39	13 ± 1,6	171,4 ± 58,41	128,3 ± 54,94
11	7	1 389 ± 293,0	12,5 ± 1,75	13 ± 1,1	108,7 ± 31,56	69,4 ± 23,21
12	4	931 ± 116,0	21,4 ± 3,06	19 ± 1,9	280,5 ± 83,49	217,8 ± 73,56
13	4	1 204 ± 350,4	18,1 ± 2,85	17 ± 1,2	213,7 ± 50,78	167,3 ± 53,93
14	2	1 388 ± 92,5	17,5 ± 5,68	17 ± 3,8	269,5 ± 165,03	197,9 ± 138,13
22	8	749 ± 99,3	21,9 ± 1,91	20 ± 1,8	240,1 ± 62,18	189,7 ± 54,42

**Figure 3.**

Évolution de la structure des peuplements avec l'âge : densité de tiges à l'hectare (A), diamètre quadratique moyen (B) et hauteur dominante (C). Un point correspond à une placette d'inventaire. La taille des symboles est proportionnelle au carré de la surface échantillonnée. Les traits noirs pleins correspondent aux prédictions des modèles ajustés aux données sur la chronoséquence restreinte et les traits gris à l'intervalle de confiance des prédictions. Les équations sont également indiquées. Pour la densité, qui ne varie pas avec l'âge, l'hétérogénéité est illustrée en insert par la distribution des densités sur la chronoséquence restreinte (4-14 ans), et le trait plein correspond à la moyenne calculée sur l'ensemble des données (N = 1 531 arbres par hectare), et séparément pour les deux inventaires (traits en tireté et pointillé). Pour la hauteur dominante, les couleurs correspondent aux trois groupes de placettes identifiés à partir des résidus relatifs : un groupe de placettes pour lesquelles la hauteur dominante est largement plus petite que la prédiction du modèle puissance ajusté sur les données ( $\leq -19\%$ , n = 29 placettes, en blanc), un groupe de placettes de hauteur dominante proche de la prédiction (n = 66 placettes, en gris), et un groupe de placettes pour lesquelles la hauteur dominante est largement plus grande que la prédiction ( $> 28,75\%$ , n = 15 placettes, en noir). La distribution des résidus relatifs est également donnée en insert.

productivité du site et l'écart relatif (en %) entre les prédictions du modèle et les hauteurs dominantes observées a été calculé pour les 110 placettes d'inventaire. Afin d'identifier des placettes de productivité contrastées, nous avons établi trois groupes : un groupe de placettes pour lesquelles la hauteur dominante est largement plus petite que la prédiction du modèle ( $\leq -19\%$ ,  $n = 29$  placettes, en blanc sur la figure 3C) ; un groupe de placettes de hauteur dominante proche de la prédiction ( $n = 66$  placettes, en gris) ; et un groupe de placettes pour lesquelles la hauteur dominante est largement plus grande que la prédiction ( $> 28,75\%$ ,  $n = 15$  placettes, en noir). Les groupes correspondent à un intervalle constant en termes d'écart relatif (entre  $-66\%$  et  $75\%$ ) entre les prédictions du modèle et les hauteurs dominantes observées.

### Accumulation de la biomasse

La biomasse aérienne totale des arbres inventoriés varie entre 0,23 et 2 541 kg, pour une moyenne de 52,3 kg. Sur le jeu de placettes « restreint » ( $n = 76$  placettes, entre 4 et 14 ans, toutes de deuxième rotation), la biomasse aérienne totale à l'hectare augmente avec l'âge des placettes dans les deux inventaires (figure 4A). Une divergence entre les deux inventaires apparaît néanmoins à partir de 7-8 ans. D'après la forme de la relation et parce qu'il permet de faire des prédictions raisonnables en dehors de l'intervalle de calibration (Picard *et al.*, 2012), le modèle puissance a été ajusté aux données. Comme pour les trois paramètres structuraux (densité, diamètre quadratique et hauteur dominante), il existe également une grande hétérogénéité autour de la relation entre la biomasse à l'hectare et l'âge des placettes. Une partie de cette hétérogénéité s'explique par la productivité estimée à l'aide de la hauteur dominante. Les résidus du modèle reliant la biomasse à l'âge des placettes diffèrent significativement en fonction du groupe de hauteur dominante, d'après les résultats d'une analyse de variance à un facteur ( $F_{2,73} = 10,2$  et  $P < 0,001$ ). Il existe également une corrélation significative ( $R^2 = 0,63$ ,  $P < 0,001$ ) entre les résidus du modèle de biomasse et les résidus relatifs du modèle de hauteur. En ce qui concerne la biomasse exploitable, les résultats sont similaires (figure 4B).

## Discussion

### Allométrie et allocation

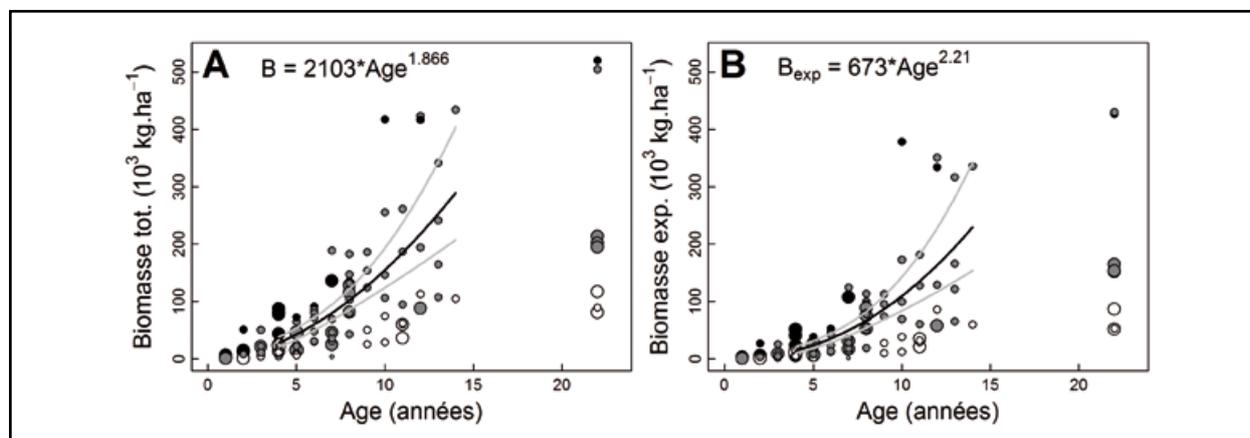
En plantation, l'allométrie des arbres varie en fonction de l'espèce, de l'âge du peuplement, de la qualité du site, du climat et de la sylviculture (Zianis et Mencuccini, 2004). Dans cette étude, les modèles allométriques développés à partir des données destructives de biomasse collectées sur 24 arbres échantillonnés et pesés, dans le peuplement agroforestier à *Acacia auriculiformis* du site de Mampu, donnent de bonnes prédictions pour la biomasse aérienne totale et la biomasse aérienne exploitable. En intégrant le facteur de correction du biais lié à la transformation logarithmique des données, les équations allométriques de biomasse retenues sont les suivantes :

$$B_{\text{tot}} = 0,2279 \times D^{2,3020} \quad (\text{équation 1})$$

$$B_{\text{exp}} = 0,0421 \times D^{2,7276} \quad (\text{équation 2})$$

Ces équations sont valables sur l'intervalle de calibration (4-28 cm de diamètre), gamme de diamètre représentative d'un peuplement agroforestier d'*Acacia auriculiformis* de première régénération du peuplement mère (deuxième rotation) sur le site de Mampu. À titre d'exemple, les arbres de plus de 30 cm de diamètre ( $n = 42$ ) représentent seulement 1,5 % des arbres inventoriés. S'il est évidemment préférable d'utiliser les équations sur l'intervalle de calibration, le choix d'un modèle de type puissance, contrairement aux modèles linéaires, permet de faire des prédictions raisonnables en dehors de l'intervalle de calibration (Picard *et al.*, 2012). Pour la biomasse aérienne totale, un seul prédicteur a été sélectionné, s'agissant du diamètre mesuré à hauteur de poitrine. Si la hauteur est un prédicteur important de la biomasse en forêt dense (Feldpausch *et al.*, 2011), ce n'est pas forcément le cas pour les forêts claires africaines (Loubota Panzou *et al.*, 2016) ou les plantations monospécifiques.

Pour les arbres tropicaux, il a été démontré que l'allocation de la biomasse aérienne au houppier augmente avec le diamètre des arbres (Henry *et al.*, 2010 ; Goodman *et al.*, 2014). Dans cette étude, nous avons identifié une



**Figure 4.**

Dynamique d'accumulation de la biomasse aérienne totale (A) et exploitable (B) à l'hectare. Un point correspond à une placette d'inventaire. La taille des symboles est proportionnelle au carré de la surface échantillonnée. Les traits noirs correspondent aux prédictions des modèles ajustés aux données sur la chronoséquence restreinte. Les traits gris correspondent à l'intervalle de confiance des prédictions des modèles. Les équations sont également indiquées. Les couleurs correspondent aux trois groupes de placettes identifiés à partir des résidus relatifs de la relation entre la hauteur dominante et l'âge des placettes (voir figure 3).



**Photo 3.**

Vue aérienne du périmètre agroforestier de Mampu illustrant l'hétérogénéité structurale entre et au sein des lots. Image google earth 2017.

grande variabilité de l'allocation de la biomasse aérienne au houppier, mais pas de tendance systématique avec la taille des arbres. Nous avons par ailleurs mis en évidence que la part de biomasse exploitable augmente avec l'âge et la taille des arbres. En conséquence, le facteur d'expansion de la biomasse exploitable à la biomasse totale (BEF) n'est pas constant et il diminue avec l'âge et la taille des arbres. Les résultats obtenus dans cette étude pour le peuplement agroforestier à *Acacia auriculiformis* du site de Mampu sont en accord avec ceux rapportés en forêt dense sempervirente au Ghana (Henry *et al.*, 2010) (entre 1,13 et 2,22, avec une moyenne de 1,5 pour des arbres de 2 à 180 cm de diamètre) et à l'échelle du peuplement pour six sites en forêt tropicale (Brown *et al.*, 1989) au Cameroun ( $n = 1$ ) ; en Guyane française ( $n = 1$ ) ; en Malaisie ( $n = 1$ ) et au Sri Lanka ( $n = 3$ ) ; et pour des plantations à *Acacia* et à *Eucalyptus* dans le sud de la Chine (Zhang *et al.*, 2012). Une saturation du BEF vers des valeurs comprises entre 2 et 1,5, pour un diamètre quadratique moyen de 30 cm, est rapportée par Brown *et al.* (1989). Dans notre étude, la même tendance a été observée, avec une saturation autour des mêmes valeurs de BEF mais à partir d'un diamètre quadratique moyen de 15 cm, ce qui s'explique probablement par le seuil d'inventaire beaucoup plus faible (3 cm de diamètre) ici. En Afrique, les BEF disponibles sont relativement limités (Henry *et al.*, 2011), et nos résultats peuvent permettre d'utiliser les données de volumes existantes et/ou les prédictions des tarifs de cubage disponibles (Lejeune et Rondeux, 1994 ; Péroches, 2012).

### Production de bois

Sur le site de Mampu, la plantation industrielle de 8 000 ha, conduite entre 1987 et 1993, a généré une dynamique paysagère (et forestière) visible par télédétection (Gond *et al.*, 2016). Aujourd'hui, il existe une grande hétérogénéité structurale sur le site (photo 3), en partie due à l'évolution du peuplement avec l'âge, et à la coexistence de parcelles d'âges différents. Entre des parcelles de même âge, il existe également une grande variabilité, du fait de l'hétérogénéité des conditions environnementales, notamment du sol comme semble l'indiquer la hauteur dominante, et/ou du niveau d'appropriation de l'itinéraire technique par les différentes familles d'agriculteurs (régénération par le feu, éclaircies, calendrier agricole, rythme d'exploitation). Dans cette étude, nous n'avons pas identifié de variation significative de la densité avec l'âge, pour l'ensemble du jeu de données et séparément pour les deux inventaires, alors qu'une relation décroissante est attendue du fait de la mortalité naturelle et/ou des prélèvements. Dans ce type de système agroforestier, la mortalité des arbres est comprise entre 5 et 18 % à dix ans selon les observations de Bernhard-Reversat *et al.* (1993) et de N'Guessank *et al.* (2006), et de 42 % à 15 ans selon les estimations de Vijay *et al.* (2007). Si l'on émet l'hypothèse qu'il n'y a pas (ou peu) de mortalité, au moins dans les dix premières années, la distribution des densités entre 66 et 3 889 tiges à l'hectare illustre la variabilité d'application de l'itinéraire technique recommandé. Bien que les variations de densité soient moindres quand les placettes d'inventaire sont plus grandes, les variations de densité sont néanmoins importantes localement. Une densité inférieure à 800 tiges à l'hectare peut s'expliquer par des situations de départ contrastées (indisponibilité des graines) et/ou l'absence de respect du calendrier des brûlis, celui-ci étant préconisé en début de saison des pluies (Bisiaux *et al.*, 2009). Un brûlis trop précoce, pratiqué en fin de saison sèche, bien que présentant l'avantage de diminuer la pénibilité du travail de sarclage, peut endommager la structure du sol ainsi que le « mulch » qui le recouvre (Bisiaux *et al.*, 2009). Il peut également réduire le taux de germination des graines en raison de l'intensité du feu. Une densité supérieure à 1 200 tiges s'explique par une mauvaise mise à densité du peuplement. Sur une parcelle d'*Acacia auriculiformis* exploitée à huit ans, les graines, dont la dormance a été levée par la chaleur d'un feu contrôlé, germent abondamment. Il en résulte une densité élevée en jeunes plants. Pour atteindre une densité comprise entre 800 et 1 200 plants, les plants excédentaires doivent être supprimés et certains déplacés pour combler les vides (Bisiaux *et al.*, 2009). Sur le site de Mampu, pour plus de 50 % des placettes, les densités en *Acacia auriculiformis* sont supérieures à la densité théorique (entre 800 et 1 200 tiges à l'hectare), ce qui indique une absence ou une mauvaise mise à densité du peuplement. Ce constat peut s'expliquer par le recours à de la main-d'œuvre non qualifiée pour les travaux de préparation des champs, comme observé

## Conclusion

par V. Lalande (com. pers.). Une importante densité n'est pas dommageable quand on considère la production de biomasse totale, mais peut être problématique quand on cherche à atteindre certaines dimensions, par exemple des branches à plus de 4 cm, pour la production de charbon de bois.

D'après les prédictions des différents modèles ajustés sur les données d'inventaire, à dix ans, le diamètre quadratique moyen des arbres est de 13,8 cm pour une hauteur dominante moyenne de 14,0 m, et la biomasse sèche totale accumulée dans les parties aériennes est de 145,4 tonnes par hectare. Une relation linéaire a été identifiée entre le diamètre des arbres et l'âge, indiquant une croissance moyenne en diamètre de 1,23 cm/an, ce qui est comparable aux valeurs observées par Aoudji *et al.* (2011) dans les plantations d'*Acacia auriculiformis* de Pahou au Bénin (entre 1,2 et 3,1 cm/an). Sur la base de la hauteur dominante, une première tentative de développement d'un indice de productivité a été proposée (Vanclay, 1992). En effet, nous avons pu montrer que la hauteur dominante expliquait en partie l'hétérogénéité autour de la relation entre la biomasse et l'âge des placettes, alors que la hauteur des arbres n'entrait pas dans l'estimation de la biomasse. La production de biomasse rapportée dans cette étude, avec 145 tonnes par hectare à 10 ans, est comparable aux résultats de Zhang *et al.* (2012) en Chine, avec 153 tonnes par hectare pour des plantations matures ( $\geq 16$  ans). Si ces résultats sont néanmoins largement inférieurs aux valeurs citées par Fonton *et al.* (2002) au sud du Bénin – avec 125 tonnes par hectare à seulement 6 ans (58,6 tonnes dans cette étude, soit 46,8 %), et la relativement rapide accumulation de la biomasse sur les sols chimiquement très pauvres et très acides du plateau Batéké, pH = 5,2 (E. Dubiez, com. pers.), et pH  $\leq 5,3$  (Kasongo *et al.*, 2009) –, ils confirment bien qu'*Acacia auriculiformis* est une essence appropriée pour des projets d'afforestation ou reforestation. Ces bonnes performances sur le plateau Batéké ont d'ailleurs déjà été identifiées (Gerkens et Kasali, 1988). La rapide accumulation de la biomasse permet des cycles courts (compatibles avec l'activité de production de charbon de bois en milieu rural) et une exploitation à partir de 8 ans dans le système agroforestier de type Mampu.

La durabilité et la diffusion de ce système agroforestier peuvent néanmoins être discutées. Premièrement, il recourt à une essence exotique dont les risques d'invasivité ne sont pas documentés dans le contexte de la RDC. Deuxièmement, malgré plus de 10 ans d'accompagnement des agriculteurs de Mampu à la pratique de l'itinéraire technique recommandé, de fortes disparités sont encore observées, et un manque de maîtrise de l'itinéraire technique a nécessairement des impacts sur la productivité du site. Enfin, les origines et la diversité du matériel génétique de départ ne sont pas documentées, et des risques de consanguinité sont possibles. La productivité en biomasse aérienne estimée sur le site de Mampu est cependant globalement encourageante et s'aligne sur les productivités d'autres plantations renseignées dans la littérature.

L'objectif de cette étude était de fournir une évaluation de la performance du système agroforestier de type Mampu en termes de production de bois, notamment de biomasse exploitable pour la production de charbon de bois. À partir de données destructives acquises localement à l'échelle de l'arbre, nous avons pu ajuster une équation allométrique de biomasse (pour la biomasse aérienne totale et pour la biomasse exploitable) spécifique au site, et développer un facteur d'expansion de la biomasse. En convertissant des données d'inventaire à l'échelle de la placette grâce aux équations allométriques établies localement, nous avons pu estimer la biomasse dans le système agroforestier sur l'ensemble d'une rotation théorique (8-10 ans). Malgré une grande hétérogénéité structurale sur le site, la production d'*Acacia auriculiformis* est tout à fait satisfaisante avec, à 10 ans en moyenne, des peuplements de 13,8 cm de diamètre quadratique moyen, de 14 m de hauteur dominante, et un stock de biomasse aérienne de 145,4 tonnes par hectare.

### Remerciements

Les auteurs remercient les projets Ntsio et Makala, subventionnés par l'Union européenne, qui ont permis de financer certaines parties de cette étude, et respectivement la collecte des données destructives de biomasse et les données d'inventaire. Les auteurs remercient également les fermiers de Mampu, sans qui rien ne serait possible, et les étudiants qui ont contribué à la collecte des données d'inventaire. Pierre Procs remercie tout particulièrement Jacques Hébert pour l'accès au laboratoire de sciences du bois de Gembloux Agro-Bio Tech. Adeline Fayolle remercie Gauthier Ligot et Philippe Lejeune pour les conseils et discussions concernant le traitement et l'analyse des données. Enfin, Pierre Procs et Adeline Fayolle remercient Michel Gerkens pour les précieuses discussions conduites avec lui.

## Références bibliographiques

- Akinnifesi F. K., Sileshi G. W., Ajayi O. C., Chirwa P. W., Kwe-siga F. R., Harawa R., 2008. Contributions of agroforestry research and development to livelihood of smallholder farmers in Southern Africa. 2. Fruit, medicinal, fuelwood and fodder tree systems. *Agricultural Journal*, 3: 76-88. <http://medwelljournals.com/abstract/?doi=aj.2008.76.88>
- Aoudji A. K. N., Yevide A. S. I., Ganglo J. C., Atindogbé G., Toyi M. S., De Cannière C. *et al.*, 2011. Structural characteristics and forest sites identification in Pahou forest reserve, South-Benin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 308 (2): 47-58. [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_308\\_47-58.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_308_47-58.pdf)
- Bernhard-Reversat F., Diangana D., Tsatsa M., 1993. Biomasse, minéralomasse et productivité en plantation d'*Acacia mangium* et *A. auriculiformis* au Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 238 (4) : 35-44. [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_238\\_35-44.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_238_35-44.pdf)
- Bisiaux F., Peltier R., Muliele J.-C., 2009. Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, Mampu, en République démocratique du Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 301 (3) : 21-32. [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_301\\_21-32.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_301_21-32.pdf)
- Bolaluembe Boliale P. C., 2009. Problématique de la gestion durable des forêts artificielles en Afrique centrale : cas de la forêt de Mampu à Kinshasa, en République Démocratique du Congo. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 56 p.
- Brown S., Gillespie A. J. R., Lugo A. E., 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35 (4): 881-902. <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/1989/00000035/00000004;jsessionid=1doeqvix95b7.x-ic-live-03>
- Feldpausch T. R., Banin L., Phillips O. L., Baker T. R., Lewis S. L., Quesada C. A. *et al.*, 2011. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences*, 8: 1081-1106. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>
- Fonton N. H., Kakai R. G., Rondeux J., 2002. Étude dendrométrique d'*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. en mélange sur vertisol au Bénin. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 6 (1) : 29-37. <http://www.pressesagro.be/base/index.php/base/article/view/172/164>
- Gerkens M., Kasali L., 1988. Productivity of *Acacia auriculiformis* plantation on the Bateke plateau in Zaïre. *Tropicultura*, 6 (4): 171-175. <http://www.tropicultura.org/text/v6n4/171.pdf>
- Gillet P., Feintrenie L., Codina Llavina E., Lehnebach C., Vermeulen C., 2015. The effect of deforestation rate on land tenure in Central Africa. *In: Linking land tenure and use for shared prosperity*. 16th Annual World Bank Conference on Land and Poverty, March 23-27, 2015, Washington, DC, USA, 22 p. <http://agritrop.cirad.fr/576009/>
- Gond V., Dubiez E., Boulogne M., Gigaud M., Péroches A., Pennec A. *et al.*, 2016. Forest cover and carbon stock change dynamics in the Democratic Republic of Congo: Case of the wood-fuel supply basin of Kinshasa. *Bois et Forêts des Tropiques*, 327 (1): 19-28. [http://bft.cirad.fr/cd/BFT\\_327\\_19-28.pdf](http://bft.cirad.fr/cd/BFT_327_19-28.pdf)
- Goodman R. C., Phillips O. L., Baker T. R., 2014. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications*, 24: 680-698. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/13-0070.1/full>
- Henry M., Besnard A., Asante W. A., Eshun J., Adu Bredu S., Valentini R., Bernoux M. *et al.*, 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1375-1388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040>
- Henry M., Picard N., Trotta C., Manlay R. J., Valentini R., Bernoux M. *et al.*, 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45: 477-569. <https://doi.org/10.14214/sf.38>
- Imo M., 2009. Interactions amongst trees and crops in taungya systems of western Kenya. *Agroforestry Systems*, 76: 265-273. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-008-9164-z>
- Jones A., Breuning-Madsen H., Brossard M., Dampha A., Deckers J., Dewitte O. *et al.*, 2013. Soil atlas of Africa. European Union, Joint Research Center, 178 p. <http://dx.doi.org/10.2788/52319>
- Kalame F. B., Aicloo R., Nkem J., Ajayie O. C., Kanninen M., Luukkanen O. *et al.*, 2011. Modified taungya system in Ghana: a win-win practice for forestry and adaptation to climate change? *Environmental Science & Policy*, 14 (5): 519-530. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.011>
- Kasongo R. K., Van Ranst E., Verdoodt A., Kanyankagote P., Baert G., 2009. Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau, D.R. Congo. *Soil Use and Management*, 25: 21-27. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2008.00188.x/epdf>
- Kumar M., Nair P. K. R., 1998. Carbon sequestration potential of agroforestry systems, opportunities and challenges. School of Forest Resources and Conservation, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, 326 p. <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-94-007-1630-8>
- Lejeune P., Rondeux J., 1994. Modèles de cubage pour essences multi-tiges : application à des plantations d'*Acacia*. *Cahiers Agricultures*, 3 : 189-194. <http://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/29837>

- Loubota Panzou G. J., Doucet J.-L., Loumeto J. J., Biwole A., Bauwens S., Fayolle A., 2016. Biomasse et stocks de carbone des forêts tropicales africaines (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 20 : 508-522. <http://www.pressesagro.be/base/text/v20n4/508.pdf>
- Marien J.-N., Dubiez E., Louppe D., Larzillière A., 2013. Quand la ville mange la forêt. Les défis du bois-énergie en Afrique centrale. Versailles, France, Quæ, 240 p. <http://www.quae.com/fr/r2888-quand-la-ville-mange-la-foret-.html>
- Mayaux P., Pekel J. F., Desclée B., Donnay F., Lupi A., Achard F. *et al.*, 2013. State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 1 625 p. <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/368/1625/20120300>
- Menzies N., 1988. Three hundred years of Taungya: a sustainable system of forestry in South China. *Human Ecology*, 16: 361-376. [http://www.jstor.org/stable/4602898?seq=1#-page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/4602898?seq=1#-page_scan_tab_contents)
- Nair P. K. R., 1985. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 3: 97-128. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00122638>
- N'Guessank A., Dupuy B., Assa A., N'Gorana A., 2006. Légumineuses arborescentes pour la gestion durable des terroirs agricoles en basse Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 18 (3) : 267-283. <https://www.ajol.info/index.php/aga/article/view/1697>
- Péroches A., 2012. Étude sur l'évolution de la biomasse au niveau de terroirs du Plateau Batéké en République Démocratique du Congo : Impact des systèmes de culture et des techniques agroforestières telles que la Régénération Naturelle Assistée promues par le projet Makala. Montpellier, France, Montpellier SupAgro, 79 p. <http://agritrop.cirad.fr/570248/>
- Picard N., Saint-André L., Henry M., 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction. Montpellier, France, CIRAD-FAO, 222 p. <http://agritrop.cirad.fr/569883/>
- Ramadhani T., Otsyina R., Franzel S., 2002. Improving household incomes and reducing deforestation using rotational woodlots in Tabora district, Tanzania. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 89 (3): 229-239. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00165-7)
- R Core Team, 2015. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Rondeux J., 1999. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2<sup>e</sup> édition, 522 p. <http://hdl.handle.net/2268/108388>
- Rudel T. K., Roberts T. J., Carmin J., 2011. Political Economy of the Environment. *Annual Review of Sociology*, 37: 221-38. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.012809.102639>
- Schure J., Mvondo S. A., Awono A., Ingram V., Lescuyer G., Sonwa D. *et al.*, 2010. L'état de l'art du bois énergie en RDC : Analyse institutionnelle et socio-économique de la filière bois énergie. Bruxelles, Belgique, Union européenne, CIFOR, 102 p. <http://agritrop.cirad.fr/566698/>
- Sprugel D. G., 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 64: 209-210. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1937343/full>
- Vanclay J. K., 1992. Assessing site productivity in tropical moist forests. *Forest Ecology and Management*, 54: 257-287. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90017-4)
- Vijay L. G., Hari M. B., Bajrang S., 2007. Species selection for afforestation of sub-standard soil sites with particular reference to biomass production and soil rehabilitation. *Journal of Sustainable Forestry*, 23 (3): 97-114. [http://dx.doi.org/10.1300/J091v23n03\\_05](http://dx.doi.org/10.1300/J091v23n03_05)
- Zhang H., Guan D., Song M., 2012. Biomass and carbon storage of *Eucalyptus* and *Acacia* plantations in the Pearl River Delta, South China. *Forest Ecology and Management*, 277: 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.016>
- Zianis D., Mencuccini M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187: 311-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>